Schlussbericht
Energetische Querschnittserhebung deutscher

Theaterspielstätten

und Monitoring Scharoun Theater Wolfsburg mit Schwerpunkt Komfortuntersuchung

Förderkennzeichen	03ET1209A
Zuwendungsempfänger	Technische Hochschule Köln Fakultät für Architektur Gustav-Heinemann-Ufer 54 50968 Köln
Projektleiterin	Prof. Eva-Maria Pape
Projektleiter Messung	Prof. Dr. Jörg Reintsema
Projektbearbeiter	Carolin Paulukat Birgit Meier-Wiedemann Hans Krämer Michael Kordas Milan Debus Thorsten Manns
Laufzeit des Vorhabens	01.10.2014 - 30.09.2019
Stand	30.03.2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Energetische Querschnittserhebung deutscher Theaterspielstätten und Monitoring Scharoun Theater Wolfsburg mit Schwerpunkt Komfortuntersuchung

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Fakultät für
Architektur
Institut für Energieeffiziente Architektur[3]

Fakultät für
Anlagen, Energie- und Maschinensysteme
Institut für Technische Gebäudeausrüstung

Technology
Arts Sciences
TH Köln

Inhaltsverzeichnis

1. Beschreibung des Projekts 10
1.1 Hintergrund 10
1.2 Projektziele 12
1.3 Vorgehensweise 14

2. Theaterspielstätten 16
2.1 Definition und Abgrenzung der Gebäudetypen 16
2.1.1 Abgrenzung Theaterspielstätten 16
2.1.2 Begriffsdefinition „Theater“ 16
2.1.3 Trägerschaft und Verwaltung 17
2.1.4 Produktionsformen des Theaters 18
2.1.5 Sparten des Theaters 19
2.1.6 Struktur und Bauformen des Theaters 20
2.2 Auswahl der Theaterspielstätten 22
2.2.1 Erfassung der Theaterspielstätten 22
2.2.2 Merkmale der statistischen Auswertung 23
2.2.3 Ergebnisse der Auswertung 25
2.2.4 Ableitung des Auswahlschemas 28

3. Vorbereitung und Durchführung der Querschnittserhebung 32
3.1 Akquise der Theaterspielstätten 32
3.2 Festlegung der Messzeiträume 36
3.3 Dauer der Messzeiträume 37

4. Werkzeuge zur Beurteilung des Energieverbrauchs und Raumkomforts 38
4.1 Messungen 38
4.1.1 Erfassung der Wetterdaten 38
4.1.2 Basismesskonzept zur Erfassung der Energieströme 40
4.1.2.1 Erfasste Energiestöme 40
4.1.2.2 Entwicklung des technischen Konzepts 40
4.1.3 Messtechnische Erfassung des Raumkomforts auf Nutzerebene 42
4.1.3.1 Behaglichkeit und Raumkomfort 42
4.1.3.2 Gestalterisches Konzept des Messtorsos 44
4.1.3.3 Technisches Konzept des Messtorsos 46
4.1.3.4 Platzierung der Messtorsi 50

4.2 Berechnung des Energiebedarfs mit TEK-Tool 52
4.2.1 Beschreibung des Programms 52
4.2.2 Aufnahme der Gebäudedaten 52
4.3 Vorbereitung der Nutzerbefragung 54
4.3.1 Entwicklung des Nutzerfragebogens 54
4.3.2 Beschreibung des Nutzerfragebogens 55
4.3.3 Durchführung der Nutzerbefragung 56

5. Datenauswertung 57
5.1 Flächenverteilung 57
5.1.1 Definition und Ermittlung der Nettogrundfläche 57
5.1.2 Darstellung und Analyse der Nettogrundfläche 58
5.1.3 Entwicklung und Bewertung der Zonierung 60
5.2 Auswertung der Wetterdaten 62
5.3 Energetische Bewertung 67
5.3.1 Definition von Vergleichswerten und Ermittlung energetischer Kennwerte 67
5.3.2 Darstellung und Bewertung der Messergebnisse 68
5.3.2.1 Stromverbrauch 68
5.3.2.2 Lastgang 71
5.3.2.3 Standardlastprofile für Strom 74
5.3.2.4 Verbrauch für Heizung und Warmwasser 78
5.3.3 Jahresenergieverbrauchs 81
5.3.3.1 Einordnung der Messwerte für Strom 81
5.3.3.2 Einordnung der Messwerte für Heizung und Warmwasser 87
5.3.3.3 Bewertung 90
5.3.4 Benchmarking 94
5.3.4.1. Definition von Energiebezugsgrößen 94
5.3.4.2 Flächenbezogene Energiekennwerte 97
5.3.4.3 Sitzplatzbezogene Energiekennwerte 105
5.4 Auswertung der TEK-Tool Berechnungen 108
5.4.1 Struktur des Energiebedarfs nach Verbraucher 108
5.4.2 Energiebedarfsstruktur nach Zonen 110
5.5 Auswertung des Raumkomforts 116
5.5.1 Bewertungskriterien 116

5.5.1.1 Raumluftqualität 116
5.5.1.2 Thermischer Komfort 117
5.5.2 Darstellung und Bewertung der Messergebnisse 121
5.5.2.1 Raumluftqualität 121
5.5.2.2 Lufttemperatur 124
5.5.2.3 Vertikale Temperaturunterschiede 128
5.5.2.4 Zugluft 131
5.5.2.5 Relative Luftfeuchte 134
5.5.2.6 Gesamtthermische Empfindung 137
5.5.3 Zusammenfassung 140
5.6 Auswertung der Nutzerbefragung 142
5.6.1 Bewertungskriterien 142
5.6.2 Darstellung und Bewertung 145
5.6.2.1 Zufriedenheit mit dem Theatersaal 145
5.6.2.2 Wahrnehmungsbewertung des persönlichen thermischen Befindens 148
5.6.2.3 Affektive Bewertung und thermische Präferenz 151
5.6.2.4 Persönliche Annehmbarkeit und Toleranz 154
5.7 Gegenüberstellung der Nutzerbefragung mit den Messwerten 156
5.7.1 Temperatur 156
5.7.2 Luftfeuchte 158
5.7.3 Luftbewegung 160
5.7.4 Raumluftqualität 162
5.8 Herleitung des Raumtyps „Theatersaal“ 166
5.8.1 Notwendigkeit eines Raumtyps für Theatersäle 166
5.8.2 Definition 167
5.8.3 Einordnung der Messergebnisse 169

6. Nutzungsprofil der Theaterspielstätten 170
6.1 Nutzungsprofile nach DIN V 18599 170
6.2 Gegenüberstellung des Nutzungsprofils nach DIN mit den erhobenen Daten 173
6.2.1. Nr. 23 Zuschauerbereich – Theater und Veranstaltungsbauten 173
6.2.2 Nr. 24 Theater-Foyer 178
6.2.3 Nr. 25 Bühne - Theater- und Veranstaltungsbauten 181

7. Zusammenfassung der Ergebnisse zur Querschnittserhebung 184

8. Durchführung des Intensivmonitorings 190

9. Scharoun Theater Wolfsburg 193
9.1 Standort und Architektur 193
9.2 Durchführung der Sanierung 196
9.2.1 Sanierungsmaßnahmen 196
9.2.2 Energetische Zielsetzung 198
9.3 Zustand nach der Sanierung 200
9.3.1 Nutzung 200
9.3.2 Flächen 202
9.3.3 Konstruktion und Thermische Gebäudehülle 204
9.3.4 Gebäudetechnik 208
9.3.4.1 Heizkonzept und Warmwasserbereitung 208
9.3.4.2 Kühlkonzept 211
9.3.4.3 Belüftungskonzept 213
9.3.5 Tages- und Kunstlichtkonzept 217

10. Anpassung und Entwicklung des Messkonzepts 222
10.1 Messung der Wetterdaten 222
10.2 Messung der Energiestöme 224
10.3 Messtechnische Erfassung des Raumkomforts 229
10.3.1 Technisches Gesamtkonzept 229
10.3.2 Technisches Konzept der Messboxen 231

11. Auswertung der Messungen und Berechnungen 232
11.1 Wetterdaten 232
11.2 Energieverbrauch 235
11.2.1 Darstellung und Bewertung 235
11.2.1.1 Gesamtstromverbrauch 235
11.2.1.2 Jährliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs 238
11.2.1.3 Monatliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs 240
11.2.1.4 Wöchentliche und tägliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs 245
11.2.1.5 Verbrauch für Heizung und Warmwasser 249
11.2.2 Lastprofilanalyse 251
11.2.2.1 Elektrische Gesamtlast 251
11.2.2.2 Einzelne elektrische Lasten 252
11.2.2.3 Beschreibung der Standardlastprofile 258
11.2.2.4 Analyse der Standartlastprofile 261
11.2.2.5 Analyse des Lastverlaufs einzelner Stromkreise 272
11.2.3 Energetische Analyse 282
11.2.3.1 Lüftungsanlage im Zuschauerraum 282
11.2.3.2 Kälteanlage 288
11.2.4 Abgleich mit den Sanierungszielen 296
11.2.5 Einordnung in das Benchmarking 298
11.3 Auswertung der Berechnungen mit TEK Tool 305
11.3.1 Struktur des Energiebedarfs nach Zonen und Verbraucher 305
11.3.2 Einordnung der berechneten Werte in die Querschnittserhebung 311
11.3.3 Gegenüberstellung der Messwerte mit den TEK-Tool-Berechnungen 317
11.4 Auswertung des Raumkomforts 320
11.4.1 Raumkomfort im Zuschauersaal 320
11.4.1.1 Stationärer Messtorso 320
11.4.1.2 Mobiler Messtorso 329
11.4.2 Raumkomfort im Foyer 337
11.4.3 Raumkomforts in einem beispielhaften Büroraum 345
11.4.4 Raumluftqualität in der Garderobe 350
11.4.5 Raumkomfort im Proberaum 352
11.5 Auswertung der Nutzerbefragung 354
11.5.1 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse 354
11.5.1.1 Gesamtergebnisse 354
11.5.1.2 Eine Vorstellung 359
11.5.1.3 Einzelne Bereiche im Zuschauersaal 362
11.5.2 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Nutzerbefragung mit den Messergebnissen 365

12. Zusammenfassung der Ergebnisse zum Intensivmonitoring 370

13. Zusammenfassung und Ausblick 376

14. Glossar 382

15. Literaturverzeichnis 386

16. Abbildungsverzeichnis 394

Theaterspielstätten

1. Beschreibung des Projekts

1.1 Hintergrund

Um der globalen Herausforderung des Klimawandels zu begegnen, wurde auf der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris erstmals ein gemeinsames Klimaschutzabkommen mit dem Ziel verabschiedet, die Erderwärmung langfristig auf unter zwei Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen. Beim Klimaschutzabkommen handelt es sich um ein rechtsverbindliches Instrument, welches die Mitgliedsstaaten völkerrechtlich verpflichtet, nationale Klimaschutzmaßnahmen festzulegen und diese bei den Vereinten Nationen einzureichen.

Die Bundesregierung hat mit Ratifizierung des Abkommens den Klimaschutzplan 2050 erarbeitet, welcher auf dem Ausbau erneuerbarer Energien sowie der Steigerung der Energieeffizienz basiert. Bis 2050 wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 80 bis 95% angestrebt. Darüber hinaus wurde bis 2030 das Zwischenziel gesetzt, bereits eine Senkung der Treibhausgasemissionen um 55% herbeizuführen. Mit der Definition der Gesamtziele erfolgte auch die Festlegung von Handlungsbereichen, zu welchen auch der Gebäudesektor zählt.

Durch den Gebäudesektor werden, bezogen auf 2013, ein Anteil von 37,6% am Endenergieverbrauch sowie unter Berücksichtigung direkter und indirekter Anteile knapp ein Drittel der Treibhausgasemissionen verursacht. Sowohl im Neubau, für den eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Standards erfolgt, als auch im Bestand sollen Einsparpotentiale realisiert werden, sodass bis 2050 eine Reduzierung des Primärenergiebedarfs um etwa 80% und ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand erreicht wird. Bereits bis 2030 sollen die Treibhausgasemissionen um etwa 66% verringert werden.

Neben der Differenzierung zwischen Bestand und

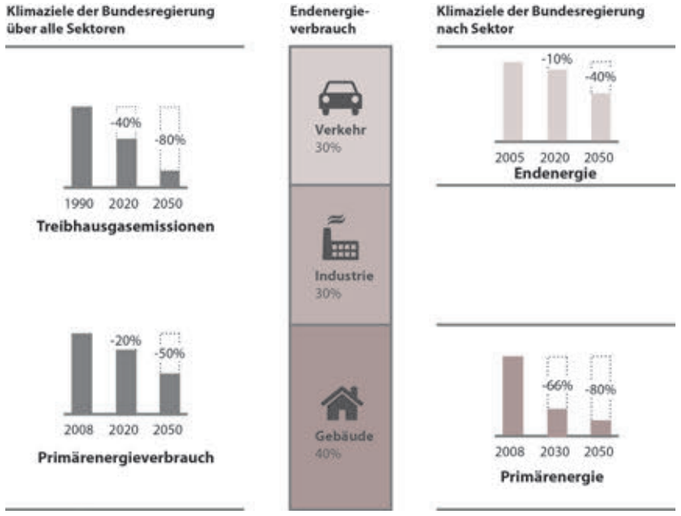

Abb. 01 Klimaziele der Bundesregierung

Neubau erfolgt auch eine Unterscheidung zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden. Besonders im Bereich der Nichtwohngebäude bestehen viele Gebäudetypologien, die hinsichtlich Nutzung und Energieverbrauchsstruktur starke Unterschiede aufweisen. Dies erschwert eine Erfassung des Bestands. Um energetische Anforderungen für Nichtwohngebäude unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzungen definieren zu können, muss die Datenlage in diesem Bereich verbessert werden. Somit sieht die Bundesregierung neben Investitions- und Modernisierungsprogrammen auch einen wichtigen Bestandteil in der Forschungsförderung. Im Zuge dessen wurden bereits einzelne Gebäudetypologien sukzessive energetisch untersucht.

Überaus komplex in Hinblick auf die Flächennutzungsstruktur sowie die Anforderungen an Gebäudetechnik und den Raumkomfort ist der Gebäudetypus Theaterspielstätten. Auch wenn dieser Typus nur verhältnismäßig wenige Gebäude umfasst, so handelt es sich hierbei jedoch um öffentlich geförderte kulturelle Einrichtungen, die nach Bestreben der Bundesregierung auf dem Weg zum treibhausgasneutralen Gebäudebestand eine Vorbildfunktion einnehmen sollen. Theaterspielstätten sind Gebäude, die aufgrund ihres hohen kulturellen Stellenwerts in der Vergangenheit oftmals an zentralen städtischen Orten errichtet wurden und somit noch heute für viele Städte als identitätsstiftend anzusehen sind. Die Dichte dieses Gebäudetypus in Deutschland sowie die Vielfalt der künstlerischen Ausdrucksformen ist weltweit einzigartig und wurde auf Vorschlag des Deutschen Bühnenvereins und des deutschen Musikrats im Jahr 2014 in das bundesweite Verzeichnis des immateriellen Kulturerbes aufgenommen. Mittlerweile wurde durch das Auswärtige Amt auch ein Antrag auf Aufnahme in die UNESCO-Liste des immateriellen Kulturerbes gestellt. Die Wechselwirkung zwischen den sozialen Entwicklungen und den architektonischen Ausdrucksformen über die Epochen hinweg haben im Bereich der Theaterspielstätten zu einer vielfältigen Gebäudesubstanz geführt. Diese ist jedoch in den letzten Jahren vernachlässigt worden, sodass hier ein hoher Sanierungsbedarf besteht. Verdeutlicht wird dies durch die vielerorts öffentlich geführten Diskussionen um den Umgang mit der Bausubstanz, wobei hier besonders das Beispiel der Doppelanlage Frankfurt genannt werden kann. Mit Hilfe einer ausführlichen Bestandsaufnahme sowie der Entwicklung von verschiedenen Szenarien, die neben unterschiedlichen Sanierungsmöglichkeiten auch den Abriss und Neubau in Betracht ziehen, werden die bestehenden Schwierigkeiten und Konflikte für den Einzelfall erfasst. In Bezug auf die Erreichung der oben genannten Klimaziele der Bundesregierung erhält besonders der Energieverbrauch bei Sanierungen und Neubauten eine besondere Bedeutung. Dessen Erforschung bildet eine wichtige Säule in der Forschungspolitik, deren Ziele und Schwerpunkte in Energieforschungsprogrammen festgeschrieben werden. Durch das 6. Energieforschungsprogramm „Forschung für umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ wird auch das Forschungsfeld „Energieoptimiertes Bauen“ (EnOB) abgedeckt, in welches auch das hier behandelte Forschungsprojekt fällt. Eine Einordnung des Energieverbrauchs sowie des Raumkomforts und der Definition von Zielwerten für Theaterspielstätten ist nur über die Gegenüberstellung mit gleichwertigen Bauten möglich. Der Teilbereich der Querschnittserhebung im Rahmen des Forschungsprojekts verfolgt daher das Ziel, die Gebäudesubstanz energetisch und raumkomforttechnisch exemplarisch abzubilden.[12],[16],[17],[21],[22],[82],[92],[113]

Literatur:
[12] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016)
[16] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2012)
[17] Bundesregierung (2014)
[21] Deutsche UNESCO-Kommission (2019a)
[22] Deutsche UNESCO-Kommission (2019b)
[82] Reinhard, A. et al. (2016)
[92] Schmal, C. et al. (2018)
[113] Winands, G. (2019)

1.2 Projektziele

Bisher liegen für den Gebäudetypus der Theaterspielstätten weder energetische Kennwerte noch Daten zum Raumklima vor. Beide Aspekte bilden jedoch eine wichtige Grundlage, um den baulichen und technischen Zustand von Gebäuden dieser Kategorie zu beurteilen. Das Forschungsprojekt verfolgt daher das Ziel, eine Datenbasis zu schaffen, um zukünftig eine Klassifizierung des Bestands vornehmen zu können. Da die meisten Theaterspielstätten seit ihrer Errichtung weitestgehend im Originalzustand belassen worden sind, befinden sich viele dieser Gebäude in einem sanierungsbedürftigen Zustand. Um die Gebäude auch in der Zukunft weiterhin nutzen zu können, muss im Zuge von Sanierungsmaßnahmen, oftmals unter Berücksichtigung denkmalpflegerischer Aspekte, ein Angleichen an heutige Anforderungen erfolgen, zu denen auch energetische Gesichtspunkte zählen. Neben der Schaffung einer Datenbasis zur Klassifizierung des Bestands werden darüber hinaus beispielhaft Potentiale durch energetische Sanierungen untersucht.

Zur Erreichung dieser beiden Ziele gliedert sich das Forschungsprojekt in zwei Bestandteile. Mit einer deutschlandweiten Querschnittserhebung wurden in dreizehn Theaterspielstätten über drei bis vier Wochen sowohl Daten zum Raumklima als auch Gesamtverbräuche für Strom sowie Heizung und Warmwasser erfasst. Anhand der Verbrauchsdaten konnten Energieverbrauchsstrukturen abgeleitet sowie energetische Kennwerte gebildet werden. Während die energetischen Kennwerte dazu verwendet wurden, um den Energieverbrauch verschiedener Häuser miteinander zu vergleichen und eine Einordnung des Bestands vorzunehmen, wird anhand der Energieverbrauchsstrukturen sichtbar, in welchen Bereichen des Theaters die meiste Energie verbraucht wird und möglicherweise Einsparpotentiale bestehen.

Die Daten zum Raumklima, zu deren Erhebung Messtorsi auf Nutzerebene eingesetzt wurden, sind geltenden Normen gegenübergestellt worden, um so die vorliegenden Raumkomfortverhältnisse zu bewerten. Im Zuge der raumkomforttechnischen und energetischen Messungen wurden gleichzeitig Daten zu Nutzungsabläufen im Gebäude erhoben, die sowohl Nutzungszeiten als auch den Betrieb technischer Anlagen einschließen. Mit den Daten zu den technischen Anlagen wurden Anlagenbetriebsmuster sowie Nutzungsprofile erstellt. Anschließend wurden diese mit den Nutzungsrandbedingungen der DIN V 18599 für ausgewählte theaterspezifische Nutzungen gegenübergestellt, um auf diese Weise einen möglichen Anpassungsbedarf aufzuzeigen.

In einem zweiten Bestandteil des Projekts hat ein einjähriges Intensivmonitoring des sanierten Scharoun Theaters Wolfsburg Aufschluss über die Realisierung von energetischen Einsparpotentialen gegeben, indem sowohl eine Gegenüberstellung der Messergebnisse mit den Sanierungszielen als auch mit den Ergebnissen zum Gebäudebestand aus der Querschnittserhebung erfolgt ist. Im Zuge des Intensivmonitorings erfolgte die detaillierte Erfassung von Verbräuchen und Energieströmen, sodass eine Analyse von Energieverlusten und eine weitere Optimierung der Steuerung der Anlagentechnik möglich ist. Erkenntnisse, die am Beispiel des Scharoun Theaters Wolfsburg gewonnen wurden, können in der Praxis auf andere Theaterspielstätten übertragen werden, um auch dort den Energieverbrauch zu reduzieren.

Mit dem Forschungsvorhaben „Energetische Querschnittserhebung deutscher Theaterspielstätten und Monitoring Scharoun Theater Wolfsburg mit Schwerpunkt Komfortuntersuchungen“ soll folglich eine wissenschaftliche Auswertung des Energieverbrauchs und Raumkomforts in Theaterspielstätten erfolgen und die Potentiale einer umfassenden Sanierung dieses Gebäudetypus demonstriert werden.

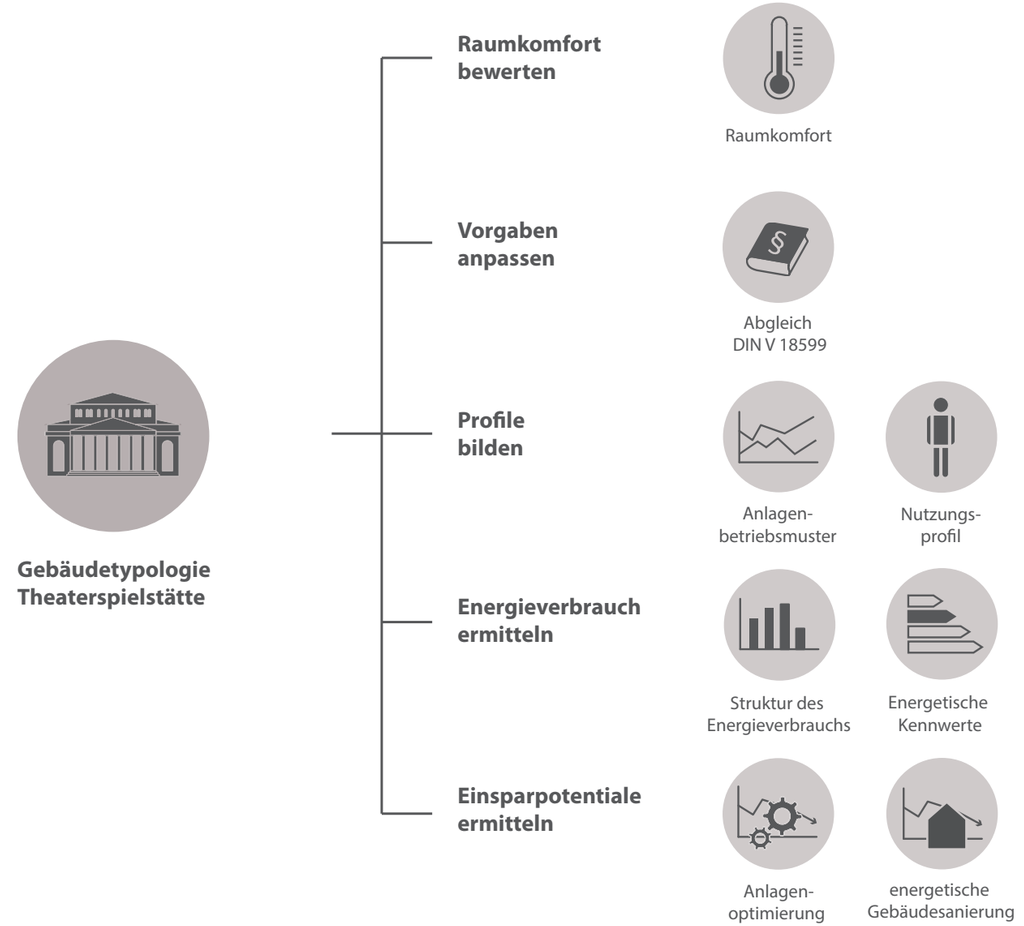

Abb. 02 Projektziele

1.3 Vorgehensweise

Das Forschungsvorhaben „Energetische Querschnittserhebung deutscher Theaterspielstätten und Monitoring Scharoun Theater Wolfsburg mit Schwerpunkt Komfortuntersuchung“ wurde an der Technischen Hochschule Köln im Zeitraum von Oktober 2014 bis September 2019 unter Leitung von Prof. Eva-Maria Pape durchgeführt. Innerhalb der Hochschule handelte es sich um eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fakultät für Architektur, Institut für Energieeffiziente Architektur und der Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme, Institut für Technische Gebäudeausrüstung. Hierbei war das Institut für Energieeffiziente Architektur, in Verantwortung von Prof. Eva-Maria Pape, für die Organisation des Projekts, Recherche und Analyse sowie die Datenauswertung zuständig, während durch das Institut für Technische Gebäudeausrüstung unter Leitung von Prof. Dr. Jörg Reintsema die Entwicklung des Messkonzepts, die Durchführung der Messungen sowie die Datenkontrolle und –aufbereitung erfolgte.
Vor Beginn der Messungen fand in einem ersten Schritt eine Auseinandersetzung mit der Gebäudetypologie der Theaterspielstätten sowie dem vorhandenen Gebäudebestand statt. In Kapitel 2 ist beschrieben, welche Art von Theaterspielstätten für das vorliegende Forschungsprojekt relevant sind. Die entsprechenden Gebäude wurden erfasst und statistisch ausgewertet. Auf Basis dieser Daten wurde ein Schema zur Auswahl der Theaterspielstätten zur Teilnahme an der Querschnittserhebung erstellt. Die Kapitel 3 bis 7 befassen sich mit der Querschnittserhebung, während die Kapitel 8 bis 12 das Intensivmonitoring thematisieren. Die Darstellung beider Projektbestandteile ist ähnlich aufgebaut: Zunächst werden die Randbedingungen aufgezeigt, das Messkonzept erläutert und schließlich die Messdaten ausführlich dargestellt und analysiert. Die Darstellung und Analyse der Messdaten gliedert sich in einen Teil zum Energieverbrauch und einen Teil zum Raumkomfort. Zur Erfassung des Energieverbrauchs wurden bei der Querschnittserhebung über drei bis vier Wochen und bei dem Intensivmonitoring über ein Jahr Messungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden auch Berechnungen mit TEK-Tool erstellt, um so den einzelnen Nutzungsbereichen und Gewerken des Theaters Energieverbrauchsanteile zuordnen zu können. Parallel zu den Energieverbrauchsmessungen fanden Untersuchungen zum Raumkomfort statt. Es wurden sowohl Messungen als auch Nutzerbefragungen durchgeführt, sodass in der Auswertung eine Gegenüberstellung von objektiven Messdaten und subjektiven Empfindungen möglich war. In den letzten Kapiteln wird abschließend eine Zusammenfassung der wichtigsten Projektergebnisse gegeben und der weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgezeigt.

Abb. 03 Angewandte Untersuchungsmethoden

2. Theaterspielstätten

2.1 Definition und Abgrenzung der Gebäudetypen

2.1.1 Abgrenzung Theaterspielstätten

Im Rahmen des Forschungsprojekts handelt es sich bei der Definition von Theaterspielstätten um solche Gebäude, die eigens für die Durchführung von Inszenierungen, die den Sparten des Theaters zuzuordnen sind, erbaut wurden und sich bis heute als solche in der Nutzung befinden.
Gebäude, die nicht als Theaterspielstätten erbaut, sondern später zu Spielstätten umgenutzt worden sind, unterscheiden sich grundsätzlich in Kubatur und Raumprogramm, sodass eine Vergleichbarkeit in Bezug auf den Energieverbrauch kaum gegeben ist.
Neben der Art des Gebäudes muss die Form des Theaterbetriebs berücksichtigt werden, da diese Auswirkungen auf das Nutzungsschema und somit auf den Energieverbrauch hat. In Deutschland werden überwiegend Häuser mit Repertoirebetrieb öffentlich gefördert, sodass sich das Forschungsprojekt auf diese fokussiert.[94]

2.1.2 Begriffsdefinition „Theater“

Der Begriff „Theater“ kann dem Grunde nach drei unterschiedliche Bedeutungen aufweisen. Zunächst versteht man hierunter die kulturelle Institution, die einen Theaterbetrieb organisiert und durchführt, wohingegen es sich auch um eine einzelne Aufführung oder eine Vorstellung handeln kann. Darüber hinaus umfasst die Begrifflichkeit auch die zur Aufführung von Inszenierungen bestimmten Gebäude. Wird im Folgenden der Begriff „Theater“ verwendet, so ist hiermit das Gebäude gemeint, welches auch als Theaterspielstätte oder Theatergebäude bezeichnet wird.[06]

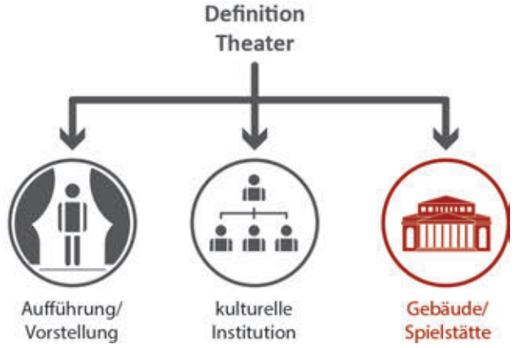

Abb. 04 Begriffsdefinition Theater

2.1.3 Trägerschaft und Verwaltung

Die Einordnung eines Theaterbetriebs erfolgt anhand der Rechtsträgerschaft. Hier unterscheidet man privat betriebene Theater, wie beispielsweise Musical- oder Boulevardtheater, und staatlich geführte Theater. Staatlich geführte Theater, auf die sich das Forschungsprojekt konzentriert, werden aus der Verantwortlichkeit des Staates für Kulturpflege und Volksbildung heraus öffentlich subventioniert. Die Trägerschaft des Theaters liegt je nach Verwaltungsebene in der Hand des Landes, der Stadt, bzw. dem Kreis oder der Gemeinde. Die Zuordnung zu der jeweiligen Verwaltungsebene kann aus dem historischen Kontext abgeleitet werden. Staatstheater, deren alleiniger Rechtsträger das Bundesland ist und deren Finanzierung zu mindestens 50% aus dem Bundeshaushalt erfolgt, sind aus den Hof- und Residenztheatern entstanden. Nach Ende des Kaiserreichs, bzw. der Fürstenherrschaft im 20.Jh., ging die Verwaltung der Theater in die Hand der Länder über, da diese die Rechtsnachfolger der Monarchie darstellen.
Meist handelt es sich bei dieser Art von Theaterspielstätten um Häuser mit einer großen Zuschauerkapazität und einer langen Theatertradition.
Stadttheater werden entweder von ein oder mehreren Städten kommunal verwaltet. Zum größten Teil handelt es sich um Theaterspielstätten, die im 19.Jh. im Zuge der Aufklärung als Privattheater entstanden sind. Aufgrund der geringen Rentabilität der Theater gingen diese nach und nach in die Hand der Städte über. Das Stadttheater ist heute die weitverbreitetste Form des Theaters in Deutschland.
Neben dem Staats- und Stadttheater besteht als Rechtsform noch das Landestheater. Im Gegensatz zu den anderen beiden Theaterformen verfügt das Landestheater zwar über ein festes Ensemble, nicht jedoch zwangsläufig über eine eigene Spielstätte und ist somit auch als kulturelle Institution zu verstehen. Seine Aufgabe ist es, Aufführungen in Gegenden durchzuführen, in denen kein öffentliches Theater angesiedelt ist.[67],[79],[107]

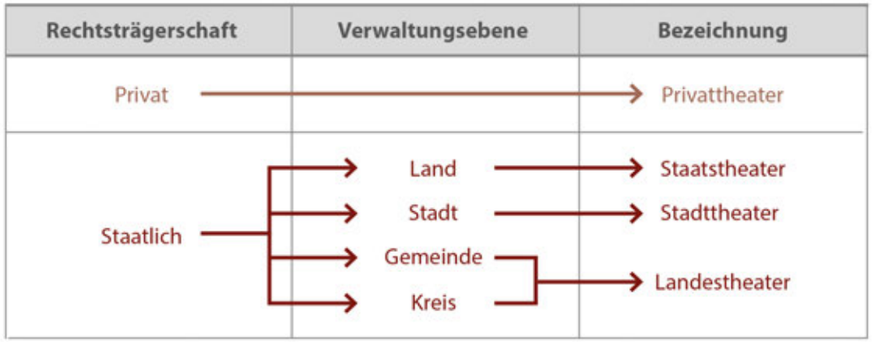

Abb. 05 Einordnung und Bezeichnung des Theaterbetriebs anhand der Rechtsträgerschaft

Literatur:
[06] Bibliographisches Institut (2015)
[67] Jacobshagen, A. (2012)
[79] Lutz, Markus (2013)
[94] Schmidt, T. (2017)
[107] Von Düffel, J. (2003)

2.1.4 Produktionsformen des Theaters

Ein Theater kann über unterschiedliche Produktionsformen verfügen, die sich auf die Nutzung der Theaterspielstätte auswirken. Als En-Suite-Spielbetrieb bezeichnet man die Aufführung eines einzigen Theaterstücks, meist mit gleichbleibender Besetzung, über einen bestimmten Zeitraum. Dieser wird häufig auf Basis der Resonanz durch die Zuschauer bestimmt. Während des Wechsels des Stücks bleibt das Theater meist über einen längeren Zeitraum geschlossen, da währenddessen die Proben für das neue Stück sowie der Umbau des Bühnenbilds stattfinden. Typisch ist diese Produktionsform für den romanischen sowie angelsächsischen Sprachraum und ist auch bei Musicaltheatern im deutschsprachigen Raum üblich.

Das Repertoiresystem hingegen zeichnet sich dadurch aus, dass das Theater über ein längerfristig fest engagiertes Ensemble verfügt. Dies ermöglicht es, verschiedene Inszenierungen abwechselnd innerhalb eines Zeitraums zu zeigen. Auch die Aufführung älterer Inszenierungen kann kurzfristig wiederaufgenommen werden. Die Proben sowie der Umbau des Bühnenbilds erfolgen daher parallel zum Spielbetrieb. Diese Produktionsform ist im mittel- und osteuropäischen Raum weit verbreitet und ist somit auch für die deutsche Theaterlandschaft charakteristisch.

Theaterspielstätten mit Gastspielbetrieb verfügen über kein eigenes Ensemble, sodass keine Eigenproduktionen möglich sind. Stattdessen werden Produktionen anderer Theater eingekauft, die nur in wenigen Vorstellungen zu sehen sind. In Folge dessen entfallen meist Proben in diesen Häusern. Dafür ist ein ständiger Umbau des Bühnenbilds erforderlich.[07],[79]

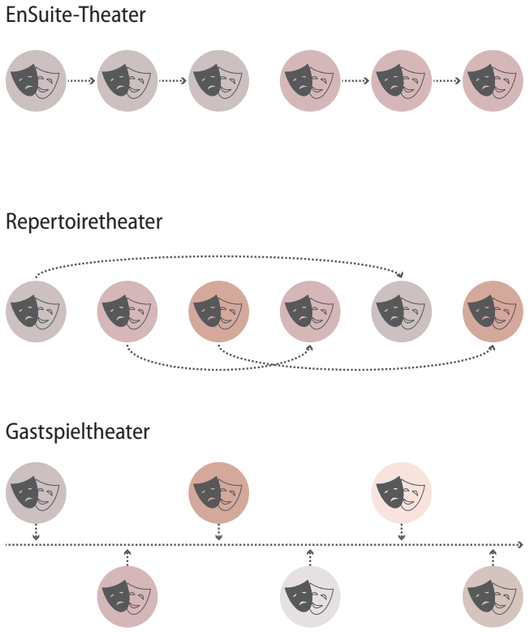

Abb. 06 Produktionsformen des Theaters

Literatur:
[07] Boerner, S. (2002)
[79] Lutz, M. (2013)
[108] Vorwerk, C.(2012)

2.1.5 Sparten des Theaters

In Abhängigkeit der vorherrschenden Ausdrucksform in einer Inszenierung ordnet man diese den unterschiedlichen Theatersparten zu. Bei den klassischen Sparten handelt es sich um das Schauspiel sowie das Musik- und Tanztheater. Das Schauspiel zeichnet sich dadurch aus, dass die Vermittlung der Handlung überwiegend durch die Sprache sowie Gestik und Mimik erfolgt. Beim Musiktheater hingegen findet eine zusätzliche Verbindung mit musikalischen Elementen statt. Typische Formen des Musiktheaters sind die Oper, die Operette und das Musical. Der zentrale Bestandteil des Tanztheaters sind tänzerische Elemente. Zu dieser Form des Theaters zählen sowohl das Ballett als auch moderne Tanzformen.

Neben den klassischen Sparten des Theaters haben sich im Laufe der Zeit zwei weitere Sparten entwickelt: Das Figurentheater, bei dem Figuren, die von Spielern bedient werden, die Hauptakteure sind und das Kinder- und Jugendtheater. Es adressiert Kinder- und Jugendliche als Zielgruppe, lässt sie selbst an den Inszenierungen mitwirken und befasst sich stark mit Themen des gesellschaftlichen Wandels.

Je nach Anzahl der Sparten erfolgt die Bezeichnung der Häuser als Ein- oder Mehrspartenhäuser. Als eigene Sparte gilt hierbei, wenn für diese eine eigenständige Organisation sowie ein Ensemble vorhanden ist. In Deutschland sind überwiegend Häuser mit Mehrspartenbetrieb vorhanden.[108]

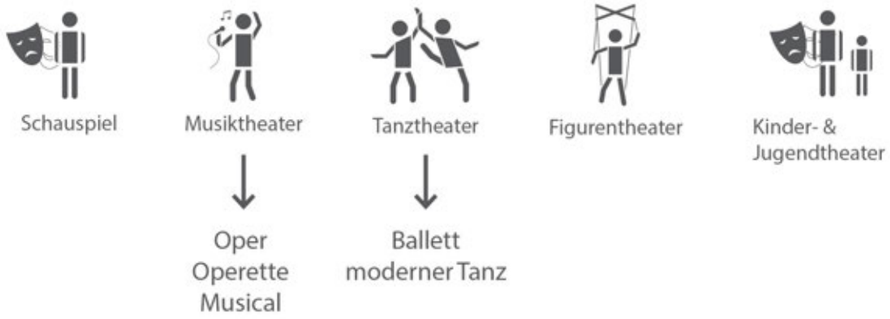

Abb. 07 Darstellung der Sparten und ihren Unterformen

2.1.6 Struktur und Bauformen des Theaters

Das Theater verfügt neben seiner Unterhaltungsfunktion über eine kulturelle, ästhetisch-künstlerische und gesellschaftskritische Funktion. Zur Erfüllung dieser Aufgabe werden Gebäude benötigt, die diesen Anforderungen gerecht werden können, indem sie ein Zusammentreffen von Zuschauern und Akteuren ermöglichen. Für diese Aufgabe sind komplexe Raumstrukturen erforderlich, die anhand des umfangreichen Raumprogramms sichtbar werden. Das Raumprogramm beinhaltet Räume unterschiedlichster Nutzungen, die zur Erreichung optimaler funktionaler Abläufe festgelegte Bezüge aufweisen.

Ein Theater verfügt in der Regel über zwei unterschiedliche Seiten. Während die Vorderseite für die Zuschauer einladend gestaltet ist, ist die Rückseite meist funktional gehalten. Zwischen diesen beiden Bereichen findet im Inneren des Gebäudes eine Staffelung der unterschiedlichen Funktionsbereiche statt. Der an die Vorderseite des Gebäudes anschließende repräsentative Bereich wird hauptsächlich durch Zuschauer frequentiert und umfasst Foyer, Zuschauergarderoben und sonstige Serviceeinrichtungen. Der zentrale Bereich beinhaltet den Zuschauersaal mit Anschluss an die Hauptbühne und fokussiert sich damit auf die Begegnung zwischen Zuschauern und Akteuren. Der Zuschauersaal kann zwar in unterschiedlichsten Formen ausgeführt sein, ist jedoch immer in Abhängigkeit der Sichtverhältnisse sowie unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten geplant. Er kann durch den „Eisernen Vorhang“ von der Hauptbühne separiert werden, sodass der Raum in zwei Brandabschnitte unterteilt werden kann. Über der Hauptbühne erhebt sich der Bühnenturm, um Kulissen in kurzer Zeit austauschen zu können. Oftmals ist auch eine Unterbühne vorhanden, die Platz für Drehbühnen oder Versenkungsmechanismen bietet. Die Vorbühne erstreckt sich als Erweiterung in den Zuschauersaal hinein und überdeckt den Orchestergraben.

Der hintere, funktionale Bereich des Theaters wird ausschließlich durch das Personal genutzt und enthält zahlreiche Funktionen, unter anderem die Räume für künstlerisches und technisches Personal sowie Räume für die Verwaltung. Die Künstlergarderoben sowie die Garderoben und Aufenthaltsräume für Chor und Orchester sind meist in Bühnennähe angeordnet. Aufenthaltsräume und Umkleiden für das technische Personal befinden sich oftmals im Untergeschoss. Des Weiteren verfügen die Theatergebäude über Büroräume, eine Kantine mit Speiseraum zur Versorgung des Personals sowie weitere Serviceräume. Außerdem sind, in Anhängigkeit der jeweiligen Sparten des Theaters, zahlreiche Probebühnen notwendig. Neben der Schauspielprobebühne, welche die Grundfläche der Bühne wiederspiegelt, ist ein Probesaal für Ballett, ein Probesaal für den Chor, oftmals mit ansteigenden Podium, und ein Orchesterproberaum, welcher mindestens über die Größe des Orchestergrabens

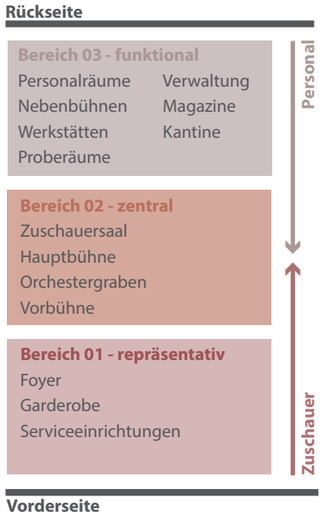

Abb. 08 Innere Organisation von Theaterspielstätten

verfügen sollte und Anschluss an Stimmzimmer für Streicher und Bläser hat, notwendig.

Auch sind Nebenräume wie Magazine, Nebenbühne und Werkstätten erforderlich, die aufgrund der gängigen Kulissenhöhe von 7m ein großes Luftvolumen benötigen. Zu den Magazinen zählt das Prospektlager, das Plastiken- und Kulissenmagazin sowie weitere Lagermöglichkeiten für Fundi, Lampen, Teppiche, Möbel, Gerüste und weiteres Equipment. Die Werkstätten sind mit Malersaal, Kaschiererei, Tischlerei, Schlosserei, Tapezierwerkstatt, Elektrowerkstatt und Montageraum zur Anfertigung der Kulissen sowie angegliederter Schneiderei, Schuhmacherei, Maskenbildnerei, Requisiten- und Rüstwerkstatt zur Ausstattung der Künstler ebenfalls vielfältig. Sie benötigen etwa das Vier- bis Fünffache der Fläche der Hauptbühne in mittleren und das Zehnfache in großen Theatern.

Die Anordnung aller Funktionen sollte am besten zentral unter einem Dach erfolgen, um einen optimalen Arbeitsablauf zu gewährleisten. Ältere Theatergebäude verfügen jedoch oftmals nicht über das Platzkontingent, sodass Funktionen wie Werkstätten, Probebühnen und Magazine ausgelagert sind.

Das äußere Erscheinungsbild der Theater hat sich im Laufe der Zeit stark verändert. Bis über die Mitte des 19. Jahrhunderts hinaus waren Theater von außen als solche nicht zu erkennen, da die Theatersäle sowie die Bühnen in schlichte Gebäude eingebaut wurden. Zahlreiche Theaterbrände führten zum Erlass einer Theaterbauverordnung, die zur Entwicklung neuer

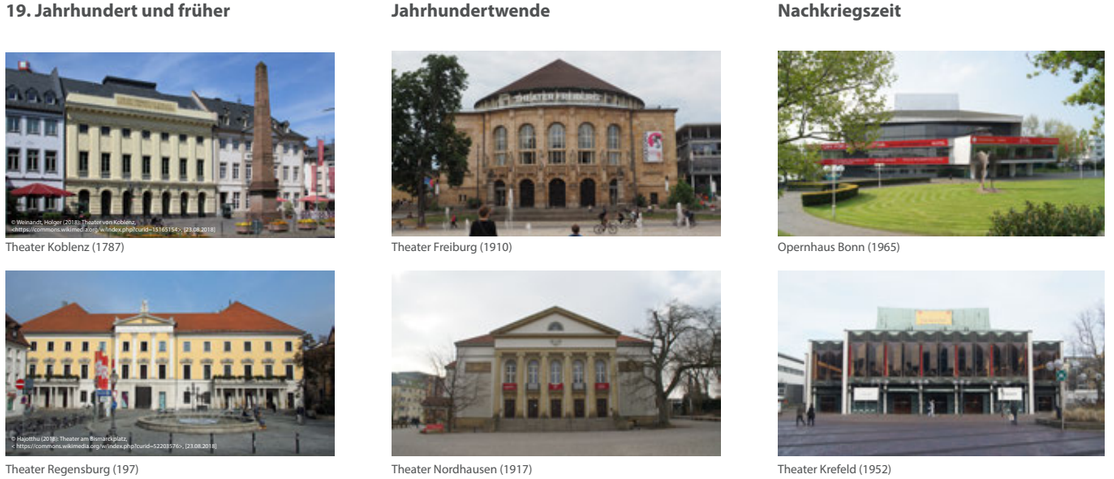

Abb. 09 Äußeres Erscheinungsbild von Theaterspielstätten

Bauformen zwang. Unter anderem waren Bühnenhaus und Zuschauerhaus nun nicht mehr unter einem Dach unterzubringen. Technische Neuerungen im Bereich des Szenenwechsels führten außerdem dazu, dass sich der Bühnenturm in die Höhe entwickelte. Somit kam es dazu, dass um die Jahrhundertwende erbaute Theaterspielstätten ein prägnantes Erscheinungsbild aufweisen. Die nun aus ästhetischen und brandschutztechnischen Gesichtspunkten meist freistehenden Gebäude orientierten sich an der Tempelform. Ausgehend vom imposanten Eingangsportikus entwickelt sich das Gebäude von der Eingangshalle über das Zuschauerhaus bis zum Bühnenturm in die Höhe, wobei die einzelnen Gebäudeteile klar erkennbar sind. In der Nachkriegszeit lässt sich dagegen keine typische Theaterbauform definieren, da die Architekten eine eigenständige und kreative Herangehensweise an den Gebäudetypus pflegten. Gemein haben Bauten dieser Zeit, dass keine explizite Inszenierung der Eingangssituation erfolgt und stattdessen ein hoher Verglasungsanteil im Eingangsbereich eine Öffnung des Gebäudes bewirkt. Der Umgang mit dem Bühnenturm wurde auf unterschiedliche Weise praktiziert. Während manche Architekten eine klare Hervorhebung bevorzugten, bemühten sich andere Architekten eher um die Einbindung in die Kubatur des gesamten Gebäudes.[51],[57],[95],[97]

2.2 Auswahl der Theaterspielstätten

2.2.1 Erfassung der Theaterspielstätten

Die für die Querschnittserhebung ausgewählten Theaterspielstätten sollen den Bestand der in Deutschland existierenden Gebäude dieser Typologie repräsentativ abbilden. Um einem Überblick über den Bestand zu erhalten, wurde eine statistische Erhebung und Auswertung durchgeführt. Für die Recherche relevanter Gebäude diente das „Deutsche Bühnen Jahrbuch 2015“ als Grundlage. Hierbei handelt es sich um eine Auflistung der in der Bundesrepublik Deutschland registrierten Theater und ihren Spielstätten. Theater ist hier jedoch nicht als Theatergebäude, sondern als künstlerisches Unternehmen definiert, welches Aufführungen von Theaterstücken arrangiert. Daher konnten die enthaltenen statistischen Übersichten nicht übernommen werden. Stattdessen wurde die Auflistung nach den des Forschungsprojekts zur Grunde liegenden Kriterien für Theaterspielstätten [siehe 2.1.1] analysiert und die relevanten Angaben in eine Datenbank übernommen. Diese umfasst in erster Linie Kontaktdaten, aber auch Angaben zum Baujahr sowie die Anzahl der Bühnen mit der dazugehörigen Sitzplatzkapazität sowie Angaben zu den Sparten. Ergänzende Informationen über die jeweiligen Theaterspielstätten wurden den Internetauftritten der Theater entnommen.

Literatur:
[06] Bibliographisches Institut (2015)
[46] Genossenschaft Deutscher Bühnen-Angehöriger (2015)
[51] Ham, R.(1987)
[57] Hoffmann, H.-C. (1966)
[95] Schmolke, B. (2011)
[97] Schubert, H. (1971)

2.2.2 Merkmale der statistischen Auswertung

Bei der Eruierung geeigneter Merkmale für die statistische Auswertung der Theaterspielstätten erfolgte eine Unterteilung in Haupt- und Nebenmerkmale. Zu den Hauptmerkmalen zählen das Baujahr sowie die Zuschauerkapazität, da angenommen wird, dass diese einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch und den Raumkomfort ausüben. Weitere Untergliederungen, beispielweise nach Nettogrundfläche, A/V-Verhältnis oder auch der vorhandenen Gebäudetechnik wären denkbar, würden jedoch zu einer großen Diversität sowie zur Abnahme der frei verfügbaren Daten führen. Als Nebenmerkmale wurden die Anzahl der Sparten sowie die Rechtsträgerschaft definiert. Während die Rechtsträgerschaft hauptsächlich zur weiteren Information über den Bestand dient, lässt die Anzahl der Sparten Rückschlüsse zur Nutzungsfrequentierung des Hauses zu.
Durch die Betrachtung des Hauptmerkmals „Baujahr“ werden mögliche Rückschlüsse auf die Konstruktion des Gebäudes und somit der Wärmedurchgangskoeffizienten erwartet. Mit dem technischen Fortschritt haben sich die üblichen Konstruktionsweisen in Bezug auf die gewählten Materialien und Bauteilstärken verändert, sodass in Forschungsprojekten des Instituts Umwelt und Wohnen Baualtersklassen festgelegt werden konnten, denen anhand der vorherrschenden Konstruktionsweisen für die unterschiedlichen Bauteile bestimmte Wärmedurchgangskoeffizienten zugewiesen wurden. Aufgrund der so zu erwartenden Wärmedurchgangskoeffizienten, durch welche die Menge der abfließenden Wärmeenergie definiert ist, können die Transmissionswärmeverluste sowie der Heizwärmebedarf des Gebäudes eingeschätzt werden. Es besteht somit die Erwartung, dass Energieverbräuche Gebäude ähnlicher Baujahre in Bezug auf eine gewählte Referenzgröße miteinander vergleichbar sind.

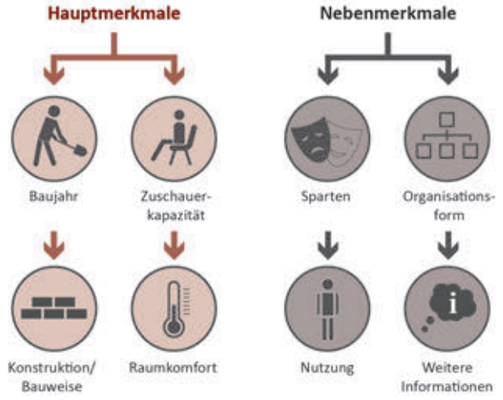

Abb. 10 Haupt- und Nebenmerkmale zur Kategorisierung von Theaterspielstätten

Die Definition der „Zuschauerkapazität“ als zweites Hauptmerkmal soll primär zur Vergleichbarkeit des Raumkomforts in unterschiedlichen Theaterspielstätten dienen. Es wird angenommen, dass das Luftvolumen pro Zuschauer den größten Einfluss auf den thermischen Komfort sowie die Luftqualität ausübt. Durch ihre Atmung stoßen die Zuschauer CO_2 aus, bringen Feuchtigkeit in den Raum ein und geben durch ihren Stoffwechsel Wärme an die Umgebung ab. Dies wiederum führt zu einer Erhöhung der CO_2-Konzentration, der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit im Zuschauersaal. Je geringer hierbei das pro Person zur Verfügung stehende Luftvolumen ist, desto stärker wirkt sich dies auf den thermischen Komfort sowie die Luftqualität aus.
Die Abmessungen eines Zuschauersaals im Theater sind aufgrund des Bestrebens, gute Sichtbeziehungen zum Bühnengeschehen sowie eine gute Akustik herzustellen, aufgrund physikalischer Abhängigkeiten limitiert.
Zur Schaffung guter Sehbedingungen sollte der maximale Abstand der Plätze bis zur Bühne nicht mehr als 35m betragen. Außerdem ist für eine gute Sicht auf

die Bühne eine durch die menschliche Körpergröße definierte Sichtüberhöhung erforderlich, die gemeinsam mit dem notwendigen Reihenabstand zu einer berechenbaren Steigung des Parkettbereichs führt. Die Steigung ist durch bauaufsichtliche Vorschriften begrenzt, sodass sich eine maximal und minimal mögliche Raumtiefe ergibt. Durch Anforderungen an den Sichtwinkel, die Einsichtstiefe in die Bühne und die Sichtlinienabweichung kommt es auch zu einer seitlichen Begrenzung des Zuschauersaals. Diese geometrischen Zwänge tragen dazu bei, dass im Parkett eines Zuschauersaals nur eine begrenzte Anzahl an Personen untergebracht werden können. Eine Steigerung der Zuschauerkapazität kann nur durch andere geometrische Formen des Zuschauersaals, beispielsweise durch den Einbau von Rängen oder gestaffelten Balkonen, erreicht werden.
Neben den Sehbedingungen spielt auch eine angemessene Akustik eine große Rolle. Da ein lautes und deutliches Hören gefordert ist, sind dem Luftvolumen aus physikalischen Anforderungen heraus Grenzen gesetzt. Ein zu großes Luftvolumen führt zu langen Nachhallzeiten, die eine laute aber undeutliche Wahrnehmung von Geräuschen begünstigt. Ein zu geringes Luftvolumen wirkt sich in einer mangelnden Lautstärke in den hinteren Reihen aus. So ergibt sich in Abhängigkeit der Nutzung und Ausformung des Zuschauersaals ein sinnvolles Luftvolumen zwischen 4 bis 6m³ pro Person. In Abhängigkeit der Zuschauerzahlen entstehen somit aufgrund der Geometrie und des Luftvolumens vergleichbare Säle.[49],[75],[77]

Literatur:
[49] Graubner, G. (1970)
[75] Leitermann, G. (2017)
[77] Loga, T. et al. (2015)

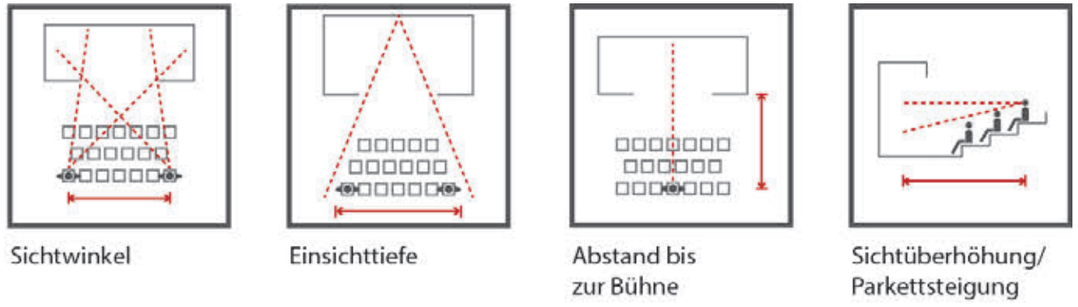

Abb. 11 Einflussfaktoren auf die Proportionen eines Zuschauersaals

2.2.3 Ergebnisse der Auswertung

Zur statistischen Auswertung des Gebäudebestands von Theaterspielstätten in Deutschland wurden zunächst alle nach [2.1.1] relevanten Gebäude erfasst und in eine Datenbank aufgenommen. Es zeigte sich, dass zum Zeitpunkt der Auswertung 132 Gebäude mit Repertoirespielbetrieb im Bundesgebiet bestanden. Die älteste heute noch erhaltene und bespielte Theaterspielstätte, das „Markgrafentheater“ stammt aus dem Jahre 1718 und steht in Erlangen. Das jüngste Theatergebäude, die „Brechtbühne“ in Augsburg, wurde im Jahr 2012 und somit ca. 294 Jahre später errichtet. Die Berechnung des Medians, welcher bei 1912 liegt, lässt darauf schließen, dass der Großteil des Bestands bereits im 19.Jahrhundert erbaut wurde. Dies kann nach Analyse der Quantile bestätigt werden. Die Hälfte des Bestands wurde vor 1912 erbaut, ein Viertel sogar noch vor 1892. Lediglich 25% des heutigen Bestands weist ein Baujahr nach 1962 auf. Da erst im Jahre 1977 die 1.Wärmeschutzverordnung in Kraft trat, ist davon auszugehen, dass lediglich 14% des Bestands unter Berücksichtigung energetischer Aspekte geplant worden ist.
Bei einer Gruppierung der Theaterspielstätten nach Jahrzehnten ist ersichtlich, dass von 1900 bis 1909 eine besonders rege Bautätigkeit herrschte. In diesem Zeitraum wurden 22 neue Theaterspielstätten errichtet. Auch von 1890 bis 1899 und von 1910 bis 1919 wurden jeweils mehr als 10 Theaterspielstätten erbaut, sodass sich eine erste Zeitspanne von ca. 30 Jahren abzeichnet, in welcher eine auffällige Bautätigkeit herrschte ist. Geschichtlich ist dies unter anderem durch den allgemeinen Wohlstand aufgrund des wirtschaftlichen Aufschwungs sowie durch die Vergrößerung der Städte zu erklären, die eine Erhöhung des Unterhaltungsbedarfs mit sich brachte. Des Weiteren begünstigte das Streben der Städte nach einer guten Außenwirkung den Bau der Theater.
Auch in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts ist nochmals eine vermehrte Anzahl an Theaterneubauten zu verzeichnen. Hier wurden pro Jahrzehnt jeweils

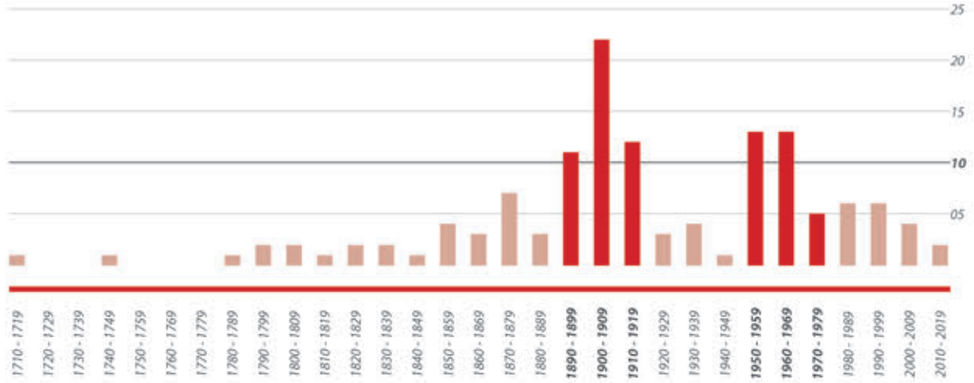

Abb. 12 Anzahl der Theaterspielstätten in Deutschland nach Baujahr

13 Theaterspielstätten errichtet. Im historischen Zusammenhang ist dies mit der Zerstörung und Beschädigung vieler Theaterspielstätten während des 2.Weltkriegs und der anschließenden politischen Neuordnung zu sehen. In der Gesellschaft kam nach Ende des Kriegs schnell der Wunsch nach dem Neu- und Wiederaufbau von Theaterspielstätten auf. Die Bevölkerung hatte zum einen Sehnsucht nach einer illusionären Welt, welche ihr Alltag noch nicht wieder bieten konnte und zum anderen herrschte der Wunsch, sich über die Kunst wieder als Gesellschaft zu definieren. Nachdem durch die Währungsreform das Geld wieder einen stabilen Wert erlangt hatte, wurde mit dem Neu- und Wiederaufbau der Theaterspielstätten begonnen.

Neben der Betrachtung des Errichtungszeitpunkts der Theaterspielstätten können diese unter dem Aspekt der Platzkapazität ihres Zuschauersaals analysiert werden. Da manche Theaterspielstätten über mehrere Spielorte innerhalb des Hauses verfügen, wurde zunächst nur der Saal mit der größten Platzkapazität betrachtet. Unter Berücksichtigung aller Theaterspielstätten liegt das arithmetische Mittel bei 722 Sitzplätzen. Das geometrische Mittel dagegen zeigt mit 637 Sitzplätzen durch die geringere Berücksichtigung der Extremwerte eine deutliche Diskrepanz zum arithmetischen Mittel und gibt einen Hinweis auf die Verteilung der Sitzplatzanzahl der Theaterspielstätten. Ein Viertel dieser verfügt mit unter 460 Plätzen über eine eher geringe Zuschauerkapazität. Die Hälfte aller Spielstätten hat weniger als 670 Sitzplätze. Lediglich 25% der Theaterspielstätten weisen mehr als 878 Sitzplätze auf. Dies zeigt, dass nur sehr wenige Theaterspielstätten über sehr große Zuschauersäle verfügen, die meisten Theaterspielstätten dagegen mittlere oder sogar geringe Zuschauerkapazitäten haben.

Dies wird ebenfalls deutlich, wenn eine Sortierung der Theaterspielstätten in Intervallen von 100 Sitzplätzen erfolgt. Der Modus liegt hier bei 22 Theaterspielstätten in der Gruppe von 400 bis 499 Sitzplätzen. Zwischen 14 und 16 Theaterspielstätten können in die 500er, 600er, 700er und 800er Gruppen einsortiert werden. Alle weiteren Gruppen beinhalten weniger als 10 Theaterspielstätten. Somit lassen sich 61,4%, bzw. 81 von 132 Spielstätten in die oben genannten Gruppen von 400 bis 899 Sitzplätzen einordnen.

Gemäß [2.1.3] wird anhand der Rechtsträgerschaft bei staatlich geführten Theatern zwischen Staats-, Stadt-, Landes- oder aber Städtebundtheatern unterschieden. Betrachtet man auch hier die statistische Verteilung, so bilden die Stadttheater den größten Anteil von 58,3% und einer Anzahl von 77 Theatergebäuden, gefolgt von den Staatstheatern, die mit 39 Bauten einen Anteil von 29,5% stellen. Die restlichen Gebäude verteilen sich mit einem Anteil von 6,1%, entsprechend 8 Spielstätten, auf die Landestheater und einem Anteil von 2,3%, bzw. 3 Theaterspielstätten, auf die Städtebundtheater. Bei den verbleibenden 5 Spielstätten ist die Rechtsträgerschaft unklar.

Bringt man die Rechtsträgerschaft des Theaters mit der Platzkapazität in Verbindung, so wird deutlich, dass Staatstheater mit durchschnittlich 954 Sitzplätzen die größte Platzkapazität aufweisen. Städtebund- und Landestheater haben mit durchschnittlich 421, bzw. 430 Sitzplätzen dagegen eine eher geringe Zuschauerkapazität. Im Mittelfeld mit einer durchschnittlichen Zuschauerkapazität von 662 liegen die Stadttheater.

Ebenfalls relevant ist die Betrachtung der nach [2.1.5] in den Gebäuden ansässigen Sparten, da zu erwarten ist, dass bei Mehrspartenhäusern die Auslastung gegenüber Einspartenhäusern größer ist. Im Verhältnis zu den 40 Einspartenhäusern bilden die 92 Mehrspartenhäuser die Mehrheit. Die Zwei-, Drei- und Vierspartenhäuser sind mit 31, 27 und 30 Stück nahezu gleichwertig verbreitet. Dagegen sind Fünfspartenhäuser mit einer Anzahl von 4 Theaterspielstätten eher selten.[46],[57],[95],[97]

Literatur:
[46] Genossenschaft Deutscher Bühnen-Angehöriger (2015)
[57] Hoffmann, H.-C. (1966)
[95] Schmolke, B. (2011)
[97] Schubert, H. (1971)

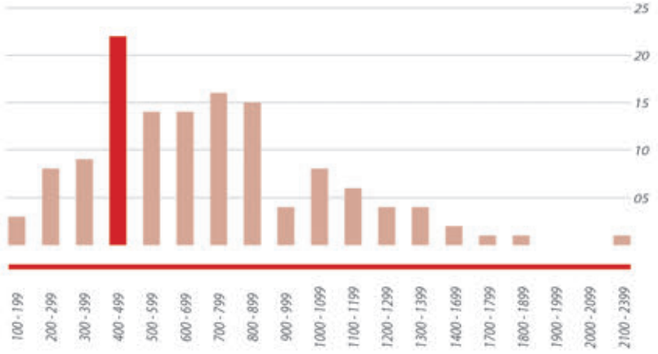

Abb. 13 Anzahl der Theaterspielstätten in Deutschland nach Sitzplatzkapazität in 100er-Schritten

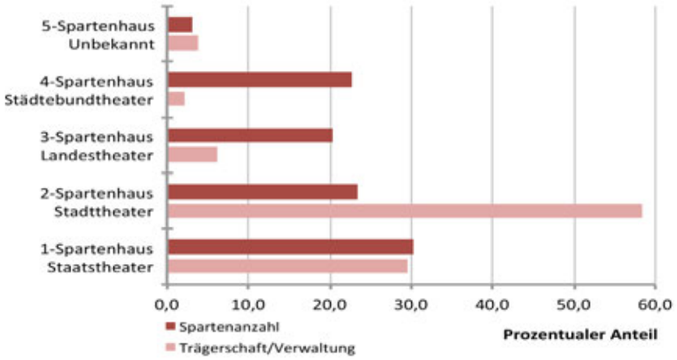

Abb. 14 Anteil der Theaterspielstätten nach Sparten und Organisationsform

2.2.4 Ableitung des Auswahlschemas

Um repräsentative und vergleichbare Werte für die energetischen Kennwerte zu erhalten, wurden zwei Haupt- und drei Nebenkategorien gebildet, aus denen die Auswahl mindestens 12 geeigneter Theaterspielstätten zur Durchführung der Kurzzeitmessungen im Rahmen der Querschnittserhebung erfolgt ist. Nach Analyse des Gebäudebestands zeichneten sich zwei Zeiträume ab, in denen eine große Anzahl der Theaterspielstätten gebaut wurden. Der erste Zeitraum, in dem insgesamt 45 Schauspielstätten und somit 34,1% des Bestandes errichtet worden sind, gruppiert sich um die Jahrhundertwende. In den Jahren von 1890 bis 1919 entstanden pro Jahrzehnt im Schnitt mehr als 10 Theaterspielstätten, wodurch sich dieser Zeitraum deutlich vom Durchschnitt abhebt und unter der Bezeichnung „Baujahresgruppe I“ zusammengefasst wurde. Der zweite Zeitraum, der insgesamt 31 Bauten und 23,5% des Bestandes umfasst, beinhaltet Theaterspielstätten, die um 1960, also in der Nachkriegszeit, errichtet worden sind. Auch hier lässt sich eine Zeitspanne von drei Jahrzehnten definieren, in der mehr als 10 Spielstätten pro Jahrzehnt entstanden sind. Diese Zeitspanne umfasst die Jahre 1950 bis 1979 und wurde als „Baujahresgruppe II“ bezeichnet.

Neben der Einordnung der Spielstätten anhand ihres Baujahrs erfolgte eine weitere Kategorisierung auf Basis der Zuschauerkapazität. Hier wurden die Spielstätten in drei Kategorien eingeordnet. Kategorie I beinhaltet Theaterspielstätten mit Zuschauersälen, die eine geringe Platzkapazität aufweisen. Zur Definition dieser Kategorie erfolgte eine Orientierung am Modus der Platzanzahl in 100er Schritten. In der Gruppierung von 400 bis 499 Sitzplätze sind mit einer Anzahl von 22 die meisten Spielstätten eingeordnet. Aus der Platzanzahl dieser Spielstätten wurde das arithmetische Mittel gebildet, welches bei 452 Sitzplätzen liegt. Anschließend wurde eine prozentuale Abweichung von 20% nach oben und nach unten berechnet, die eine Vergleichbarkeit der Spielstätten ermöglicht. Die Kategorie umfasst somit Spielstätten mit 361 bis 542 Sitzplätzen und deckt 27,3% alle Theaterspielstätten nach [2.1.1] in Deutschland ab. Zur Festlegung von Kategorie II und Kategorie III wurden die Sitzplatzkapazitäten der Bühnen Köln zugrunde gelegt, die ursprünglich für das Intensivmonitoring [siehe 8.] vorgesehen waren. Das Schauspielhaus Köln bildete mit einer Platzanzahl von 833 die Basis für Kategorie II, die Spielstätten mit einer mittleren Sitzplatzkapazität enthält. Wie bereits bei Kategorie I erfolgte die Berechnung einer 20%-igen Abweichung, sodass die Grenzen der Kategorie II bei 666 bis 1000 Sitzplätzen liegen. Insgesamt waren 31,8% der Theaterspielstätten in diese Kategorie einzusortieren. Kategorie III, welche Spielstätten mit einer hohen Platzkapazität umfasst, gruppiert sich um das Opernhaus Köln, das eine Sitzplatzkapazität von 1346 hat. Somit ergeben sich Grenzen der Kategorie unter Berücksichtigung der zulässigen 20%-igen Abweichung bei 1077 und 1615 Sitzplätzen.

Dies beschreibt zunächst eine voneinander unabhängige Betrachtung der Haupt- und Nebenkategorien. Berücksichtigt man sowohl die Baujahresgruppen als auch die Sitzplatzkategorien, so zeigt sich, dass sich die Anzahl der potentiellen Theaterspielstätten in Baujahresgruppe I auf 25,8% reduziert. In der Kategorie I sind 12 Spielstätten, bzw. 9,1% des Bestands einsortiert, während die Kategorie II 17 Bauten, entsprechend 12,9% aller Theaterspielstätten umfasst. Auf Kategorie III entfallen lediglich 5 Spielstätten und somit 3,8% des Bestands. In Baujahresgruppe II resultierte daraus ebenfalls eine Reduktion der potentiellen Theaterspielstätten auf 18,2%. Diese verteilen sich mit jeweils 3,8% und 5 Theaterspielstätten auf Kategorie I und Kategorie III sowie mit 14 Spielstätten und 10,6% auf Kategorie II.[51]

Literatur:
[51] Ham, R. (1987)

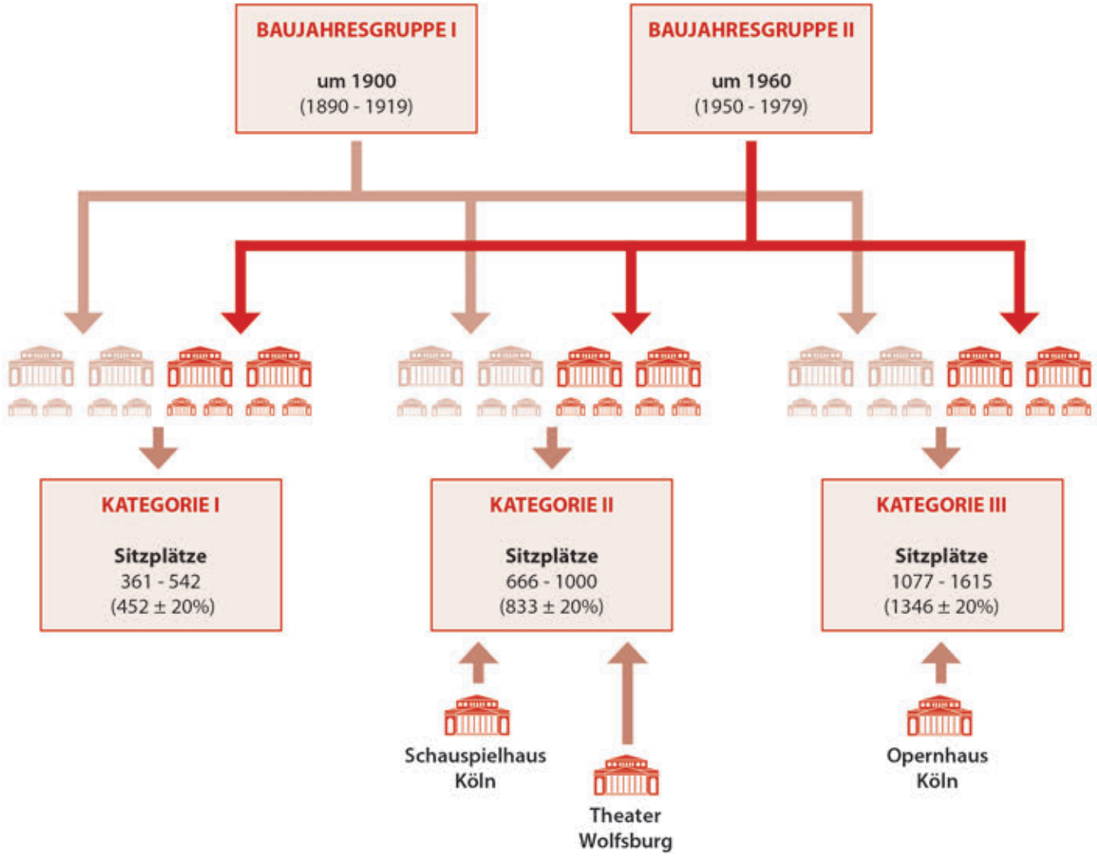

Abb. 15 Auswahlschema für Theaterspielstätten

Querschnittserhebung

3. Vorbereitung und Durchführung der Querschnittserhebung

3.1 Akquise der Theaterspielstätten

Ziel der Querschnittserhebung ist die Analyse von erfassten, repräsentativen Messergebnissen in Bezug auf den Energieverbrauch und den Raumkomfort für die Gebäudetypologie der Theaterspielstätte in Deutschland. In diesem Zuge sollen auch Nutzungsabläufe untersucht und den jeweiligen Nutzungsprofilen aus der DIN V 18599 gegenübergestellt werden. Zur Erreichung dieser Ziele musste zunächst eine repräsentative Anzahl an Theaterspielstätten für eine Teilnahme an der Querschnittserhebung gewonnen werden. Da eine Gegenüberstellung der Daten aus der Querschnittserhebung mit den Ergebnissen des Intensivmonitorings angestrebt war, musste eine gewisse Vergleichbarkeit der Theaterspielstätten vorhanden sein. So wurden bei der Querschnittserhebung nur solche Gebäude berücksichtigt, die per Definition aus [2.1.1] als Theaterspielstätte gelten.

Damit über die Querschnittserhebung belastbare Aussagen zum Gebäudebestands getroffen werden konnten, erschien eine Einbeziehung von etwa 10% der Theaterspielstätten in die Erhebung sinnvoll. Die statistische Erfassung aller relevanten Gebäude zeigte, dass der Bestand 132 Häuser umfasst. Es wurden 13 Theaterspielstätten für eine Untersuchung ausgewählt.

Zur Erzielung repräsentativer Ergebnisse ist jedoch nicht nur die Anzahl der untersuchten Gebäude relevant, sondern auch die Zusammensetzung des Bestands in Hinblick auf Merkmale wie Baujahr und Sitzplatzkapazität. Damit diese ebenfalls bei der Auswahl berücksichtigt werden, wurde unter [2.2.4] ein Schema zu den Auswahlkriterien entwickelt. Dieses gliedert den Bestand in zwei Hauptentstehungszeiträume und drei Sitzplatzkategorien, sodass insgesamt sechs Kategorien definiert wurden. Um einen Vergleich von Theaterspielstätten innerhalb einer Kategorie zu ermöglichen, sollten mindestens zwei Spielstätten je Kategorie zur Untersuchung ausgewählt werden. Damit das Schema also vollständig bearbeitet werden konnte, wurden mindestens zwölf Theaterspielstätten für die Erhebung benötigt.

Zur Akquise der Theaterspielstätten wurden über die Deutsche Bühnentechnische Gesellschaft (DTHG) Kontakte zu den Technischen Leitern der ausgewählten Häuser hergestellt und das Interesse an einer Teilnahme abgefragt. Im Anschluss daran wurden die Theaterspielstätten gebeten, einen Fragebogen auszufüllen, der vom Forschungsteam entwickelt wurde, über den erste Daten zum Gebäude erhoben wurden. Zu den abgefragten Daten gehörten allgemeine Angaben zum Gebäude wie Baujahr, Standort, Flächen und Volumina, aber auch das Vorliegen von Planunterlagen und die Durchführung von Sanierungen. Darüber hinaus wurden die Theaterspielstätten gebeten, auch Kontaktdaten von Ansprechpartnern auf unterschiedlichen Ebenen anzugeben. Es wurden Angaben zur Nutzung abgefragt, die Nutzungszeiten, Anzahl der Sparten und Besucherzahlen umfassten. Weiterhin wurden Daten zur Gebäudetechnik erhoben. Diese schlossen Heizung-, Lüftungs- und Kälteanlagen ebenso wie Anlagen zur Warmwassererzeugung ein. Schließlich wurden auch Energieverbräuche für Strom sowie Heizung und Warmwasser dreier aufeinanderfolgender Jahre aufgenommen. Auf Basis der Angaben aus dem Fragebogen war es möglich, ein erstes, für das Forschungsprojekt relevantes Bild der Theaterspielstätten zu zeichnen.

Nach Auswertung der Daten aus dem Fragebogen wurde ein Begehungstermin durch das Messteam, bestehend aus wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter*innen des Instituts für Technische Gebäudeausrüstung unter Führung von Prof. Dr. Reintsema, vereinbart, um die technischen Gegebenheiten zu prüfen und auf Basis dieser Erkenntnisse das Messkonzept abzustimmen.

Zur rechtlichen Absicherung der Messungen wurde vor Beginn eine Gestattungsvereinbarung zwischen der TH Köln und der jeweiligen Theaterspielstätte unterzeichnet. Diese regelte die Verpflichtung der Theaterspielstätten Räumlichkeiten zur Verfügung zu stellen, die Begehungen für TEK-Tool [siehe 4.2.1]

Abb. 16 Teilnehmende Theaterspielstätten an der Querschnittserhebung

und die Nutzerbefragung zu unterstützen sowie die Durchführung der Raumkomfortmessungen im Zuschauersaal zu gestatten. Im Gegenzug sicherte das Forschungsteam Geheimhaltung bezüglich vertraulich übergebener Informationen und Unterlagen zu. Mit der Gestattungsvereinbarung wurde die Veröffentlichung der Ergebnisse durch das Forschungsteam genehmigt und eine Einigung auf die Abstimmung von Presseerklärungen festgelegt. Eine Haftungsbegrenzung auf vorsätzlich und grob fahrlässig verursachte Schäden wurde einbezogen und die Verpflichtung für die Einhaltung des Brandschutzes auf die Theaterspielstätten übertragen.

Aufgrund der vielen Stufen der Akquise aber auch aus verwaltungstechnischen Gründen war dieser Teil zeitaufwändiger als erwartet. Bei Theaterspielstätten handelt es sich um öffentlich verwaltete Gebäude, die durch das Theater genutzt werden. Dies führt zu Unklarheiten bezüglich der Zuständigkeiten, sodass ein Einverständnis zur Durchführung der Querschnittserhebung auf mehreren Ebenen eingeholt werden musste. Auf den verschiedenen Ebenen bestanden unterschiedlich geprägte Bedenken bezüglich einer Teilnahme, die geklärt werden mussten. Die Intendanten, die für die künstlerische Leitung des Theaters verantwortlich sind, befürchteten häufig eine Beeinträchtigung der Besucher durch den im Zuschauersaal sitzenden Messtorso und die Nutzerbefragung. Sofern bei den Technischen Leitern Vorbehalte bestanden, fokussierten sich diese hauptsächlich auf den Brandschutz. Besondere Sorge galt dabei dem Messtorso, der als unbeweglicher Gegenstand in den Reihen des Zuschauersaals platziert wurde und somit zu einer Blockierung der Fluchtwege hätte führen können. Als Reaktion auf die unterschiedlichen Bedenken wurde der Messtorso funktional angepasst. Hierzu wurde der horizontale Mittelteil entfernt, der auf der Sitzfläche der Theatersessel hätte aufliegen sollen und eine sitzende Position des Messtorsos ermöglicht hätte. Stattdessen wurde der Messtorso in Form einer auf Sitzhöhe reduzierten Röhre vor den hochgeklappten Sitzflächen der Theatersesseln angebracht [siehe 4.1.3.2].

Eine weitere Hürde bestand darin, passende Sitzplätze für den Messtorso zu finden. Da die Karten stets vor Beginn der Spielzeit in den Verkauf gegeben werden, mit der Akquise für die Teilnahme der Spielstätten jedoch erst etwa sechs Monate vor den Messungen begonnen wurde, waren nicht mehr alle Plätze frei verfügbar.

Abb. 17 Fragebogen zur Erhebung von Daten zum Theatergebäude

3.2 Festlegung der Messzeiträume

Die Durchführung der Messungen konnte aus logistischen Gründen nicht in allen Theaterspielstätten gleichzeitig erfolgen. Aufgrund der Vorbereitungszeit für die Messungen, die unter anderem durch den Auf- und Abbau und den damit verbundenen Fahrtzeiten viele Mitarbeiterkapazitäten beanspruchte, sowie des begrenzt zur Verfügung stehenden Messequipments, konnten etwa vier Messungen gleichzeitig durchgeführt werden. Daher wurden die Messungen auf drei Messperioden aufgegliedert.
Um die Messergebnisse aus den unterschiedlichen Theaterspielstätten miteinander vergleichen zu können, mussten die Messperioden ähnliche Bedingungen in Bezug auf Nutzung und Klima aufweisen, da diese Faktoren den Energieverbrauch maßgeblich beeinflussen. Als Zeitpunkt für die Messungen wurden daher die Übergangszeiten Frühling und Herbst gewählt. Die warmen Monate eignen sich nicht für Messungen in Theaterspielstätten, da zu dieser Zeit wegen der Theaterferien größtenteils keine Vorstellungen stattfinden und der Betrieb auch in den übrigen Bereichen eingeschränkt ist. Die kalten Monate wie Dezember und Januar sind für den Theaterbetrieb ebenfalls nur bedingt repräsentativ. Im Dezember ist aufgrund der Weihnachtszeit die Vorstellungsfrequenz erhöht, während über die Weihnachtsfeiertage und nach Neujahr unter Umständen nur eingeschränkt Vorstellungen stattfinden. Die Übergangszeiten Frühjahr und Herbst eigneten sich dagegen am besten zur Durchführung der Messungen, da zu dieser Zeit ein üblicher Theaterbetrieb stattfindet. Dies lässt sich auch am Jahresgang des Stromverbrauchs nachvollziehen [siehe 5.3.2.1].
Auf Ebene der Gebäudetechnik stellte die Übergangszeit eine besondere Herausforderung dar: Innerhalb des Tagesgangs können starke Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen auftreten, die sich besonders auf die Lüftung des Gebäudes auswirken. Die gegenüber dem Winterfall höhere relative Feuchte in Kombination mit der höheren Temperatur der Außenluft führt dazu, dass sie weniger Feuchtigkeit aus der Raumluft aufnehmen kann. Um dennoch ein angenehmes Innenraumklima zu gewährleisten, muss die Gebäudetechnik sensibel auf die Schwankungen reagieren.
Die Messungen wurden im Oktober/November 2016, März/April 2017 und Oktober/November 2017 durchgeführt.[115]

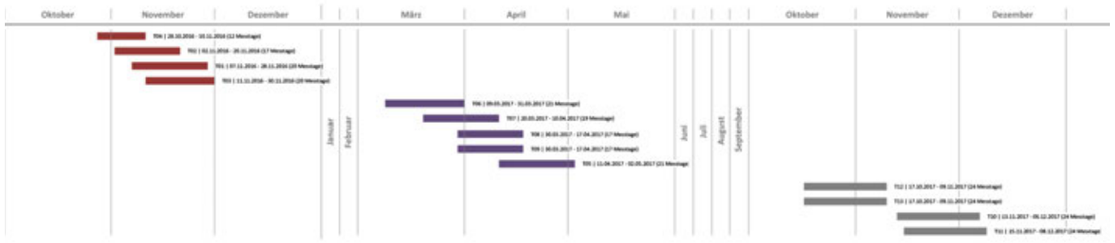

Abb. 18 Messzeiträume für die Querschnittserhebung

3.3 Dauer der Messzeiträume

Neben der Wahl der Zeiträume für die Messungen im Rahmen der Querschnittserhebung ist auch die Dauer der Erhebung für die Aussagekraft der Ergebnisse entscheidend. Zur Bildung von Energiekennwerten wird der Energieverbrauch über ein gesamtes Jahr benötigt. Da im Rahmen der Querschnittserhebung Messungen über einen so langen Zeitraum nicht durchführbar sind, finden stattdessen Kurzzeitmessungen statt. Die Dauer der Kurzzeitmessungen muss dabei so definiert werden, dass eine Hochrechnung des Energieverbrauchs auf ein ganzes Jahr möglich ist.
Mit der Hochrechnung von Energieverbräuchen aus Kurzzeitmessungen hat sich das Fraunhofer ISE in einem Forschungsprojekt auseinandergesetzt und hierfür ein Prognosetool entwickelt. Als Kurzzeitmessungen werden alle Messwerte definiert, die nicht für ein volles Jahr vorliegen und daher eine Hochrechnung erfordern. Je länger der Zeitraum ist, für den Messwerte vorliegen, desto genauer sind Hochrechnungen möglich. Als Mindestmesszeitrum werden zwei bis vier Wochen genannt.
Auch die VDI 3807 befasst sich mit der Bildung von Verbrauchskennwerten, wozu auch die Bereinigung der erfassten Daten zählt, was in der VDI 4710 genauer beschrieben ist. Beide Richtlinien erwähnen einen üblichen Bezugszeitraum für Energiemessungen von einem Jahr. Sofern die Daten nicht als Werte über das gesamte Jahr vorliegen, werden in der VDI 3807 zwei Möglichkeiten zur Bereinigung der Daten aufgeführt, aus denen sich Hinweise zur Mindestdauer des Messzeitraums ableiten lassen. Zur Durchführung einer außentemperaturabhängigen Bereinigung wird ein Messzeitraum empfohlen, der mindestens 400 Kd (Wärmesumme in Kelvintagen) beinhaltet. Da es sich bei Gradtagen um eine klimaabhängige Größe handelt, wird durch diese Angabe lediglich ein variabler Zeitraum festgelegt. Genauere Aussagen diesbezüglich trifft die VDI 4710 Blatt 2. Hier wird erwähnt, dass bei Anwendung des Gradtagverfahrens die Messdauer von einem Monat nicht unterschritten werden sollte. Sofern der Heizenergieverbrauch direkt mit den Außentemperaturen in Beziehung gesetzt wird, darf die Messdauer maximal auf eine Woche verringert werden. Ist es nicht notwendig, eine außentemperaturabhängige Bereinigung durchzuführen, da die Daten klimaunabhängig sind, besteht die Möglichkeit einer zeitlichen Bereinigung. Hier wird keine konkrete Aussage zur Länge des notwendigen Messzeitraums getroffen. Es wird lediglich angeführt, dass der betrachtete Zeitraum für den Jahresverbrauch als repräsentativ anzusehen sein muss.
Um die Durchführbarkeit der Querschnittserhebung zu gewährleisten, wurde ein Messzeitraum von drei Wochen angesetzt, in den aber mindestens drei Wochenenden inkludiert sein sollten. Dies liegt darin begründet, dass Theaterspielstätten im Gegensatz zu anderen Gebäudetypologien, wie beispielsweise Verwaltungsgebäuden oder Schulen, kein regelmäßiges Energieverbrauchsprofil aufweisen, welches sich klar in Wochentage und Wochenende gliedern lässt. Stattdessen wird der Energieverbrauch von Theaterspielstätten stark durch die Vorstellungszeiten beeinflusst. Für die Wahl eines repräsentativen Messzeitraums war es daher erforderlich, dass dieser einige Vorstellungstage enthält. Eine Möglichkeit Vorstellungstage in den Messzeitraum zu integrieren, war die stärkere Einbindung von Wochenenden, da hier eine höhere Vorstellungsdichte zu erwarten ist.[63],[66],[104],[105]

Literatur:
[63] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2014)
[66] Jacob, D.; Herkel, S. (2013)
[104] Verein deutscher Ingenieure e.V. (2007)
[105] Verein deutscher Ingenieure e.V. (2013)
[115] Wosnitza, F.; Hilgers H. (2012)

4. Werkzeuge zur Beurteilung des Energieverbrauchs und Raumkomforts

4.1 Messungen

4.1.1 Erfassung der Wetterdaten

Der Energieverbrauch eines Gebäudes wird vom Außenklima beeinflusst, da aufgrund physikalischer Prozesse eine natürliche Interaktion des Gebäudes mit der Umgebung stattfindet. Wetterdaten werden oftmals als Eingangsgrößen für die Regelung gebäudetechnischer Anlagen verwendet. Zur Analyse möglicher Wechselwirkungen von Energieverbrauch und Innenraumklima erfolgt während des Messzeitraums daher auch die Aufnahme von Klimaelementen am Gebäudestandort. Die nach dem „Messleitfaden EnOB / EnEff:Stadt – Neuer gemeinsamer Messleitfaden für Demonstrationsvorhaben im Bereich ‚Energie in Gebäuden und Quartieren'", der durch die wissenschaftliche Begleitforschung „Energiewende bauen" entwickelt wurde, zu erfassenden Klimaelemente sind Globalstrahlung, Außenlufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Luftfeuchtigkeit. Da während einer Querschnittserhebung nur Gesamtenergieverbräuche erfasst werden und daher keine tiefgreifende Analyse möglich ist, werden nur die Klimaelemente berücksichtigt, durch die der größte Einfluss auf den Energieverbrauch zu erwarten ist.

Den stärksten Einfluss auf den Energieverbrauch von Gebäuden übt in unseren Breitengraden die Außenlufttemperatur aus, weshalb diese am häufigsten als Regelungsparameter für gebäudetechnische Anlagen angewendet wird. Sie ist abhängig von der solaren Einstrahlung sowie der Temperatur zufließender Luftmassen und unterliegt tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. Die Differenz zwischen Außenlufttemperatur und der Solltemperatur der Raumluft bestimmt maßgeblich die Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste, die im Winterfall durch die Beheizung ausgeglichen werden müssen. Um eine Vergleichbarkeit des Energieverbrauchs von Gebäuden an unterschiedlichen Standorten herbeizuführen, wird die Außenlufttemperatur zur Klimabereinigung des Heizenergieverbrauchs herangezogen, indem diese ins

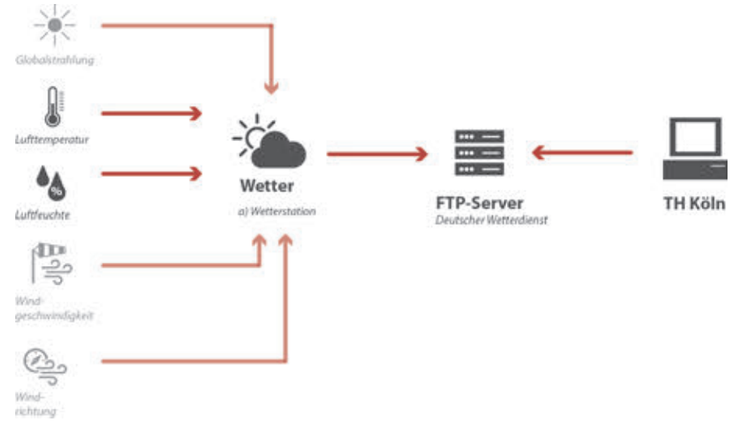

Abb. 19 Erfassung der Wetterdaten

Verhältnis mit einem Referenzklima gesetzt wird.

In Gebäuden wie Theaterspielstätten, bei denen die Frischluftzufuhr bei einem großen Teil der Räume durch mechanische Lüftungsanlagen erfolgt, spielt die Be- und Entfeuchtung der Zuluft eine große Rolle. Die Notwendigkeit hierfür leitet sich aus der Luftfeuchte der Außenluft ab, welche die Menge des in der Luft mitgeführten Wassers in Form von Dampf beschreibt. Zur Beschreibung dieses Klimaelements wird zwischen absoluter und relativer Luftfeuchte unterschieden. Die absolute Luftfeuchte ist durch Niederschläge und die Nähe zu Gewässern standortspezifisch geprägt und zeigt im Tagesgang nur geringe Schwankungen. Die relative Luftfeuchte dagegen beschreibt das Verhältnis der absoluten Feuchte im Verhältnis zur Sättigungsfeuchte, welche wiederum in Abhängigkeit zur Lufttemperatur steht, da warme Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann als kalte.

Im Messleitfaden werden Messungen der Klimaelemente auf dem Grundstück präferiert. Alternativ wird aber auch die Möglichkeit der Beschaffung der Wetterdaten über das Wetteramt für die nächstgelegene Wetterstation eingeräumt. Im Rahmen der Querschnittserhebung werden nur für die Dauer von wenigen Wochen Daten erhoben, sodass die Installation einer Wetterstation auf dem jeweiligen Grundstück wirtschaftlich nicht abbildbar ist. Daher wurden die Wetterdaten über den Deutschen Wetterdienst bezogen. Zu diesem Zweck erfolgte anhand der Stationskarte die Auswahl der Wetterstation, die der Theaterspielstätte die Nächstgelegene war. In stündlicher Auflösung werden die Wetterdaten vom Deutschen Wetterdienst kostenfrei zur Verfügung gestellt und können als CSV-Datei heruntergeladen werden. Da es sich bei den Messwerten um eine viertelstündige Auflösung handelt, erfolgte zur weiteren Nutzung der Daten eine Interpolation.[26],[45],[52],[110]

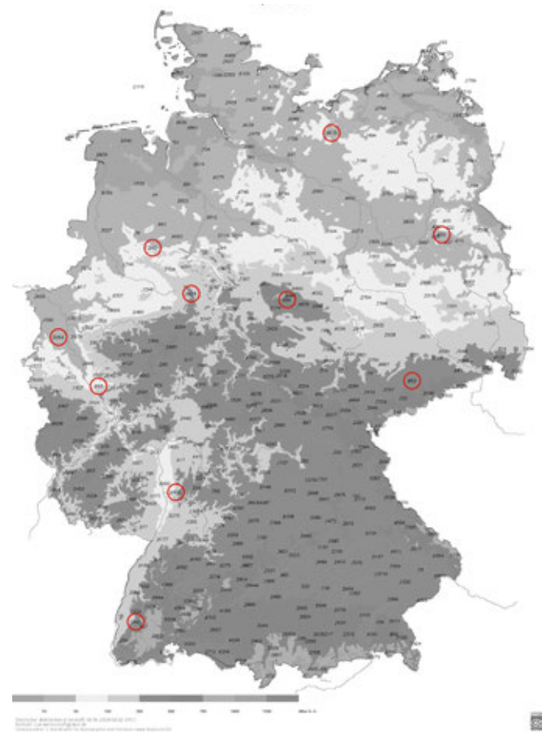

Abb. 20 Überblick über die Wetterstationen des Deutschen Wetterdiensts

Literatur:
[26] Deutscher Wetterdienst (2018a)
[45] Fraunhofer Institut für Bauphysik (2017)
[52] Hausladen, G., Liedl, P., de Saldanha, M. (2012)
[110] Voss, K. et al. (2016)

4.1.2 Basismesskonzept zur Erfassung der Energieströme

4.1.2.1 Erfasste Energiestöme

Ziel der Querschnittserhebung ist die Ermittlung energetischer Kennwerte für die behandelte Gebäudetypologie. Neben einem Überblick über die Höhe des Gesamtenergieverbrauchs dieses Gebäudetypus, können so Theaterspielstätten zukünftig anhand ihrer Energieeffizienz kategorisiert werden.
Des Weiteren kann ein Abgleich der messtechnisch ermittelten energetischen Kennwerte mit den Zielwerten aus der „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ erfolgen. Diese enthält sowohl für den Stromverbrauch als auch für den Verbrauch von Heizung und Warmwasser spezifische Kennwerte. In Anlehnung an die dort enthaltenen Kennwerte erfolgen bei der Querschnittserhebung lediglich Messungen dieser Gesamtenergieverbräuche auf Stufe der Endenergie. Die Beurteilung des Energieverbrauchs in einzelnen Nutzungszonen des Theaters oder einzelnen Verbrauchern ist über die Messungen nicht möglich. Über Berechnungen mit dem Bilanzierungswerkzeug TEK-Tool kann jedoch eine solche Aufteilung rechnerisch vorgenommen werden.
Zusätzlich zu der Bewertung auf endenergetischer Stufe ist eine Beurteilung des primärenergetischen Verbrauchs möglich: Indem eine Multiplikation der endenergetischen Kennwerte mit den jeweiligen Primärenergiefaktoren erfolgt, die bei den Energieversorgern abrufbar sind, können Aussagen zur Umweltbelastung getroffen werden.

4.1.2.2 Entwicklung des technischen Konzepts

Vor Beginn der Messungen erfolgte zur Entwicklung eines übergeordneten Messkonzepts, das auf unterschiedliche Gegebenheiten flexibel angepasst werden kann, eine Begehung der Theaterspielstätten. Die Anforderungen an das Messkonzept beinhalten aufgrund des geringen Messzeitraums die Möglichkeit einer schnellen, zerstörungsfreien und vollständig reversiblen Installation. Da bei der Querschnittserhebung nur die Gesamtenergieverbräuche für Strom und Heizung/ Warmwasser erfasst werden müssen, sind insgesamt zwei Messstellen notwendig.
Zur Erfassung des Stromverbrauchs kommen je nach vorhandener Situation vier unterschiedliche Möglichkeiten zur Anwendung. Sofern eine Erfassung der Lastgänge durch das Energieversorgungsunternehmen (EVU) erfolgte, wurden, an Stelle der Durchführung von Messungen, die Daten über die Spielstätte beim EVU abgefragt. Falls kein auslesbarer Zähler vorhanden war, wurden Rogowskispulen (Kabelumbau-Stromwandler; 60A/1A, Wago Kontakttechnik GmbH&Co. KG) mit zugehöriger Messeinrichtung iEM3555 (Schneider Electric) installiert. Rogowskispulen bestehen aus einem Leiterdraht, der gleichmäßig um einen festen Körper aus nicht ferromagnetischem Material gewickelt ist. Die so entstandene Spule wird um einen stromführenden Leiter gelegt. Der durch den Leiter fließende Wechselstrom erzeugt ein Magnetfeld, das in der Rogowskispule eine Spannung induziert, die wiederum erfasst und umgerechnet wird.
Bei Vorhandenseins eines digitalen Zählers wurde ein Impulszähler (OP-410, German Metering, GmbH) installiert. Dieser erfasst die Häufigkeit des Aufleuchtens einer LED-Lampe am Zähler während eines definierten Zeitintervalls. Da dieses in Abhängigkeit zu einer zählerspezifischen Verbrauchsmenge steht, kann über die Häufigkeit des Aufleuchtens der Energieverbrauch berechnet werden.
Die vierte Möglichkeit kommt bei analogen Ferraris-Zählern zum Tragen. Hierbei wird auf das Display eine EnergyCam (Fast EnergyCam 1003, Fast Forward AG) aufgebracht, die automatisch eine Fotoauswertung des Zählerstands über OCR Erkennung durchführt.
Um die Wärmeenergie für Heizung und Warmwasser zu erfassen, wurde auf Ultraschallmessgeräte (T550 Durchflusssensor, Landis+Gyr) zurückgegriffen. Diese messen sowohl den Volumenstrom des zirkulierenden Mediums über einen Durchflussmesser als auch die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf über einen Temperaturfühler und ermitteln daraus rechnerisch die verbrauchte Wärmeenergie. Weitere Erfassungsmöglichkeiten waren nicht vorgesehen.
Beide Messstellen wurden mittels Modbus an einen zentralen Datenlogger (Com‘X 510, Schneider Electric) angebunden. Dieser erfasste und speicherte im Viertelstundentakt die gemessenen Verbrauchsdaten. Von dort aus wurden die Messdaten über UMTS an ein FTP-Laufwerk, wahlweise im 12- oder 24-Stundenrythmus, übermittelt. Die einzelnen Rohdatenpakete im CSV-Format wurden zur weiteren Bearbeitung über einen Batch zusammengefügt. Anschließend wurden sie formatiert sowie auf Vollständigkeit (u.a. Vergleich der Zeit-Werte) und Plausibilität (Bildung von Mittelwerten, Darstellung in Charts) überprüft, bevor sie zur Auswertung genutzt wurden.[19],[43],[48]

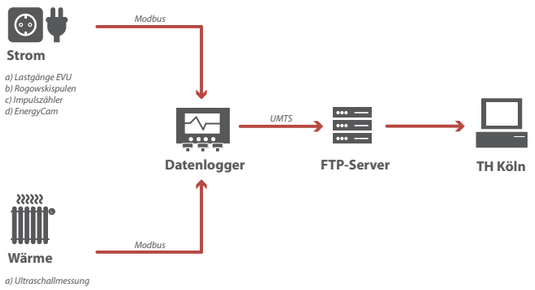

Abb. 21 Messung der Energieströme in den einzelnen Theaterspielstätten

Theater-spielstätte	Strom				Wärme	
	EVU	Rogowski-wandler	Impuls-zähler	Energy-Cam	Ultraschall-messung	Sonder-fall
T01			x		x	
T02			x			x[1]
T03		x				
T04				x		
T05	x				x	
T06	x					
T07	x					x[2]
T08	x				x	
T09	x				x	
T10	x					x[3]
T11	x				x	
T12	x				x	
T13	x				x	

[1] Wärmemengenaufzeichnung über EVU - wurde bisher nicht zur Verfügung gestellt
[2] Anbringung einer EnergyCam an den Gaszähler
[3] Wärmemengenaufzeichnung über EVU

Abb. 22 Datenerfassung in den Theaterspielstätten während der Querschnittserhebung

Literatur:
[19] Cosinus Messtechnik GmbH (2018)
[43] Fast Forward (2015)
[48] German Metering GmbH (2011)

4.1.3 Messtechnische Erfassung des Raumkomforts auf Nutzerebene

4.1.3.1 Behaglichkeit und Raumkomfort

Der Besuch des Theaters stellt ein besonderes kulturelles Freizeitereignis dar, an dessen Gelingen sowohl das Theater selbst als auch der Theaterbesucher ein großes Interesse haben. Während das Theater daran interessiert ist, einen Besucherstamm aufrechtzuerhalten oder neue Theaterfreunde zu gewinnen, möchte der Theaterbesucher in seiner Freizeit unterhalten werden. Folglich sind beide Interessengruppen auf eine angenehme und komfortable Gestaltung des Theaterbesuchs ausgerichtet. Hierzu zählt zum einen eine gelungene künstlerische Inszenierung und zum anderen die Schaffung von komfortablen Aufenthaltsbedingungen im Zuschauersaal, um den Theaterbesuch ungestört genießen zu können. Das Komfortempfinden des Menschen ist stark vom Raumklima abhängig, welches durch die Faktoren Raumakustik, Beleuchtung, Luftqualität und thermischer Komfort bestimmt wird.

Während bei Theaterspielstätten die Beleuchtung als künstlerisches Mittel eingesetzt wird und die Akustik von der Gestaltung des Saals sowie der installierten Tontechnik abhängig ist, können Luftqualität und thermischer Komfort durch die Gebäudetechnik, vor allem die Lüftungsanlage, beeinflusst werden. Die Luftqualität lässt sich über das Maß an Verunreinigung, wie beispielsweise CO_2-Konzentration oder Gerüche, sowie über die relative Luftfeuchte bestimmen. Befinden sich beide Werte im Zuschauerraum nicht in einem für den Zuschauer behaglichen und gesunden Rahmen, so kann dies beispielweise ein Zeichen dafür sein, dass die Luftwechselraten erhöht werden müssen, um ausreichend hygienisch frische Luft in den Theatersaal einzubringen.

Im Gegensatz zur Luftqualität ist der thermische Komfort schwieriger zu bewerten, da er stark vom individuellen Empfinden des Theaterbesuchers abhängig ist. Der thermische Komfort ist dann gegeben, wenn sich der Körper mit der Umgebung im thermischen Gleichgewicht befindet. Dies bedeutet, dass der Körper so viel Energie an die Umgebung abgeben kann wie er selbst erzeugt. Bei diesem Prozess spielen nicht nur physikalische, sondern auch physiologische und psychische sowie intermediäre Faktoren eine Rolle. Diese Faktoren, wie z.B. Alter, Geschlecht und körperliche Verfassung auf der physiologischen Seite und Tätigkeitsgrad, Kleidung und Tages- sowie Jahresrhythmus auf der psychischen, intermediären Seite, sind personenabhängig und führen dazu, dass lediglich Komfortbereiche definiert werden können, in denen sich die physikalischen Faktoren, wie Strahlungs- und Lufttemperatur, Luftbewegung und die relative Luftfeuchte bewegen sollten. Stimmt der raumklimatische Zustand im Theatersaal nicht mit den Komfortbereichen überein, sollten Anpassungen in den Einstellungen oder Ausstattung der Gebäudetechnik vorgenommen werden.

Zur Überprüfung der Luftqualität sowie des thermischen Komforts im Zuschauersaal wurden in dem Forschungsprojekt Messtorsi eingesetzt, die den Raumzustand messtechnisch erfasst haben. Von besonderer Bedeutung ist hier, dass der Einsatz der Messtorsi auf Nutzerebene erfolgt ist, denn nur so kann das vom Zuschauer unmittelbar erlebte Raumklima realitätsgetreu erfasst und bewertet werden.[32][110]

Literatur:
[32] DIN Deutsches Indtitut für Normung e.V. (2006)
[110] Voss, K. et al. (2016)

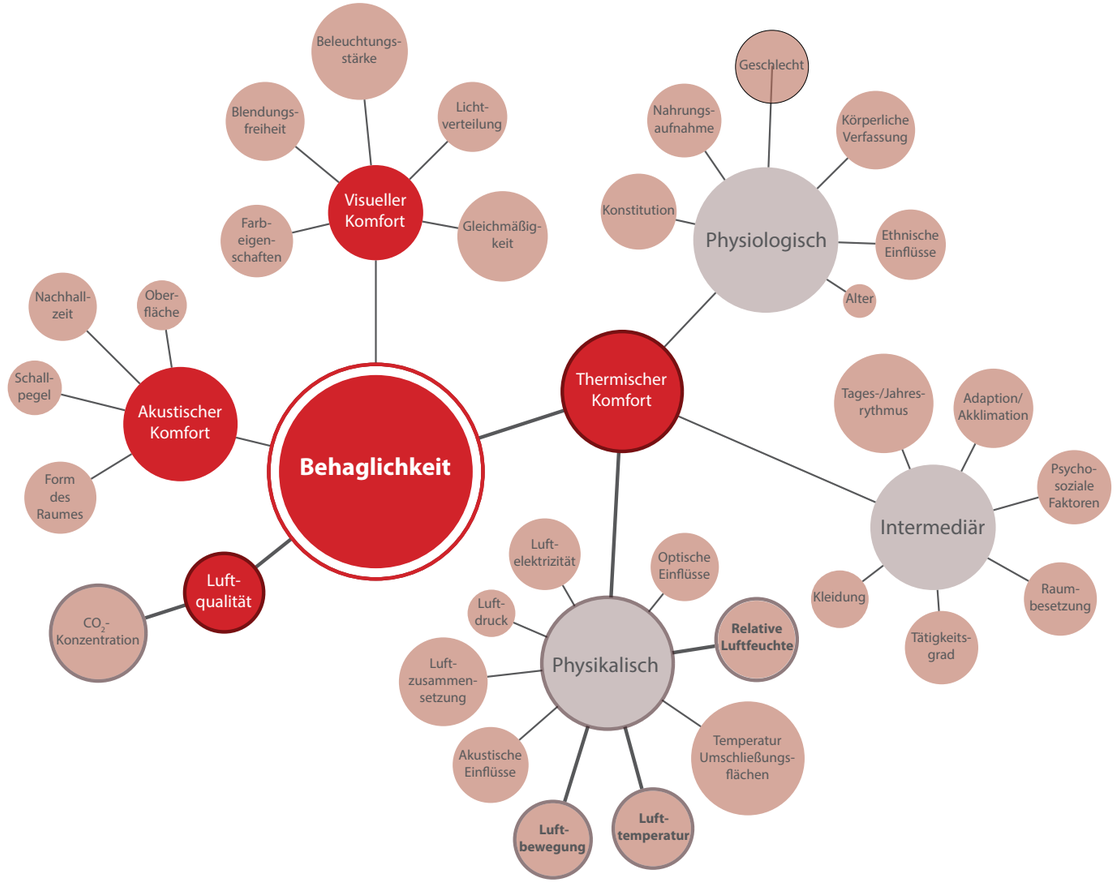

Abb. 23 Einflussfaktoren auf die Behaglichkeit

4.1.3.2 Gestalterisches Konzept des Messtorsos

Der Messtorso, der im Zuge des Forschungsprojekts Daten zum Raumkomfort in Nutzerebene erfasst, wurde eigens an der TH Köln entwickelt, um auf die speziellen Anforderungen reagieren zu können. Durch die Messungen auf der Nutzerebene befindet sich der Messtorso in direktem Kontakt mit den Theaterbesuchern, weshalb er neben den messtechnischen Anforderungen einen hohen Gestaltungsanspruch erfüllen muss, um Akzeptanz der Nutzer zu erzielen. Zusätzlich ist es erforderlich, dass der Messtorso einen hohen Grad an Flexibilität aufweist, damit er schnell und einfach in verschiedenen Positionen und an unterschiedlichen Orten in den Spielstätten platziert werden kann.
Um eine gestalterisch ansprechende Lösung zu finden, wurde unter den Masterstudierenden der TH Köln, Fachbereich Architektur, ein studentischer Realisierungswettbewerb ausgelobt. Eine Jury aus Mitgliedern der TH, Vertretern der Bühnen der Stadt Köln und der Gebäudewirtschaft der Stadt Köln kürten das Projekt „Torsion“ von den Studierenden Michael Lautwein und Max Salzberger zum Sieger.
Die zurücknehmende Gestaltung ließ eine behutsame Einfügung in die Umgebung erwarten, sodass ein störungsfreier Ablauf des Spielbetriebs während der Messungen gewährleistet werden konnte. Der Messtorso besteht aus drei zusammensteckbaren Holzröhren mit einer Oberfläche aus Ahornfurnier, die geölt worden ist. Die Abmessung der Röhren leiten sich aus den Proportionen des menschlichen Körpers ab, sodass die Messungen genau auf der menschlichen Nutzerebene erfolgen konnten. Die Zusammensteckbarkeit der Röhren über einen Bajonettverschluss, die einen ursprünglich angedachten Drehmechanismus ersetzt, aus dem der Name „Torsion“ hergeleitet ist, ermöglicht drei unterschiedliche Positionen des Messtorsos: Im stehenden Zustand werden alle drei Röhren miteinander verbunden. So erreicht der Messtorso eine Größe von 1,77m und kann beispielsweise in Foyers oder Probebühnen platziert werden. Zur Sicherung der Standfestigkeit wird eine Stahlplatte unter seinem Fuß verschraubt, die seine Standfläche vergrößert. Um den Messtorso in einer Sitzhöhe von 1,26m aufzustellen, gibt es zwei Varianten. Zum einen ist es möglich, durch die versetzte Verschraubung der drei Röhren eine tatsächliche Sitzposition nachzustellen. Dies führt jedoch aufgrund des Röhrendurchmessers von 25cm, der mehr Platz beansprucht als ein menschliches Bein, wegen der knappen Reihenabständen in Theatersälen oftmals zu einer Beeinträchtigung des Fluchtwegs. Deshalb kann zum anderen der mittlere Teil, der keine Messtechnik enthält, ausgebaut werden, sodass der Messtorso zwar seine Höhe beibehält, jedoch weniger Platz in der Tiefe benötigt. Durch den Ausbau der Sitzfläche des Theatersessels kann der Messtorso zwischen den Armlehnen aufgebaut werden und ragt nicht in den

Abb. 24 Messfigur „Torsion“

Fluchtweg hinein. Zur Ausrichtung des Messtorsos sind unter seinem Fuß kleine Stellfüße angebracht.
Die Gestaltung aller drei Röhren unterscheidet sich in Abhängigkeit der Funktion für die Messungen: Die obere Röhre erfüllt im Kopfbereich die Anforderungen zur Messung der Luftgeschwindigkeiten. Um die Messungen möglichst geringfügig zu beeinträchtigen, gleichzeitig die empfindliche Messtechnik zu schützen und auch zur Minimierung der Sichtbehinderung im Theaterraum ist der Kopf als Metallgestänge ausgeführt. Im Brustbereich wurde die Röhre perforiert, um eine Belüftung des Micro-PC’s zu gewährleisten und diesen somit vor Überhitzung zu schützen. Damit der Einbau der Messtechnik ermöglicht werden konnte, wurde die Röhre so ausgeführt, dass sie halbseitig geöffnet werden kann. Die mittlere Röhre ist dagegen komplett geschlossen, da sie keine Messtechnik enthält und lediglich zur Kabelführung dient. Die untere Röhre gleicht der oberen, da auch im Fußbereich eine Messung der Luftgeschwindigkeit erfolgt.
Da insgesamt vier Messtorsi gebaut wurden, damit parallele Messungen bei der Querschnittserhebung möglich waren, ist zur besseren Unterscheidung bei der Vorbereitung sowie beim Datentransfer eine Namensgebung erfolgt. Diese erleichterte es auch den Theaterspielstätten die im Zuschauerraum sitzenden Messtorsi in der Presse anzukündigen und dient außerdem der Erhöhung der Identifikation mit dem Projekt.
Passend zu Thema Theater wurden von den Entwerfern die Namen der deutschen Dichter Johann Wolfgang (Goethe), Johann Christoph Friedrich (Schiller), Gotthold Ephraim (Lessing) und Bernd Heinrich Willhelm (von Kleist) ausgewählt. Diese wurden jeweils im unteren Kopfbereich sichtbar angebracht.

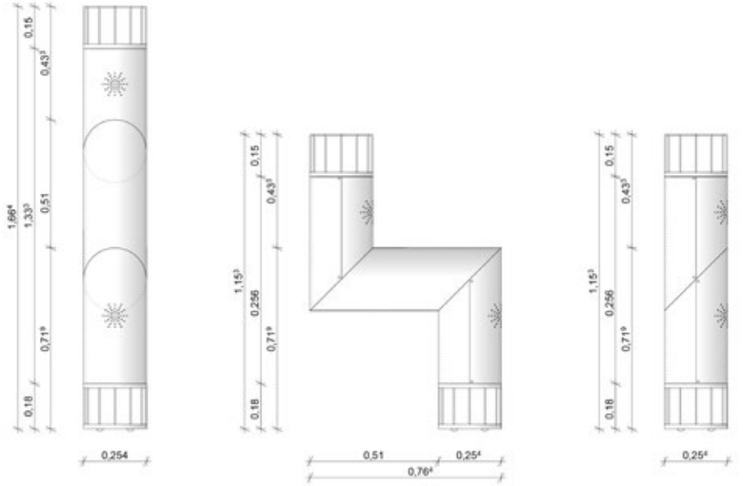

Abb. 25 Aufbaumöglichkeiten des Messtorsos

4.1.3.3 Technisches Konzept des Messtorsos

Ziel des Einsatzes des Messtorsos ist die Messung mit anschließender Bewertung der Luftqualität sowie des thermischen Komforts in den Zuschauersälen in Nutzerebene. Die Luftqualität ist über das Maß an Verunreinigung [siehe 4.1.3.1] zu bestimmen. In geschlossenen Räumen mit hoher Personenbelegung, die nur mechanisch belüftet werden, ist besonders die CO_2-Konzentration relevant. Durch die Messung der CO_2-Konzentration und der Gegenüberstellung mit den empfohlenen Anforderungswerten aus der DIN EN 15251 [siehe 5.5.1.1] soll bestimmt werden, ob die gewünschte Luftqualität erreicht wird und die Belüftung somit ausreichend ist. Zur Bestimmung der CO_2-Konzentration wurde ein Messgerät (Bappu Vocoo, ELK GmbH) gewählt, welches das Messverfahren der Nicht Dispersiven Infrarot Spektronomie (NDIR) verwendet und in einem Messbereich zwischen 0 und 10.000 ppm über eine Genauigkeit von ± 75 ppm, bzw. einer Abweichung von ± 5% vom Messwert verfügt.
Die Bewertung des thermischen Komforts ist über verschiedene physikalische Faktoren möglich. Aus DIN EN 7730 und der von P.O. Fanger entwickelten Formel [siehe 5.5.1.2], die diese Faktoren miteinander in Beziehung setzt, geht hervor, dass Luft- und Strahlungstemperatur, Luftbewegung sowie relative Luftfeuchte zur Beurteilung des thermischen Empfindens notwendig sind. Mit Ausnahme der Strahlungstemperatur, die nur bei einer signifikanten Abweichung von der Lufttemperatur berücksichtigt werden muss, sollen diese Faktoren durch den Messtorso erfasst werden.
Bei der Auswahl geeigneter Sensoren zur Erfassung dieser Klimagrößen wurden die Mindestanforderungen bezüglich Messbereich und –genauigkeit aus DIN EN 7726 zu Grunde gelegt. Die Messung der Temperatur sowie der relativen Feuchte erfolgte über einen digitalen

Messwert	Gültigkeitsbereich	Toleranz
CO_2-Konzentration	0 ppm bis 10.000 ppm	± 75 ppm ± 5% vom Messwert
Lufttemperatur	0 °C bis 60 °C	± 0,2 °C
Relative Feuchte	0 % bis 100 %	± 1,8 %
Luftgeschwindigkeit	0 m/s bis 5 m/s	± 10 % vom Messwert

Abb. 26 Messtoleranzen der verwendeten Sensoren

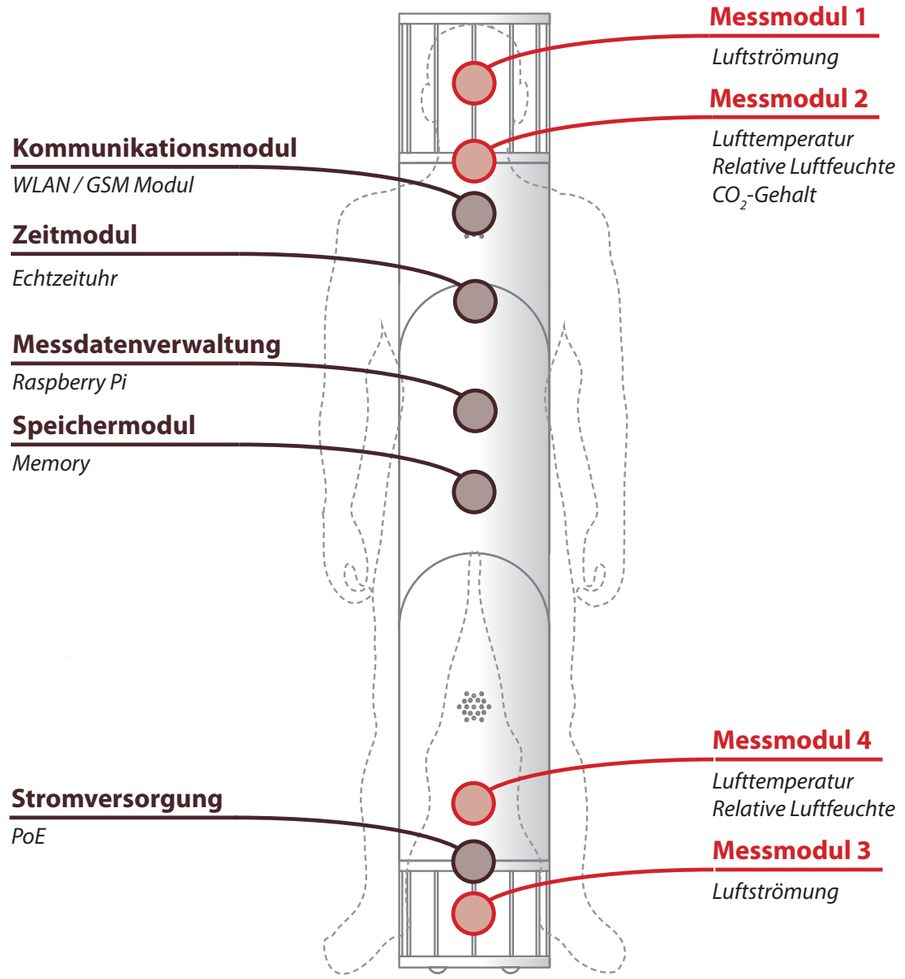

Abb. 27 Schematische Darstellung des technischen Konzepts des Messtorsos

Feuchtesensor (HYT-939, B+B Thermo-Technik). Während die Temperatur mithilfe des PTAT-Messprinzips erfasst wurde und bei einem Messbereich von 0 bis 60°C eine Genauigkeit von ± 0,2°C erreicht hat, wurde die relative Luftfeuchte über einen kapazitiven Polymer Feuchtigkeitssensor bestimmt, der im Bereich von 0 bis 100% relativer Luftfeuchte eine Messgenauigkeit von ± 1,8% besitzt. Um die Luftgeschwindigkeit zu erfassen, wurde ein Anemometer (Bappu evo, ELK GmbH) mit thermoelektrischen Messprinzip verwendet, welches im Bereich von 0 bis 5 m/s eine Toleranz von ± 10% vom Messwert aufweist.

Die Positionierung der ausgewählten Messsensoren wurde sich sowohl aus Festlegungen, die vor allem bezüglich der Höhe in der DIN EN 7726 getroffen werden, als auch anhand der Beschreibungen, die in der DIN EN 7730 zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit zu finden sind, bestimmt. Neben der gesamtthermischen Empfindung wird dort die Bestimmung der lokalen thermischen Unbehaglichkeit beschrieben. Zur Bewertung des vertikalen Temperaturunterschieds sowie des Zugluftempfindens sind Messstellen in Höhe des Kopfes und des Fußgelenks notwendig. Beiden Körperstellen sind in der DIN EN 7726 Messhöhen zugeordnet. Da in der DIN zwischen Personen im sitzenden und stehenden Zustand unterschieden wird, sind für die Kopfhöhe zwei Werte definiert. Während die Messhöhe im stehenden Zustand 1,7m beträgt, ist diese im sitzenden Zustand auf 1,1m festgelegt. Die Knöchelhöhe ist sowohl im stehenden als auch im sitzenden Zustand auf 0,1m festgelegt.

Zur Strukturierung der erfassten Datenpakete wurden die einzelnen Sensoren unter Messmodulen zusammengefasst. Messmodul 01 und Messmodul 03 beinhalten jeweils die Sensoren zur Erfassung der Luftgeschwindigkeit, während in den Messmodulen 02 und 04 die Sensoren zur Messung der Lufttemperatur sowie der relativen Feuchte untergebracht wurden. Messmodul 02 umfasst zusätzlich den Sensor zur Ermittlung der CO_2-Konzentration. Aufgrund der Höhenangaben wurden Messmodul 01, und Messmodul 02 im Kopfbereich installiert. Messmodul 03 und Messmodul 04 befinden sich dagegen im Knöchelbereich.

Alle Daten wurden in 15-minütigen Abständen erfasst und in einem Bordcomputer zusammengefasst, der in der obersten Röhre des Messtorsos untergebracht ist. Der Bordcomputer überprüft die Daten, reiht sie aneinander und speichert sie. Sofern eine Internetverbindung über UMTS oder WLAN bestand, wurden die gesammelten Daten in Form einer csv-Datei täglich an eine Datenbank übertragen. Ist diese Möglichkeit der Datenübertragung nicht gegeben, so können die intern gespeicherten Daten über einen USB-Stick ausgelesen werden. Sobald er in die Zentraleinheit des Torsos eingesteckt wird, beginnt die Übertragung aller bis dahin gespeicherten Daten automatisch.

Der Bordcomputer setzt sich aus mehreren Modulen zusammen. Dazu zählen ein Raspberry Pi 2 Model B, eine Echtzeituhr, Komponenten zur Speicherung und Übertragung von Daten und die Stromversorgung über PoE.[30],[32],[36]

Literatur:
[30] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2002)
[32] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2006)
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012b)

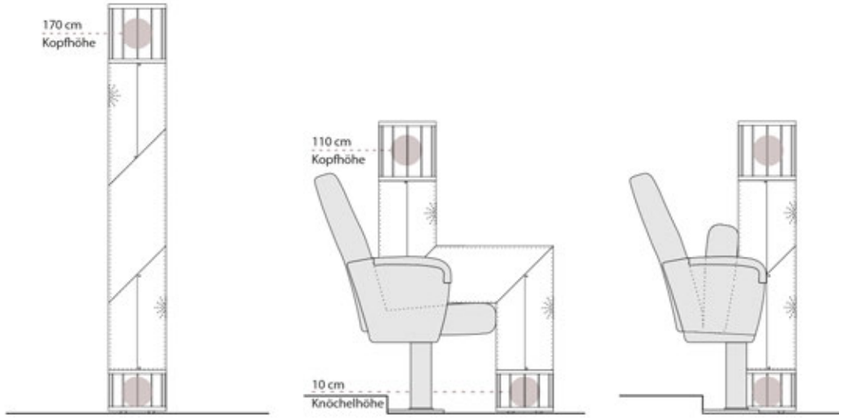

Abb. 28 Platzierung der Sensoren am Messtorso

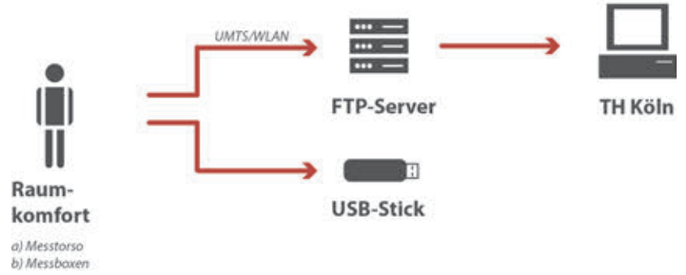

Abb. 29 Datenübermittlungsstruktur des Messtorsos

4.1.3.4 Platzierung der Messtorsi

Der Platzierung des Messtorsos im Zuschauersaal muss eine besondere Bedeutung beigemessen werden, da sich die messtechnisch erfassten Werte auch innerhalb des Saals je nach Sitzplatz stark voneinander unterscheiden können. Bei mittig liegenden Sitzplätzen ist beispielsweise eine höhere Wärmeeinwirkung auf den Zuschauer, bedingt durch die Wärmeabgabe der allseitig umgebend sitzenden Besucher, zu erwarten. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass die Lufttemperatur aufgrund der Thermik auf den Rängen höher ist.
Um eine Vergleichbarkeit der Messwerte aus den unterschiedlichen Theaterspielstätten herzustellen, wurde eine mittige Platzierung des Messtorsos im Parkett des Zuschauersaals angestrebt, da die Raumgeometrie der Säle ebenfalls stark variiert. Selbst bei ähnlicher Platzkapazität kann die Anordnung der Sitzplätze sehr unterschiedlich sein, was auf die geschichtliche und gesellschaftliche Entwicklung des Gebäudetyps zurückzuführen ist. So lassen sich vier Typen von Zuschauersälen bei den betrachteten Theaterspielstätten identifizieren: Zum einen gibt es Zuschauersäle mit ansteigenden Parkett, die über keinen Rang verfügen. Hierzu zählen von den ausgewählten Theaterspielstätten T09 sowie T13. Dem gegenüber stehen Zuschauersäle mit Rängen in unterschiedlichen Ausformungen. Bei T01 und T07 sind die Ränge im hinteren Bereich angeordnet, während das T04, T12 und das T11 über einen Rang verfügen, der seitlich in gestaffelten Balkonen mündet. Die meisten Theater mit T02, T03, T06, T10 sowie T05 und T08 verfügen jedoch über einen oder mehrere um das Parkett umlaufende Ränge.
Nicht bei allen Messungen konnte die bevorzugte Platzierung des Messtorsos berücksichtigt werden. Aufgrund der langwierigen Akquise der Theaterspielstätten überschnitt sich der Start des Verkaufs der Eintrittskarten für die jeweilige Spielzeit oftmals mit der Reservierung der Plätze durch die Verantwortlichen der Theaterspielstätte, sodass die gewünschten Plätze bereits verkauft waren. Des Weiteren handelt es sich bei den mittig gelegenen Plätzen in vielen Häusern wegen der guten Sichtbeziehung zur Bühne sowie der Akustik um die teuersten Plätze, weswegen eine Reservierung zu einem nicht zumutbaren finanziellen Ausfall für die Theaterspielstätten geführt hätte. In diesen Fällen wurde gemeinsam mit den Spielstätten nach einem Kompromiss gesucht. Dieser konnte in allen Fällen gefunden und realisiert werden.

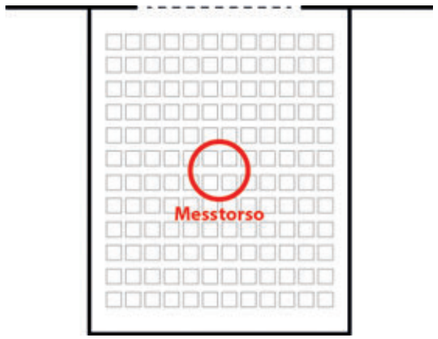

Abb. 30 Bevorzugte Platzierung des Messtorsos im Zuschauersaal

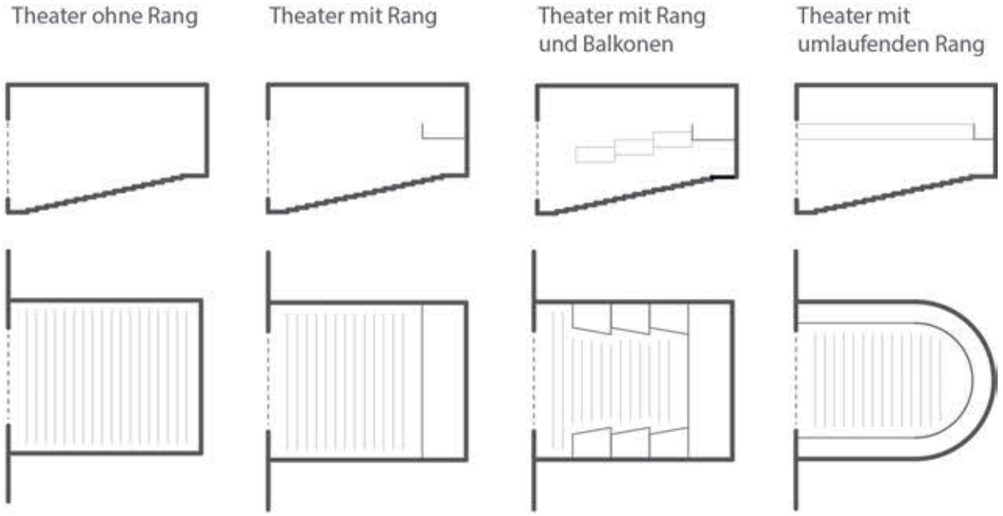

Abb. 31 Raumgeometrien von Theatersälen

4.2 Berechnung des Energiebedarfs mit TEK-Tool

4.2.1 Beschreibung des Programms

Das Programm TEK-Tool ist ein Werkzeug zur energetischen Bewertung von Nichtwohngebäuden im Bestand, welches im Rahmen des EnOB-Forschungsprojekts (Energieoptimiertes Bauen) „Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden (TEK)“ unter der Leitung des Instituts für Wohnen und Umwelt, einer Forschungseinrichtung des Landes Hessen und der Stadt Darmstadt, entwickelt wurde. Das excelbasierte Tool hat zum Ziel, eine möglichst realistische Bewertung von Bestandsbauten unter Berücksichtigung objektspezifischer Rahmenbedingungen vorzunehmen, um so die tatsächliche Nutzung abzubilden. Die zugrundeliegende Berechnung basiert auf dem in der DIN V 18599 beschriebenen Mehrzonenbilanzverfahren. Es wurde jedoch angepasst, erweitert und verändert, um die verfügbaren Informationen bei Bestandsbauten bei den erforderlichen Eingabedaten zu berücksichtigen. Infolgedessen wurden Vereinfachungen am Berechnungsalgorithmus sowie dem Gebäudemodell vorgenommen.
Durch die Eingabe der Daten von den im Zuge der Querschnittserhebung und des Intensivmonitorings betrachteten Theaterspielstätten in TEK-Tool kann der Energieverbrauch nach Zonen und Verbraucher abgeschätzt werden. Während beim Intensivmonitoring die Erfassung des Energieverbrauchs einzelner Nutzer erfolgt und durch die TEK-Tooldaten ein Abgleich zwischen dem berechneten Bedarf und dem tatsächlichen Verbrauch möglich ist, werden im Rahmen der Querschnittserhebung nur Gesamtverbräuche gemessen. Mit Hilfe von TEK-Tool ist es möglich, diese Gesamtverbräuche auf die einzelnen Nutzer aufzuteilen.[58],[61],[62],[64]

Literatur:
[58] Hörner, M., Knissel, J. (2015)
[61] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2013a)
[62] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2013b)
[64] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2018)

4.2.2 Aufnahme der Gebäudedaten

Die Aufnahme der Gebäudedaten zur Eingabe in TEK-Tool erfolgte im Zuge einer Begehung der Theaterspielstätten. Während der Begehung, die in Abhängigkeit der Größe des Hauses zwischen vier und sechs Stunden dauert und fotografisch dokumentiert wurde, war eine Begleitung durch einen fachkundigen Vertreter des Theaters zur Beantwortung von Fragen zum Gebäude und dessen Nutzung erforderlich.
Im Vorfeld der Begehung musste eine Aufbereitung des Grundrisses der begangenen Theaterspielstätte erfolgen, um die baulichen Gegebenheiten nachzuvollziehen. Im Zuge der Aufbereitung des Grundrisses wurden außerdem die Nutzungen der Räume bestimmt und die dazugehörigen Flächen ermittelt, die bei der späteren Eingabe ins TEK-Tool benötigt werden.
Die anschließende Begehung wurde anhand eines von Jung Ingenieure GmbH entwickelten Fragebogens durchgeführt, der sich an den für TEK-Tool benötigten Eingabedaten orientiert. Er umfasst die Aufnahme von Daten zum Gebäude, zur Hülle, Gebäudetechnik und zu den Referenzzonen.
Zur Umgehung der zeitaufwändigen Aufnahme der Gebäudetechnik, die oftmals das Suchen und Ablesen der Typenschilder an den einzelnen Anlagenkomponenten erfordert, wurde den Theaterspielstätten vor der Begehung dieser Teil des Fragebogens zum Ausfüllen zugesendet. Zur Eingabe eines Gebäudes in TEK-Tool ist es notwendig, Daten zur Wärmeerzeugung, Kälteerzeugung und zu den Lüftungsanlagen zu erheben, um die anteilig verbrauchte Energie beurteilen zu können. Hierzu werden für alle drei Komponenten Angaben zum Betrieb und zur Leistung benötigt. Sowohl für die Wärme- als auch für die Kälteerzeugung ist außerdem die Effizienz der Pumpen anzugeben. Des Weiteren ist für die Wärmeerzeugung die Art der Erzeugung, der Energieträger sowie die Verteilung aufzuführen, während für die Kälteerzeugung das Kältemittel, die Rückkühlung und die Wärmeabfuhr aufgezeigt werden müssen. Zur Abbildung der Lüftungsanlagen sind weiterführende Angaben zu den Volumenströmen und der Regelung notwendig sowie zur Wärme- und Kälteübertragung, der Wärmerückgewinnung und zur Luftbefeuchtung.
Zu Beginn der Begehung wurden die Daten zum Gebäude, zu denen Standort, Baujahr, Angaben zu den Aufzügen, den Servereinheiten und der Verpflegung durch einen Kantine oder ein Restaurant gehören, bei dem Vertreter des Theaters erfragt.
Die anschließende Beurteilung der Gebäudehülle erfolgt sowohl über die Analyse der Gebäudepläne, anhand derer die Geschossigkeit, über- und unterirdisch, sowie die Abwicklung der Fassaden entnommen werden konnten, als auch über die Inaugenscheinnahme des Gebäudes. Durch letztere konnten Daten zum Dachtypus, der Bauschwere, dem Fensterflächenanteil, der Art der Verglasung, des Fensterrahmens und der Horizontal- sowie Überhangverschattung erfasst werden. Diese Daten nehmen Einfluss auf den Transmissionswärmeverlust des Gebäudes sowie die solaren Gewinne.
Nachdem die Aufnahme der Daten zum Gebäude sowie zur Hülle abgeschlossen war, erfolgte die Begehung einzelner Räume des Theaters. Um den Begehungs- und Eingabeaufwand zu begrenzen, wurden alle Räume anhand ihrer Nutzung und Klimatisierung in Zonen gegliedert. Aus jeder Zone wurde ein Referenzraum ausgewählt, der stellvertretend begangen und aufgenommen wurde. Zunächst wurden die Nutzungszeiten festgehalten und die Geometrie erfasst, indem die Raum-, Fenster und Sturzhöhe über eine Lasermessung ermittelt wurde. Des Weiteren wurde die Lage im Gebäude, der Verglasungsanteil sowie der Anteil an der Gebäudehülle bestimmt. Anschließend wurden Angaben zur Klimatisierung, wie der Art der Wärme- und Kälteübertragung sowie der Belüftung, aufgenommen und die Raumlufttemperatur gemessen. Zur umfassenden Aufnahme des Raumes gehört auch die Erfassung der Beleuchtung. Hierzu wurde die Leuchtenart und –anzahl bestimmt sowie die Steuerung festgehalten. Anhand dessen kann so die installierte Beleuchtungsleistung pro Quadratmeter berechnet werden.
Sofern während der Begehung der Theaterspielstätte Großverbraucher wie beispielsweise Waschmaschinen, Kühlschränke, Dampfbügelstationen oder energieintensive Arbeitsgeräte entdeckt worden sind, wurden diese ebenfalls mit ihrer Leistung und Betriebszeit festgehalten und konnten später beim Stromverbrauch des Gebäudes berücksichtigt werden.

Abb. 32 Foyer des Landestheaters Detmold

4.3 Vorbereitung der Nutzerbefragung

4.3.1 Entwicklung des Nutzerfragebogens

Ziel der Nutzerbefragung war ein Abgleich des subjektiven Komfortempfindens der Zuschauer mit den objektiven Messwerten, die mit Hilfe des Messtorsos erfasst wurden. Zu diesem Zweck musste ein Nutzerfragebogen entwickelt werden, der die Dokumentation des IST-Stands ermöglichte.
Das Instrument der Nutzerbefragung ist bereits bei mehreren Forschungsprojekten eingesetzt worden. Am Karlsruher KIT (Karlsruher Institut für Technologie) wurde im Rahmen eines vom BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) geförderten Projekts „INKA – Instrument für Nutzerbefragungen zum Komfort am Arbeitsplatz“ entwickelt. Der entstandene standardisierte Fragebogen ermöglicht es, eine umfangreiche Befragung zur allgemeinen Situation am Arbeitsplatz sowie zu den Komfortbedingungen durchzuführen und so die Arbeitsbedingungen im Büro- und Verwaltungsbereich zu überprüfen.
In Anlehnung an INKA wurde an der Universität Wuppertal ein Fragebogen zur Evaluierung der Nutzerakzeptanz und Nutzerzufriedenheit im Wohnheim „Neue Burse“ erarbeitet. Mit diesem Instrument wurden das Nutzerverhalten, die Komfortbedingungen sowie der Informationsstand zum energieeffizienten Nutzerverhalten der Studierenden überprüft.
Eine weitere Nutzerbefragung, die sich direkt auf den thermischen Raumkomfort fokussiert, wurde im Fraschini Theater in Pavia in Italien durchgeführt. Hier war es ebenso Ziel wie im vorliegenden Forschungsprojekt einen Abgleich von Mess- und Befragungswerten vorzunehmen. Darüber hinaus sollte eine neue Methode zur Bewertung des thermischen Raumkomforts entwickelt und überprüft werden.
Alle beschriebenen Fragebögen orientieren sich an der EN ISO 10551 „Ergonomie des Umgebungsklimas – Beurteilung des Einflusses des Umgebungsklimas unter Anwendung subjektiver Bewertungsskalen“. Diese Norm enthält Vorschläge zum Aufbau und Anwendung von Bewertungsskalen, um bei Befragungen zur thermischen Behaglichkeit vergleichbare Daten zu erhalten. Zur umfassenden Abfrage der thermischen Behaglichkeit sind fünf Schritte vorgesehen, die in ihrer Reihenfolge eingehalten werden sollen. Zunächst wird das persönliche Befinden, zu dem eine Wahrnehmungsbewertung, eine affektive Bewertung und die thermische Präferenz gehören, abgefragt. Anschließend werden mit der persönlichen Annehmbarkeit und der persönlichen Toleranz Fragen zum persönlichen Befinden gestellt. Zur Vermeidung einer Verzerrung und Variabilität der Daten durch einen nicht eindeutigen Sprachgebrauch sind die Fragestellungen ebenfalls in der Norm standardisiert. Auch für den Aufbau der Bewertungsskalen werden in Abhängigkeit des Befragungsschritts Möglichkeiten aufgezeigt.
In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurden zwei verschiedene Arten von Bewertungsskalen eingesetzt, die in unterschiedlichen Formen auftreten. Zum einen wurde eine symmetrische zweipolige Skala mit zentralen Indifferenzpunkt eingesetzt. Diese tritt bei der Abfrage der Empfindung des thermischen Komforts sowie der Luftqualität und der Präferenzabfrage mit jeweils drei Stufen zunehmender Intensität auf, sodass sich insgesamt eine 7-stufige Skala ergibt. Eine vergleichbare Skala mit jeweils zwei Stufen zunehmender Intensität wurde bei der Abfrage der Empfindung aller weiterer Komfortparameter und der persönlichen Toleranz angewendet. Zum anderen erfolgte der Einsatz von binären Merkmalen, bei denen zwei Antwortmöglichkeiten zur Verfügung standen. Diese wurde bei der Abfrage des Geschlechts sowie der persönlichen Annehmbarkeit eingesetzt.[42],[84],[89],[109]

4.3.2 Beschreibung des Nutzerfragebogens

Der Aufbau des innerhalb des Forschungsprojekts verwendeten Fragebogens orientiert sich sowohl an der EN ISO 10551 als auch an den in [4.4.1] beschriebenen Beispielen, ist im Gegensatz zu diesen aber kürzer gefasst. Wie auch bei den Beispielen wurde einleitend ein Anschreiben mit Erklärung der Hintergründe für die Befragung verfasst, um die Zuschauer zu einer Teilnahme zu motivieren. Die Befragung selbst ist in mehrere Bereiche gegliedert. Der Einstieg erfolgt mit allgemein gehaltenen und leicht zu beantwortenden Fragen, um so eine Senkung der Hemmschwelle herbeizuführen. Die allgemeinen Fragen umfassen Angaben zum Datum und zum Sitzplatz, um eine Zuordnung der Daten zu Vorstellungstagen sowie zu verschiedenen Bereichen im Zuschauersaal zu ermöglichen. Es folgen Angaben zur Person wie das Geschlecht, Alter und Bekleidung, um intermediäre und physiologische Faktoren bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigen zu können. Anschließend erfolgen Fragen zur besuchten Vorstellung und zur momentanen Stimmung des Befragten. Eine Abfrage der Stimmung ist von Bedeutung, da diese Einfluss darauf nehmen kann, ob die folgenden Fragen eher positiv oder negativ beantwortet werden.
Der zweite Bereich beinhaltet Fragen zum Raumkomfort. Zunächst wird der Befragte aufgefordert, den Zuschauersaal in Hinblick auf Raumkomfortparameter zu bewerten, die den thermischen Komfort nicht einbeziehen. Es wird eine Wahrnehmungsbewertung der Gestaltung, Akustik, Sichtbeziehung, Beleuchtung und des Sitzkomforts im Zuschauersaal mit anschließender affektiven Bewertung vorgenommen.
Die nächsten Fragen, die den Kern des Fragebogens darstellen, widmen sich der Beurteilung des Raumkomforts sowie der Raumluftqualität. Die Wahrnehmungsbewertung der Beeinträchtigung durch Müdigkeit und Konzentrationsschwierigkeiten zielt darauf ab, Hinweise auf eine mögliche hohe CO_2-Belastung der Raumluft zu erhalten, da beides körperliche Reaktionen darauf darstellen. Anschließend wird eine Wahrnehmungsbewertung der Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Zugerscheinungen und Luftqualität abgefragt. Diese Bewertung des thermischen Raumkomforts kann bei der späteren Auswertung der Analyse der Messwerte gegenübergestellt werden. Hier greift die in der DIN vorgeschlagene umfassende Abfrage der thermischen Behaglichkeit in fünf Schritten, da sowohl die affektive Bewertung sowie die Abfrage der Präferenz für die oben beschrieben Parameter als auch die Abfrage der Annehmbarkeit und Erträglichkeit erfolgt.
Der dritte Teil des Fragebogens befasst sich mit der Wahrnehmung und Bewertung von Unterschieden bei Temperatur und Zugerscheinungen im Nacken- und Fußbereich, da große vertikale Unterschiede zur Beeinträchtigung der lokalen thermischen Behaglichkeit führen können. Auch hier können die Ergebnisse mit den Messwerten verglichen werden, da der Messtorso über Sensoren in Höhe des Nackens sowie des Fußbereichs verfügt. Anschließend werden bei Empfinden einer Ungleichheit bei Temperatur und Zugerscheinung die Stärke und Lokalisierung des wahrgenommenen Unterschieds abgefragt, gefolgt von einer affektiven Bewertung und Aufnahme der Präferenz.
Zum Abschluss der Befragung besteht die Möglichkeit zur freien Meinungsäußerung. Diese hatte für die Theater ausschließlich einen informativen Charakter und ging nicht in die Bewertung der Situation mit ein.[39],[42]

Literatur:
[39] Dreisbach, G. (2008)
[42] Europäisches Komitee für Normung (2001)
[84] Ricciardi, P., Buratti, C. (2015)
[89] Schakib-Ekbatan, K., Gropp, T., Wagner, A. (2011)
[109] Voss, K. (2006)

4.3.3 Durchführung der Nutzerbefragung

Die Nutzerbefragung wurde zeitgleich mit der messtechnischen Erfassung des Raumkomforts im Zuschauersaal durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit zwischen den subjektiven Befragungsergebnissen und den objektiven Messwerten zu ermöglichen.
Um eine Sensibilisierung der Besucher für eine Teilnahme an der Nutzerbefragung zu erreichen und so einen möglichst hohen Rücklauf zu generieren, wurde seitens des Forschungsteams eine Ankündigung durch die Öffentlichkeitsarbeit des Theaters sowie über die Presse empfohlen. In den meisten Fällen erfolgten daraufhin eine Ankündigung auf der Internetseite und den sozialen Netzwerken der Spielstätten sowie eine Mitteilung in der regionalen Tagespresse.
Die Teilnahme an der Nutzerbefragung konnte über einen Papierfragebogen in Form eines Flyers oder online erfolgen. Für die Online-Befragung wurden Visitenkarten mit einem QR-Code und einem Weblink ausgegeben, welche den Teilnehmer auf eine mit Google forms angelegte Umfrage leitete. Sowohl die Flyer als auch die Visitenkarten wurden den teilnehmenden Theaterspielstätten mit jeweils 500 gedruckten Exemplaren zur Verfügung gestellt. Die Anzahl der ausgehändigten Exemplare ergab sich aus einem erwünschten Rücklauf von 150 Fragebögen pro Woche der Befragung.
Die Ausgabe der Materialien wurde von den Theaterspielstätten individuell koordiniert und erfolgte oftmals durch Auslagen an der Garderobe oder im Foyer. Nur in wenigen Fällen wurden die Fragebögen durch Mitarbeiter des Theaters während der Pausen verteilt. Um den Rücklauf der Fragebögen zu ermöglichen, wurden verschlossene Pappboxen mit Einwurfschlitz aufgestellt.

Abb. 33 Materialien zur Nutzerbefragung

5. Datenauswertung

5.1 Flächenverteilung

5.1.1 Definition und Ermittlung der Nettogrundfläche

Ziel der Ermittlung der Nettogrundfläche für Theaterspielstätten ist es, einen Überblick über die Nutzungsverteilung für diesen Gebäudetypus zu erhalten. Des Weiteren ist der Bezug des Energieverbrauchs auf eine Energiebezugsfläche notwendig, um so eine Vergleichbarkeit zwischen den Theaterspielstätten herzustellen.
Als Energiebezugsfläche wird nach § 19 Absatz 2 Satz 5 in Verbindung mit § 2 Nr. 15 EnEV 2013 die Summe aller beheizten und gekühlten Nettogrundflächen eines Gebäudes definiert.
Die Beheizung oder Kühlung eines Gebäudes lässt sich aus §2 Punkt 4 und 5 ableiten. Dementsprechend sind beheizte oder gekühlte Räume solche, die aufgrund ihrer bestimmungsgemäßen Nutzung direkt oder durch einen Raumverbund beheizt oder gekühlt werden. Nach Auslegung des BBSR bestehen somit zwei Möglichkeiten einen Raum als beheizt oder gekühlt anzusehen. Befindet sich unmittelbar im Raum eine Heiz- oder Kühlvorrichtung, so gilt dieser als direkt beheizt, bzw. gekühlt. Andernfalls kann dieser auch über einen Raumverbund indirekt geheizt oder gekühlt werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn Türen regelmäßig geöffnet sind oder eine Wärmetransmission durch angrenzende Räume nicht unterbunden wird. Hier gilt dann die äußere Gebäudehülle als Systemgrenze und die Flächen des indirekt beheizten bzw. gekühlten Raumes dürfen der Nettogrundfläche hinzugerechnet werden.
Aus §1 Satz 3, Punkt 3 der EnEV lassen sich außerdem Temperaturgrenzen ableiten, die darüber Aufschluss geben, wann ein Raum als beheizt anzusehen ist. Sofern Räume eine Innentemperatur von weniger als 12°C haben, gelten diese als unbeheizt und werden nicht bilanziert. In Anlage 2 (zu den §§ 4 und 9) Anforderungen an Nichtwohngebäude wird diese Definition angewendet, indem die Ausführung des Referenzgebäudes tabellarisch dargestellt wird. Unterschieden wird hier zwischen beheizten Räumen, die eine Solltemperatur größer oder gleich 19°C aufweisen sowie gering beheizten Räumen, deren Solltemperatur kleiner als 19°C und größer als 12°C ist. Anlage 2 (zu den §§ 4 und 9), Anforderungen an Nichtwohngebäude, ist ebenfalls zu entnehmen, wann eine Gebäudekühlung in die Bilanzierung einbezogen wird. Zum einen muss der Einsatz einer Kühlung, welche den entsprechenden Raum auf eine Raum-Solltemperatur, die in den Nutzungsprofilen der DIN V 18599-10 definiert ist, herunterkühlt, gebäudetechnisch vorgesehen sein. Zum anderen wird eine Nutzungsdauer vorausgesetzt, die mehr als zwei Monate pro Jahr mit mehr als zwei Stunden pro Tag betragen muss. Liegen diese Bedingungen nicht vor, so wird die Kühlung bei der Bilanzierung nicht berücksichtigt.
Die Ermittlung der in den folgenden Abschnitten dargestellten Nettogrundfläche ist auf Basis dieser Definitionen erfolgt. Um die Nettogrundflächen bestimmen zu können, wurde auf die aufbereiteten Gebäudepläne zurückgegriffen, die im Vorfeld der TEK-Tool Begehung erstellt wurden [siehe 4.2.2], da nur für wenige Theaterspielstätten bereits eine Flächenerfassung vorlag.[11],[13],[17]

Literatur:
[11] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (1994)
[13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009a)
[17] Bundesregierung (2014)

5.1.2 Darstellung und Analyse der Nettogrundfläche

Theaterspielstätten weisen aufgrund der zahlreichen Nutzungen, die zur Produktion eines Theaterstücks notwendig sind, einen hohen Flächenbedarf auf. In den betrachteten Spielstätten beträgt die Nettogrundfläche im Durchschnitt 13.720 m². Die geringste Fläche mit 4.311 m² wurde bei T06 festgestellt, während T11 mit 27.502 m² das größte untersuchte Theater ist.
Die Auswahl der an der Querschnittserhebung teilnehmenden Theaterspielstätten beruht auf einem Schema, welches die Spielstätten zusätzlich zu ihrem Baujahr anhand der Zuschauerkapazität kategorisiert. Neben der Beziehung zwischen Geometrie des Zuschauersaals und seiner Zuschauerkapazität, werden auch Abhängigkeiten zur Nettogrundfläche vermutet. Diese Annahme begründet sich darin, dass die benötigten Flächen zur Gestaltung des Theaterbesuchs, wie Foyer- und Garderobenräume, aber auch sonstige Servicebereiche, in Abhängigkeit der möglichen Besucherzahl steigen. Des Weiteren steht die Sitzplatzkapazität des Zuschauersaals, u.a. durch Sichtbezüge, in geometrischer Abhängigkeit zur Größe der Bühne. Da größere Bühnen aufwändiger und vielseitiger bespielt werden können, steigt gleichzeitig die benötigte Fläche für Personalräume, Proberäume, Werkstätten und Magazine.
Für die betrachteten Theaterspielstätten wurde festgestellt, dass die durchschnittliche Fläche pro Sitzplatz 18,0 m² beträgt, während das Minimum bei 7,1 m² in T05 und das Maximum bei 31m² in T10 liegt. Dieses hohe Maximum ist dadurch zu erklären, dass es sich um ein Ensemble mehrerer Gebäude handelt, die energetisch nicht getrennt voneinander betrachtet werden können, aber alle Nutzungen dieses Theaters aufnehmen. Bei anderen Theatern kann es vorkommen, dass Nutzungen

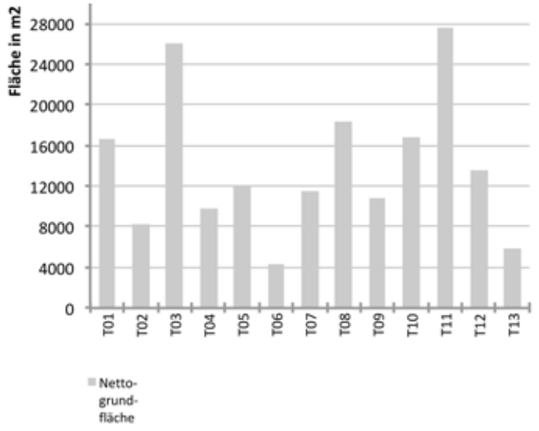

Abb. 34 Nettogrundfläche der Theaterspielstätten

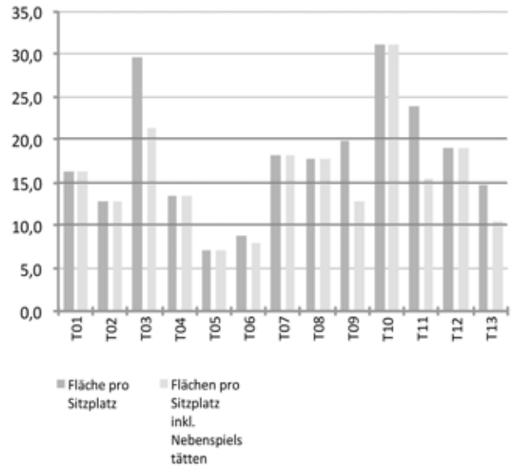

Abb. 35 Nettogrundfläche bezogen auf die Sitzplatzkapazität der Theaterspielstätten

wie Werkstätten, Magazine und Probebühnen aus der eigentlichen Spielstätte ausgelagert sind und daher nicht berücksichtigt werden konnten.
Die Korrelation von 0,46 zwischen Sitzplatzkapazität und Nettogrundfläche zeigt nur einen schwachen linearen Zusammenhang, sodass die oben getroffene Annahme nicht eindeutig bestätigt werden kann. Neben der Auslagerung von Funktionen besteht eine mögliche Erklärung darin, dass einige Theater über kleinere Spielorte, wie einem „Kleinen Haus“ oder einer „Kammerbühne“ im Haus verfügen. Durch die Berücksichtigung der Nebenspielstätten steigt die Sitzplatzkapazität von T03, T06, T09, T11 und T13. Während dadurch das Minimum und Maximum weiterhin bestehen, reduziert sich der durchschnittliche Flächenbedarf auf 15,6 m² pro Sitzplatz. Auch die Korrelation zeigt mit 0,66 nun einen mittleren linearen Zusammenhang, sodass bei einer größeren Sitzplatzkapazität tendenziell auch eine größere Fläche benötigt wird. Der Rückschluss von der Größe des Zuschauersaals auf die Fläche der Theaterspielstätte ist somit bedingt möglich.
Kategorisiert man die Theaterspielstätten anhand ihrer Nettogrundfläche in Abhängigkeit der Sitzplatzkapazität, so bilden sich vier Gruppen heraus. Die erste Gruppe beinhaltet nur T05 und T06 und weist mit einer Fläche von unter 10 m² pro Sitzplatz den geringsten Flächenverbrauch auf. Den größten, mit einer Fläche von über 20 m², haben dagegen T03 und T10 und bilden Gruppe 04. Die meisten Theaterspielstätten mit einer Anzahl von fünf lassen sich in Gruppe 02 einsortieren, da sie über 10 m²/SP und unter 15 m²/SP benötigen. Die letzte Gruppe, zu denen Theaterspielstätten mit über 15 m²/SP und unter 20 m²/SP zählen, beinhaltet die restlichen vier Häuser.

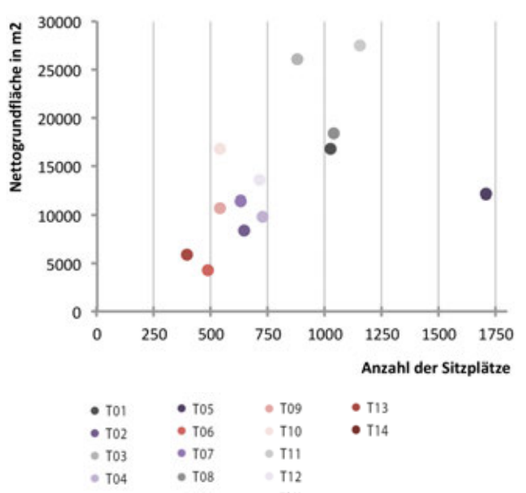

Abb. 36 Beziehung zwischen Nettogrundfläche und Sitzplatzkapazität ohne Nebenspielstätten

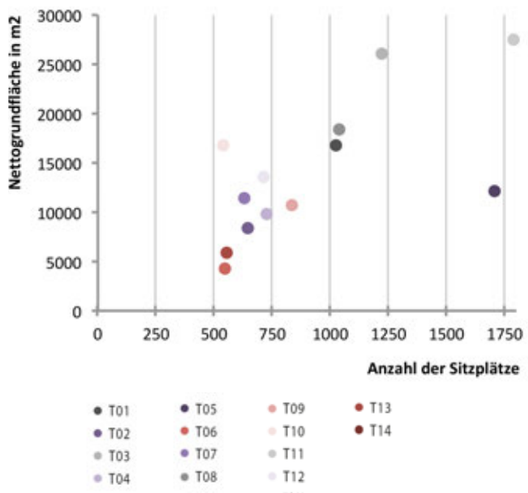

Abb. 37 Beziehung zwischen Nettogrundfläche und Sitzplatzkapazität inklusive Nebenspielstätten

5.1.3 Entwicklung und Bewertung der Zonierung

Theaterspielstätten verfügen über viele unterschiedlich genutzte Räume. Die Zusammenfassung der Räume zu Zonen, die für alle untersuchten Theaterspielstätten anwendbar sind, ermöglicht einen Vergleich der verschiedenen Häuser. Indem die Größe der Zonen mit dem Gesamtenergieverbrauch in Beziehung gesetzt wird, ist eine spätere Analyse der Energieverbräuche besser möglich.
In Anlehnung an die unter [2.1.6] beschriebenen Nutzungsbereiche erfolgt eine Einteilung in insgesamt 13 Zonen. Ordnet man diese Zonen den drei Bereichen „repräsentativ", „zentral" und „funktional" zu, so zeigt sich, dass die Flächen nicht gleichmäßig verteilt sind.
Bereich 01, der einen durchschnittlichen Anteil von 13,6% an der Gesamtfläche hat, umfasst die repräsentativen Bereiche wie „09_Foyer" und „10_Eingangsbereich". Nebennutzungen wie Sanitärbereich und gastronomische Einrichtungen können diesem Bereich nicht zugeschlagen werden, da diese nicht für Künstler und Zuschauer getrennt erfasst wurden.
Unter dem zentralen Bereich 02 werden „11_Theatersaal" und „12_Bühne" zusammengefasst. Während dieser Bereich bei T10 mit einem Anteil von 8,4% nur wenig ausgeprägt ist, besitzt T09 dort mit einem Anteil von 15,4% besonders viel Fläche. Dies lässt sich darüber erklären, dass T09 über drei Spielorte in einem Haus verfügt. Durchschnittlich liegt der Bereich bei einem Flächenanteil von 11,8%.
In Bereich 03, der nur für das Personal zugänglich ist, sind die restlichen neun Zonen zusammengefasst. Mit einem Mittelwert von 74,8% verfügt dieser Bereich durchschnittlich über die größte Fläche. In T04 ist dieser Anteil mit 67,2% unterdurchschnittlich repräsentiert, da eine Auslagerung der Werkstätten, die in Zusammenarbeit mit einer weiteren

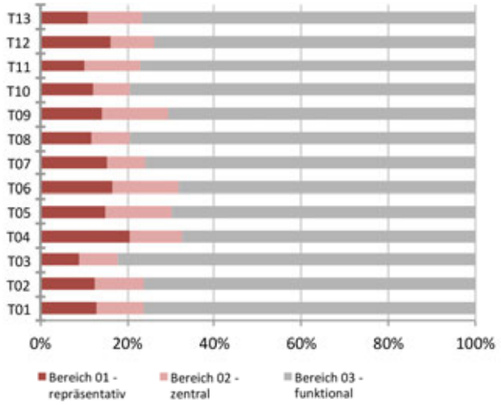

Abb. 38 Anteil der drei Organisationsbereiche in Theaterspielstätten an der Gebäudefläche

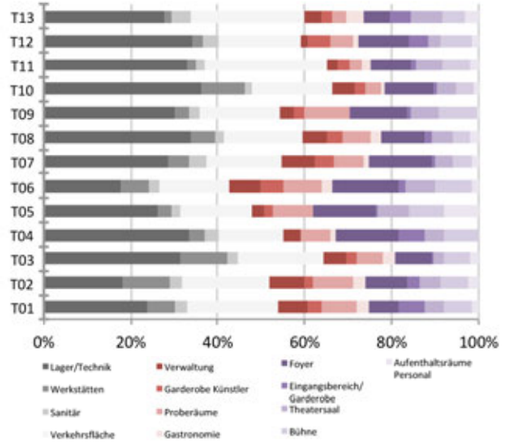

Abb. 39 Flächenverteilung in den Theaterspielstätten

Theaterspielstätte betrieben werden, stattgefunden hat. Dagegen befinden sich in T03 alle Werkstätten unter einem Dach, was zu einem Flächenanteil von 83,5% führt.
Bei einer genaueren Betrachtung der einzelnen Nutzungsbereiche, zeigt sich, dass die meisten Flächen für Lager- und Technikräume sowie die Verkehrsräume benötigt werden. Der Anteil an Lager- und Technikräumen liegt in den betrachten Theaterspielstätten bei durchschnittlich 29,14%, während für die Verkehrsfläche im Mittel 19,39% der Nettogrundfläche beansprucht wird. Dagegen stellen gastronomische Einrichtungen den geringsten Anteil mit 1,70%.
In [5.1.1] wurde die Vermutung aufgestellt, dass verschiedene Zusammenhänge zwischen Nettogrundfläche und Größe des Zuschauersaals sowie der Bühne bestehen. Um diese Abhängigkeiten

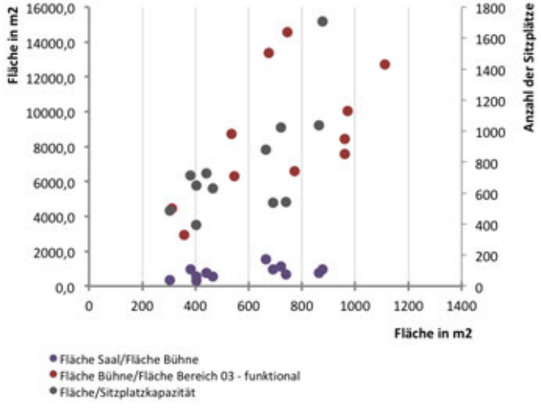

Abb. 40 Zusammenhänge zwischen verschiedenen Flächen in den Theaterspielstätten

zu untersuchen, wurde zunächst die Korrelation zwischen der Fläche des Zuschauersaals und seiner Sitzplatzkapazität gebildet. Mit einer Korrelation von 0,60 besteht zwar ein mittlerer linearer Zusammenhang, dennoch ist dieser nicht so stark wie erwartet. Dies liegt daran, dass die Fläche pro Sitzplatz im Theatersaal zwischen 0,5 m^2 in T05 und 1,4 m^2 in T11 stark schwankt.
Als nächstes wurde der Zusammenhang zwischen der Größe der Bühne und der Fläche des Zuschauersaals untersucht. Die Korrelation von 0,75 zeigt ebenfalls einen mittleren linearen Zusammenhang, sodass davon ausgegangen werden kann, dass bei größeren Bühnen auch größere Zuschauersäle vorhanden sind.
Des Weiteren war vermutet worden, dass die Größe der Bühne mit der Fläche von Bereich 03 korreliert, da dieser Flächen zur Vorbereitung eines Theaterstücks enthält. Bei einer größeren Bühnenfläche, die wiederum mit einer größeren Sitzplatzkapazität des Zuschauersaals einhergeht, können aufwändigere Inszenierungen gezeigt werden. Für diese ist ein größeres Ensemble notwendig, welches folglich mehr Garderobenflächen, und größere Probeflächen brauchen. Mit einer Korrelation von 0,86 besteht ein stark linearer Zusammenhang, durch den die Vermutung bestätigt werden kann.
Als letztes wurde der Zusammenhang zwischen Größe des Zuschauersaals und Fläche des Foyers mathematisch untersucht. Auch hier sollte ein Zusammenhang bestehen, da die Zuschauer sich vor und nach den Vorstellungen sowie während der Pausen im Foyer aufhalten. Der mittlere lineare Zusammenhang, der sich durch die Korrelation von 0,68 ausdrückt, bestätigt, dass bei steigender Zuschauerkapazität auch größere Foyerbereiche vorhanden sind.
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit dem Zuschauersaal und dem Bühnenbereich die zentralen Bestandteile eines Theatergebäudes für die gesamte Fläche des Theaters ausschlaggebend sind.

5.2 Auswertung der Wetterdaten

Die Messungen im Rahmen der Querschnittserhebung erfolgten in den Übergangszeiten Frühling und Herbst. Insgesamt fanden drei Messperioden statt, von denen zwei im Herbst und eine im Frühling durchgeführt wurden. Im Frühling wurden jeweils die Monate März und April für die Messungen gewählt, während im Herbst die Monate Oktober und November genutzt wurden.
Um die Messwerte in den jeweiligen Theaterspielstätten miteinander vergleichen zu können, müssen die Einflüsse des Wetters am Standort herausgefiltert werden. Hierzu ist zunächst eine Analyse des Klimas vor Ort erforderlich. Anschließend werden die Klimadaten dem Referenzklima des Standorts „Potsdam“ gegenübergestellt.
Anhand des Referenzklimas wird sichtbar, dass die Monate März und November jeweils vergleichbar sind genauso wie die Monate April und Oktober. Dies ist sowohl an der durchschnittlichen Außentemperatur als auch an den Gradtagen Gt20/15 zu erkennen. Während die durchschnittlichen Außentemperaturen bei 4,4°C im März sowie bei 4,5°C im November liegen, betragen diese im April 8,8°C und im Oktober 9,2°C. Deutlicher wird die Vergleichbarkeit der jeweiligen Monate durch die Gradtage, welche als die Summe aus den Differenzen einer angestrebten Rauminnentemperatur von 20°C und dem Tagesmittelwert der Außentemperaturen, an Tagen, an denen die Heizgrenztemperatur von 15°C unterschritten wird, definiert ist. Den Gradtagen in Höhe von 484,5 für den Monat März steht Gt20/15 = 464,7 für November gegenüber, während diese für die Monate April und Oktober jeweils 327,3 betragen. Sowohl an der durchschnittlichen Außentemperatur als auch an den Gradtagen wird sichtbar, dass die Monate April und Oktober im Vergleich zum März und November deutlich wärmer ausfallen.
Die Außenlufttemperaturen üben einen starken Einfluss auf den Heizenergiebedarf eines Gebäudes aus. Die geringsten, während der Messzeiträume erfassten Außenlufttemperaturen liegen zwischen -7,7°C für den Standort von T03 und 1,2°C am Standort von T12 und T13. Die höchsten Temperaturen bewegen sich dagegen zwischen 13,0°C und 24,3°C. Die Spannweiten der erfassten Temperaturen liegen zwischen 16,7°C für T04 und 25,8°C für T03. Die großen Temperaturunterschiede und –schwankungen sind, neben der geographischen Lage der Theaterspielstätten, vor allem darüber zu erklären, dass die Messungen in unterschiedlichen Monaten stattfanden. Bildet man die Durchschnittstemperaturen während des Messzeitraums, so liegen diese zwischen 4,5°C für T11 und 10,5°C für T08 und T09.
Wie bereits anhand der Mittelwerte zu vermuten, befinden sich die Temperaturen während eines Großteils der Zeit unter der Heizgrenze von 15°C. Der prozentuale Anteil bewegt sich zwischen 81,4% in T08 sowie T09 und 100% am Standort von T01, T02 und T10. Eine genauere Aufschlüsselung der Temperaturverteilung zeigt, dass T07, T08 und T09 den größten Anteil, von über 10% des Messzeitraums, Temperaturen über der Heizgrenze aufweisen, da die Messungen in allen drei Spielstätten im Frühling stattfanden.
Durch eine weitere Analyse wird deutlich, dass die Temperaturen für T01, T02, T06, T10 und T11 hauptsächlich im Bereich zwischen 0°C und 5°C liegen, was sich auch in den geringen Durchschnittstemperaturen wiederspiegelt. An den Standorten der restlichen Spielstätten bewegt sich die Temperatur meist zwischen 5°C und 10°C. Unter den Gefrierpunkt fallen die Temperaturen für einen größeren Zeitanteil bei T01, T02, T03, T06 und T11. Während am Standort von T04, T05 und T10 mit einem zeitlichen Anteil von unter 2%, auch noch Temperaturen unter dem

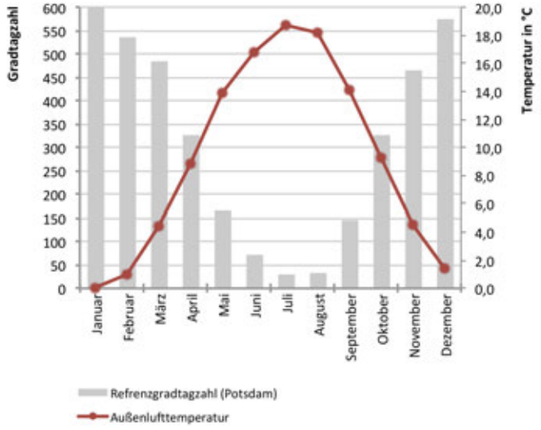

Abb. 41 Referenzklima des Standorts Potsdam

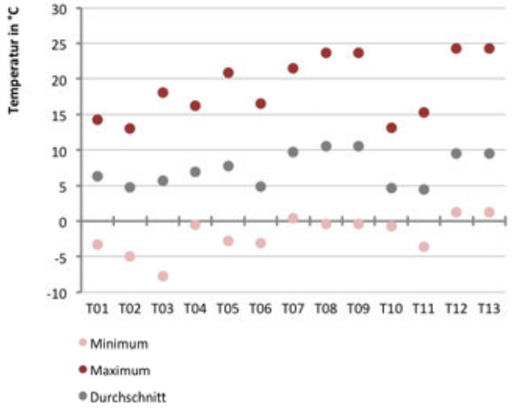

Abb. 42 Außenlufttemperatur am Standort der Theaterspielstätten während des Messzeitraums

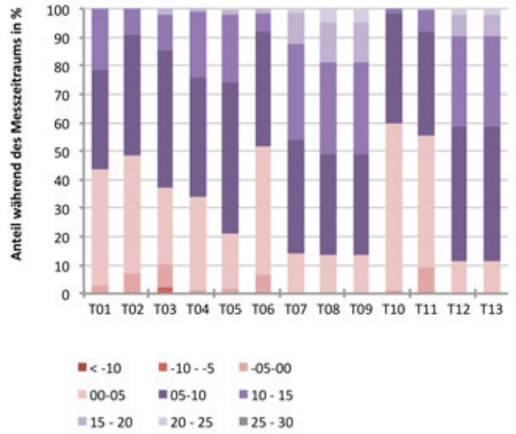

Abb. 43 Prozentuale Verteilung der gemessenen Temperaturen

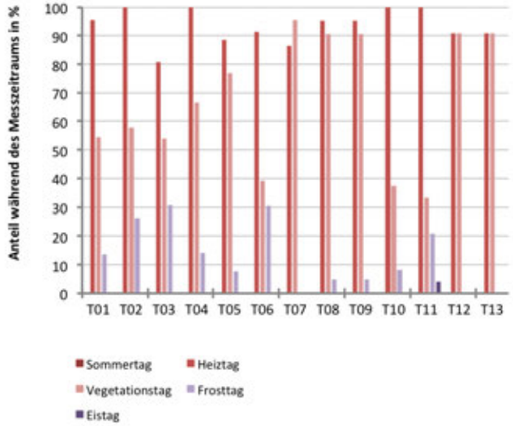

Abb. 44 Klimatologische Kenntage in Abhängigkeit des Standorts

Gefrierpunkt vorhanden sind, fallen die Temperaturen an den restlichen Standorten nur vereinzelt oder gar nicht unter die Nullgradgrenze.
Die Temperaturverteilung für die Standorte der einzelnen Theaterspielstätten schlägt sich auch in den klimatologischen Kenntagen wieder. Während Sommer- und Eistage, deren Tagesmaximum bei 25°C, bzw. 0°C liegt, nicht beobachtet wurden, waren viele Messtage Heiztage. Der Anteil der Heiztage, bei denen die Tagesmitteltemperatur 15°C nicht überschreitet, bewegt sich zwischen 80,8% bei T03 und 100% bei T02, T04, T10 und T11. Einen Anteil zwischen 0,0% in T07, T12 sowie T13 und 30,8% in T03 stellen Frosttage, bei denen das Tagesminimum unter dem Gefrierpunkt liegt.
Da sich die Temperaturverhältnisse sowohl in Abhängigkeit der Messzeiträume als auch der Standorte stark voneinander unterscheiden, müssen die energetischen Messwerte klimabereinigt werden, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Gemäß VDI 3807, Blatt 1 erfolgt hierzu die Gegenüberstellung der Monatsgradtage des Referenzstandorts Potsdam mit den Monatsgradtagen am Standort der Messung. Da die Messungen jedoch in verschiedenen Monaten erfolgten, deren Klima sich deutlich voneinander unterscheidet, können die Energieverbräuche unterschiedlicher Monate nicht gegenübergestellt werden. Folglich musste ein Referenzmonat gewählt werden, auf den alle Messungen, unabhängig des tatsächlichen Messmonats, bezogen werden konnten. Ausgewählt wurde hierfür der durchschnittlich kälteste Monat mit den meisten Gradtagen innerhalb der Messzeiträume am Referenzstandort. Hierbei handelt es sich um den Monat März, in dem die Temperatur durchschnittlich 4,4°C beträgt und für den 484,0 Gradtage ermittelt wurden. So ergeben sich Monatsklimafaktoren zwischen 1,02 für T06 und 1,85 für T12 sowie T13. Da

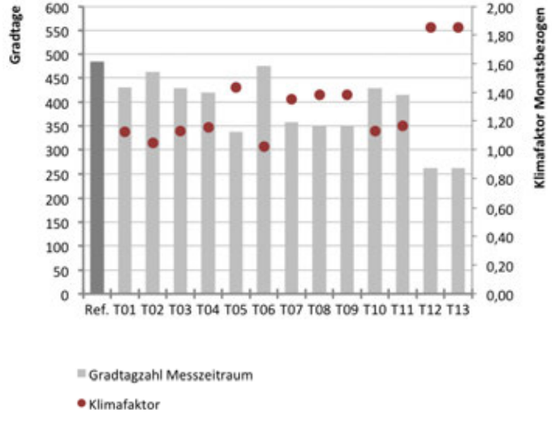

Abb. 45 Gradtage und Monatsklimafaktoren im Verhältnis zum Referenzmonat März für den Standort Potsdam

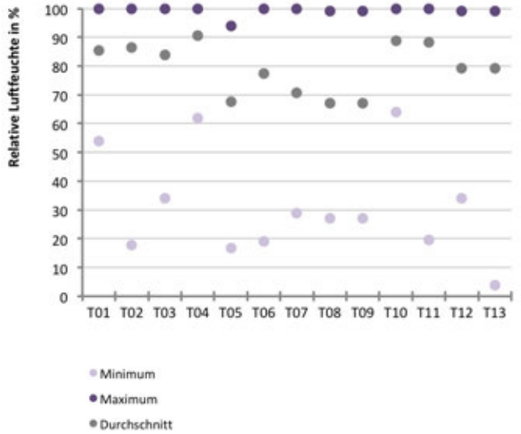

Abb. 46 Relative Außenluftfeuchte am Standort der Theaterspielstätten während des Messzeitraums

alle Monatsklimafaktoren größer als 1,0 sind, war es am Referenzstandort kälter als an den Messorten, sodass die energetischen Messwerte nach oben korrigiert werden.

$$G_{t20/15,\ Referenz,\ März} \ / \ G_{t20/15,\ Standort,\ Messmonat} = f_{Klima,\ März}$$

Neben den Anforderungen an die Raumlufttemperaturen bestehen in Räumen, die mit einer Lüftungsanlage belüftet werden, oftmals auch Anforderungen an die Raumluftfeuchte. Besonders die Feuchte der Außenluft ist maßgeblich dafür, ob eine Notwendigkeit der Be- und Entfeuchtung besteht. Anhand der relativen Luftfeuchten, die den Angaben des Deutschen Wetterdienst zu den jeweiligen Standorten zu entnehmen sind, wird sichtbar, dass sich deren Minima zwischen 16,8% am Standort von T05 und 64,0% am Standort von T10 bewegen. Die Maxima betragen zwischen 94,0% für T05 und 100%. Diese Sättigung der Luft tritt am Standort von T01, T02, T03, T04, T06, T07, T10 und T11 auf. Durchschnittlich variiert die relative Luftfeuchte zwischen 67,0% bei T08 sowie T09 und 90,6% für T04.
Betrachtet man auch hier die zeitliche Verteilung, so wird sichtbar, dass an den Standorten von T01, T02, T03, T04, T10 und T11 die relative Luftfeuchte überwiegend 90 bis 99% beträgt. Eine geringere relative Luftfeuchte von 80 bis 90% tritt bei T12 und T13 für einen Großteil des Messzeitraums auf, während diese für T05, T06, T07, T08 und T09 zwischen 50 und 89% gleichmäßig verteilt ist. Relative Luftfeuchten unter 50% sind für alle Standorte zu weniger als 15% der Zeit zu beobachten.
Aufgrund des physikalischen Zusammenhangs zwischen Temperatur und relativer Luftfeuchte kann es wegen der geringen Außentemperaturen und der dadurch bedingten starken Aufheizung der zugeführten Frischluft zu niedrigen relativen Raumluftfeuchten kommen. Die näherungsweise Berechnung der absoluten Luftfeuchte

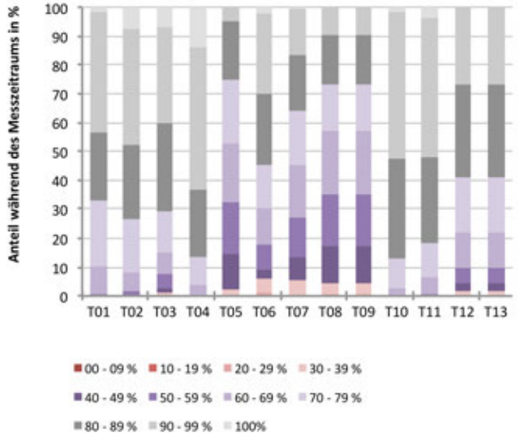

Abb. 47 Prozentuale Verteilung der gemessenen relativen Luftfeuchte

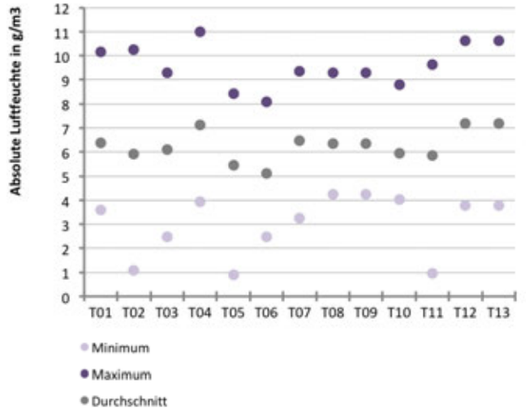

Abb. 48 Absolute Außenluftfeuchte am Standort der Theaterspielstätten während des Messzeitraums

über die Magnus-Formel zeigt Durchschnittswerte zwischen 5,12g/m³ für T06 und 7,19g/m³ für T12 und T13. Während die Minimalwerte zwischen 0,91g/m³ am Standort von T05 und 4,23g/m³ für T08 und T09 variieren, liegen die Maximalwerte bei 8,10 g/m³ für T06 und 11,01 g/m³ für T04. Gemäß den Anforderungen aus DIN EN 15251 sollte eine Entfeuchtung der Zuluft erfolgen, sofern der Wassergehalt bei 12g/kg liegt. Bei einem Gewicht der Luft von 1,2041 kg/m³ entspricht dies einem Wassergehalt von 14,5 g/m³. Anhand der Maximalwerte wird also bereits sichtbar, dass eine Entfeuchtung der Zuluft aufgrund der natürlichen Außenluftfeuchte während der Messzeiträume nicht erforderlich ist.
Niedrige Luftfeuchten werden in der DIN EN 15251 ebenfalls als potentielle Gefährdung der Behaglichkeit behandelt. Hier wird jedoch keine absolute Luftfeuchte definiert, sondern beschrieben, dass es unterhalb von 30% relativer Luftfeuchte zu gesundheitlicher Beeinträchtigung und störender statischer Aufladung kommen kann. Um zu beurteilen, ob aufgrund der Außenluftfeuchte ein Potential für sehr geringe Raumluftfeuchten besteht, wird die relative Luftfeuchte anhand der absoluten Luftfeuchte für eine Norminnentemperatur von 22°C für den Raumtyp „Hör-, bzw. Zuschauersäle“ berechnet. Auch hier konnte kein zeitlicher Anteil ermittelt werden, bei dem die relative Luftfeuchte möglicherweise 70% überschreitet. Im Gegensatz dazu ist der zeitliche Anteil für alle Standorte sehr hoch, bei dem eine relative Luftfeuchte von 30% potentiell unterschritten werden kann. Den geringsten zeitlichen Anteil weisen T12 und T13 mit unter 20% auf. Während für T05 und T06 bereits zu über zwei Dritteln der Zeit eine Gefährdung besteht, liegt diese für T02, T10 und T11 immer noch bei über der Hälfte und für alle übrigen Spielstätten zumindest bei einem Drittel des Messzeitraums.[13],[15],[17],[27],[28],[36],[60]

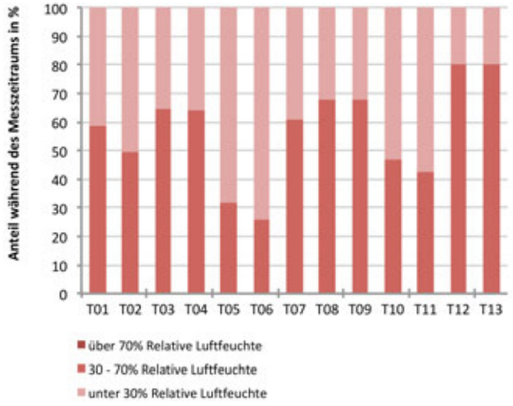

Abb. 49 Potentieller zeitlicher Anteil relativer Luftfeuchten für die Norminnenraumtemperatur in Abhängigkeit der absoluten Außenluftfeuchte

Literatur:
[13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009a)
[15] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2009)
[17] Bundesregierung (2014)
[27] Deutscher Wetterdienst (2018b)
[28] Deutscher Wetterdienst (2018c)
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2012b)
[60] Institut für Wohnen und Umwelt (2018)

5.3 Energetische Bewertung

5.3.1 Definition von Vergleichswerten und Ermittlung energetischer Kennwerte

Gemäß der Energieeinsparverordnung ist die Erstellung von Energieausweisen für öffentliche Gebäude verpflichtend. Sie dienen dazu, die Höhe des Energieverbrauchs einschätzen und verschiedene Gebäude gleicher Nutzung miteinander vergleichen zu können. Für bestehende Gebäude darf der Energieausweis auf Basis des Verbrauchs erstellt werden. Zur Beurteilung der Höhe des Energieverbrauchs sind in der „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Vergleichswerte zu unterschiedlichen Gebäudenutzungen für den Endenergieverbrauch für Strom sowie Heizung und Warmwasser angeben. Des Weiteren enthält die Bekanntmachung auch Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Energieverbrauchskennwerte und zur Witterungsbereinigung.
Die Energieverbrauchskennwerte werden als jährlicher Mittelwert aus dem Verbrauch über einen zusammenhängenden Zeitraum von mindestens 36 Monaten errechnet. Des Weiteren erfolgt die Spezifizierung des Werts anhand einer Energiebezugsfläche, die sich aus der Summe aller beheizten und gekühlten Nettogrundflächen eines Gebäudes ergibt. Zur Bildung des Energieverbrauchskennwerts für Heizung und Warmwasser müssen die Verbräuche zunächst witterungsbereinigt werden, um die Unterschiede zwischen den Witterungsbedingungen am Standort sowie zum Referenzstandort auszugleichen. Hierzu erfolgt die Multiplikation mit einem durch den deutschen Wetterdienst ermittelten Klimafaktor. Da jedoch nur der Verbrauchsanteil für die Beheizung witterungsabhängig ist, muss der Warmwasserbereitungsanteil vor der Witterungsbereinigung herausgerechnet werden. Sofern zum Gebäude keine weiteren Angaben vorliegen, kann dieser Anteil pauschal mit 5% des Verbrauchs angenommen werden. Im Anschluss an die Vorbereitung der Energieverbrauchskennwerte kann ein Vergleich mit den Werten aus der Bekanntmachung vorgenommen werden.
Die dort enthaltenen Vergleichswerte wurden für Nutzungen nach dem Bauwerkzuordnungskatalog auf Basis der Untersuchung und Auswertung Daten öffentlicher Gebäude ermittelt. Die Gebäudetypologie „Theaterspielstätte“ fällt hierbei unter die Nutzung „Opernhäuser, Theatergebäude“. Während für die EnEV 2007 für Heizung und Warmwasser noch 155 kWh/m²a und für Strom 60 kWh/m²a als Vergleichswert angesetzt worden sind, erfolgte mit der EnEV 2009 eine Reduzierung dieser auf 110 kWh/m²a und 40 kWh/m²a.

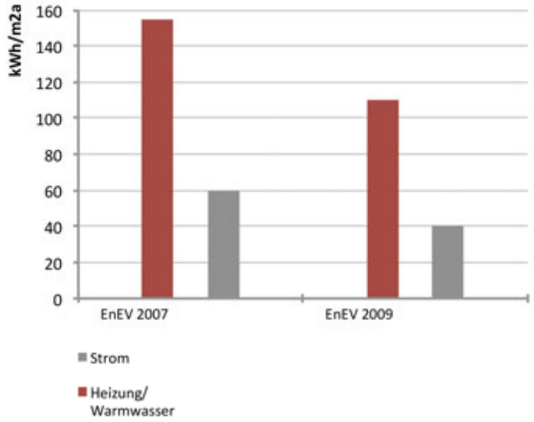

Abb. 50 Energieverbrauchskennwerte für die Nutzung „Opernhäuser, Theatergebäude“

5.3.2 Darstellung und Bewertung der Messergebnisse

5.3.2.1 Stromverbrauch

Im Folgenden werden die erfassten Stromverbräuche auf endenergetischer Ebene in den einzelnen Theaterspielstätten während des Messzeitraums analysiert und gegenübergestellt. Da sich die Messzeiträume in der Dauer und der Anzahl der währenddessen durchgeführten Vorstellungen unterscheiden, ist ein Vergleich des gesamtgemessenen Stromverbrauchs nicht möglich. Die nächstkleinere vergleichbare Einheit ist daher der erfasste Tagesstromverbrauch. Dieser liegt durchschnittlich zwischen 516 kWh/d in T06 und 6199 kWh/d in T08/09. Durch die Gegenüberstellung des geringsten und höchsten durchschnittlichen Tagesverbrauchs wird deutlich, dass sich diese in Abhängigkeit der Theaterspielstätte stark unterscheiden. Der geringste Verbraucher mit T06 benötigt täglich nur 8,3% des Stroms, den der größte Verbraucher beansprucht. Die Begründung für diese stark unterschiedlichen Verbräuche ist vor allem auf die unterschiedliche Größe der Häuser, den dort integrierten Nutzungen sowie den Technisierungsgrad zurückzuführen. So handelt es sich bei T08/09 um zwei vollwertige Spielstätten mit starkem räumlichen Bezug, der eine getrennte Strommessung unmöglich machte, sodass der hohe Stromverbrauch zu erklären ist. T06 ist dagegen eine Spielstätte mit einer geringen Nettogrundfläche und wenig stromintensiven Nutzungen.

Um die Größenordnung der täglichen durchschnittlichen Stromverbräuche der untersuchten Theaterspielstätten zu verdeutlichen, wurden die täglichen Stromverbräuche in Bezug zum durchschnittlichen Jahresstromverbrauch eines 2-Personenhaushalts von 3000 kWh/a gesetzt. Dies zeigt, dass der größte Verbraucher mit T08/09 bereits täglich mehr als das Doppelte an Strom des Referenzhaushalts benötigt.

Zur Beurteilung, ob es sich während des Messzeitraums um einen stromintensiven Verbrauchszeitraum handelt, wurde das Verhältnis des durchschnittlichen Tagesstromverbrauchs zum Gesamtstromverbrauch des Jahres der Messung betrachtet. Bei einer gleichmäßigen Verteilung des Stromverbrauchs auf alle Tage des Jahres ergibt sich ein täglicher Stromverbrauchsanteil von 0,27%. Für die betrachteten Theaterspielstätten variieren die Tagesverbrauchsanteile zwischen 0,12% in T03 und 1,2% in T08/09. Anhand dieser Ergebnisse zeigt sich, dass der gleichmäßige Stromverbrauchsanteil von 0,27% in allen Theaterspielstätten mit Ausnahme von T03 überschritten wird und es sich bei den Tagen im Messzeitraum um stromverbrauchsintensive Tage handelt. Für die Spielstätten T01 und T05 können dazu keine Aussagen getroffen werden, da keine Lastgänge vorliegen.

Bei einer Betrachtung der erfassten Spitzen- und Minimalverbräuche während des Messzeitraums zeigen sich, ebenso wie bei der Gegenüberstellung der durchschnittlichen Tagesstromverbräuche, große Unterschiede. Während der Spitzenverbrauch in T08/09 mit 7171 kWh/d erfasst wurde, liegt dagegen der geringste gemessene Verbrauch in T06 bei lediglich 215 kWh/d.

Die unterschiedlichen Theaterspielstätten zeigen bereits starke Unterschiede bezüglich des Stromverbrauchs. Als nächstes wurden die Schwankungen der Tagesverbräuche der einzelnen Häuser betrachtet. Eine Gegenüberstellung des minimal und maximal erfassten Tagesverbrauchs für jede Theaterspielstätte macht deutlich, dass dieser ebenfalls starken Schwankungen unterliegt. Das Verhältnis des minimalen zum maximalen Tagesverbrauch während des Messzeitraums beträgt zwischen 28% in T05 und 80,7% in T11. Im Mittel über alle Theaterspielstätten ergibt sich eine Schwankung zwischen minimalen und maximalen Verbrauch von 53,3%. Auch hier lassen sich die Extreme über die Nutzung der jeweiligen Theaterspielstätten erklären. In T05 findet an sechs Wochentagen die Aufführung eines Stückes statt. Der siebte Wochentag ist ein Ruhetag, sodass neben wenigen technischen Wartungsarbeiten keine Frequentierung besteht. Folglich ergibt sich ein großer Unterschied zwischen dem minimalen Verbrauch, der an einem Leerstandstag erfasst wurde und dem

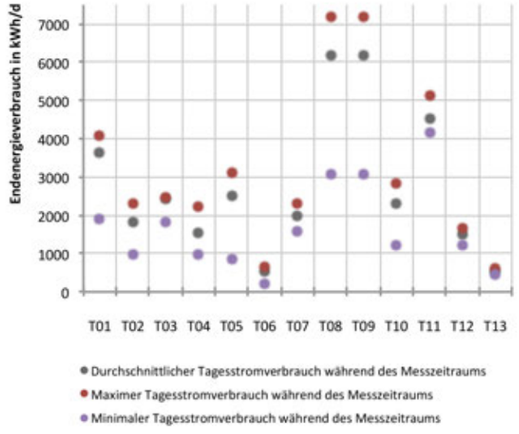

Abb. 51 Absoluter Tagesstromverbrauch während des Messzeitraums

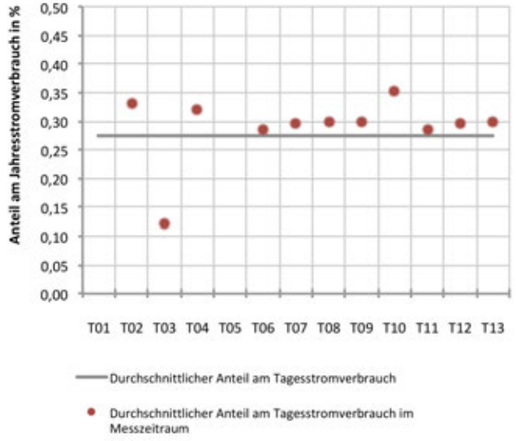

Abb. 52 Anteil des durchschnittlichen Tagesstromverbrauchs am Jahresstromverbrauch

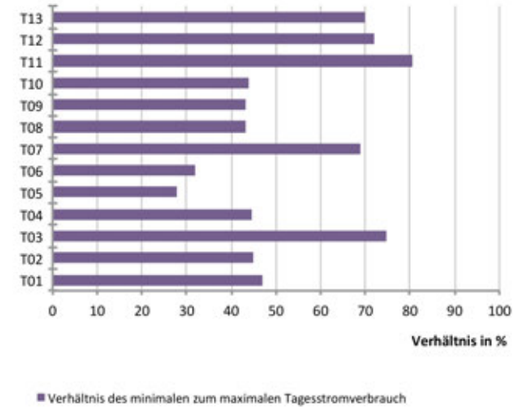

Abb. 53 Verhältnis des minimalen zum maximalen Tagesstromverbrauch während des Messzeitraums

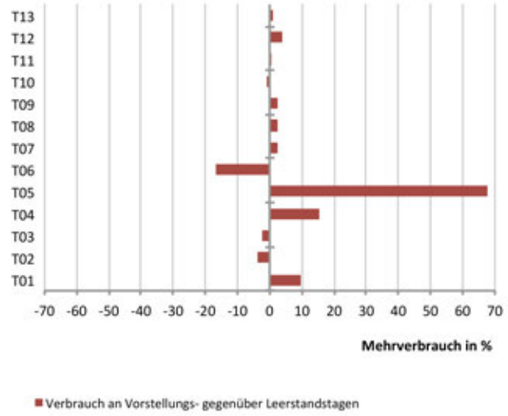

Abb. 54 Verhältnis des Verbrauchs an Vorstellungs- gegenüber Leerstandstagen

maximalen Verbrauch.
Einen starken Einfluss auf den Stromverbrauch von Theaterspielstätten üben die Luftförderung sowie die Bühnenbeleuchtung [siehe 5.4.1] aus. Beide Verbraucher sind besonders an Vorstellungstagen aktiv, sodass im nächsten Schritt der Verbrauch an Vorstellungs- und Leerstandstagen gegenübergestellt wird. Hier zeigt sich, dass in den meisten Theaterspielstätten ein höherer Verbrauch an Tagen mit Vorstellung vorliegt. Diese Aussage trifft auf T01, T04, T05, T07, T08, T09, T11, T12 und T13 zu, auch wenn die Höhe des durchschnittlichen Mehrverbrauchs an Vorstellungstagen stark variiert. Dieser liegt zwischen 0,1% in T11 und 67,6% in T05. Auch hier ist die Ursache in der Art der Nutzung begründet. Die Spielstätten T04, T11, T12 und T13 verfügen über ausgelagerte Werkstätten, sodass keine regelmäßigen energieintensiven Nutzungen außerhalb der Vorstellungszeiten stattfinden. Außerdem besteht in T04 durch einen Zusammenschluss mehrerer Theater außerhalb von Vorstellungstagen nur eine geringe Frequentierung, da es sich nicht um den Hauptaufenthaltsort des Ensembles handelt. In T01 ist eine extrem hohe Anschlussleistung der Bühnenbeleuchtung zu verzeichnen sowie eine stromintensive Foyerbeleuchtung durch zwei Kronleuchter. Die Spielstätten T08 und T09 zeigen einen hohen Technisierungsgrad, der durch die vielen Lüftungsanlagen, die alle innenliegenden Räume versorgen, und die flächendeckende Kälteversorgung zustande kommt.
In T02, T03, T06 und T10 zeigt sich dagegen ein anderes Bild. Hier fällt der Verbrauch an Tagen ohne Vorstellungen zwischen 0,9% in T10 und 16,9% in T06 höher aus. Fast alle diese Häuser verfügen über einen überdurchschnittlich hohen Flächenanteil hausinterner Werkstätten unterschiedlicher Gewerke [siehe 5.1.1], die werktags regelmäßigen Nutzungszeiten unterliegen. Da die Vorstellungen überwiegend am Wochenende stattfinden, wo eine verringerte Frequentierung der Werkstätten vorliegt, gleichen sich die Stromverbräuche für Vorstellung und Werkstätten vermutlich aus.
Bisher erfolgte der Vergleich der Theaterspielstätten auf Basis des absoluten Stromverbrauchs. Damit eine Berücksichtigung der stark unterschiedlichen Größen der Theaterspielstätten erfolgt und so ein effektiver Vergleich der Theaterspielstätten untereinander möglich ist, wird der tägliche Stromverbrauch auf die Energiebezugsfläche bezogen. So ergibt sich ein durchschnittlicher Tagesstromverbrauch zwischen 0,09 kWh/m²d in T03 sowie T13 und 0,31 kWh/m²d in T01. Die Spannweite des Stromverbrauchs unter den Theaterspielstätten beträgt somit 0,22 kWh/m²d. Gegenüber dem maximalen Verbrauch beträgt der minimale Verbrauch lediglich 29,6%. Trotz Berücksichtigung der Gebäudefläche bestehen große Unterschiede beim Stromverbrauch, welche auf die beschriebenen komplexen Einflussfaktoren zurückzuführen sind.[100]

Literatur:
[100] Statista GmbH (2018)

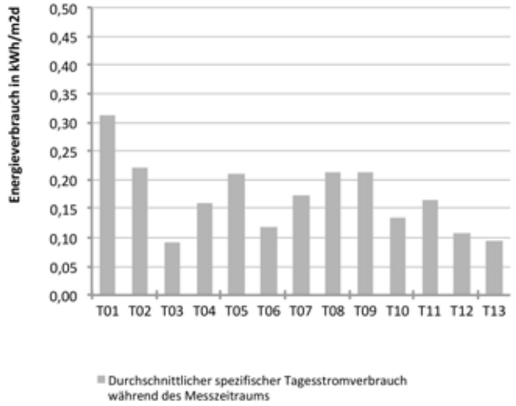

Abb. 55 Durchschnittlicher spezifischer Tagesstromverbrauch während des Messzeitraums

5.3.2.2 Lastgang

Mit Hilfe der Analyse des Lastgangs können Aussagen dazu getroffen werden, wie hoch die auftretenden Lasten sind und zu welchen Zeiten sie auftreten. Auf Basis dieser Erkenntnisse können Maßnahmen zur Reduzierung der Lasten abgeleitet werden, um Lastspitzen und auch den Energieverbrauch zu verringern.
Die Grundlasten liegen im Messzeitraum zwischen 4,5 kW in T13 und 48,7 kW in T08/T09. Bei T08/T09 handelt es sich um zwei Spielstätten, bei denen aufgrund des engen räumlichen Zusammenhangs nur ein gemeinsamer Lastgang erfasst wird. Da somit zwei Theaterspielstätten und eine größere Gebäudefläche versorgt werden müssen, entsteht die hohe Grundlast. Ebenfalls hoch ist die Grundlast in T11 mit 48,0 kW. Diese Spielstätte ist als Doppelanlage konzipiert, sodass sich zwei große Säle, inklusive der zugehörigen Funktionsbereiche sowie der technischen Ausstattung, unter einem Dach befinden. Mit einer Grundlast von lediglich 4,5 kW in T13 und 6,6 kW in T06 liegen diese unter der Grundlast der anderen betrachteten Spielstätten. Bei beiden Spielstätten handelt es sich um Häuser mit vergleichsweise geringer Nettogrundfläche sowie einem niedrigen Technisierungsgrad, da beide Häuser nur über wenige Lüftungs- und Kälteanlagen mit geringen Anschlussleistungen verfügen.
Die Spitzenlasten erreichen zwischen 76,2 kW in T06 und 554,6 kW in T08/09. Auch hier zeigt sich, dass die „Doppelanlagen“ höhere Spitzenlasten aufweisen und die Spielstätten mit niedrigen Nettogrundflächen geringe Spitzenlasten haben. Die Durchschnittslasten betragen zwischen 21,6 kW in T06 und 262,0 kW in T08/09. Die Höhe der Durchschnittslast wird von vielen Faktoren bestimmt. Zu diesen zählen die Nettogrundfläche der Theaterspielstätten, die Nutzung sowie der Technisierungsgrad.

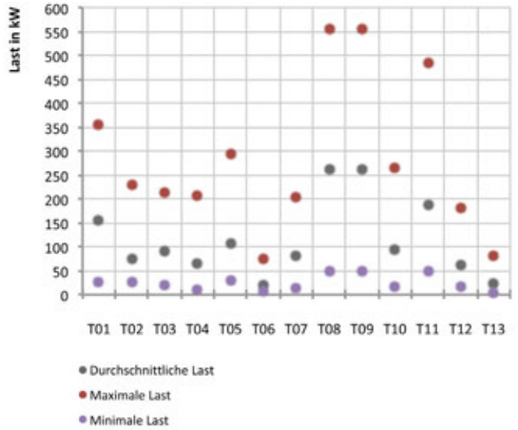

Abb. 56 Maximal-, Minimal- und Durchschnittslasten im Stromlastgang

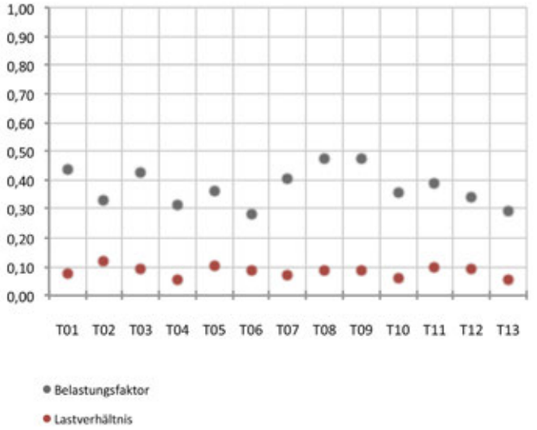

Abb. 57 Belastungsfaktor und Lastverhältnis im Stromlastgang

Zur Beurteilung der Lastschwankung wurde der Belastungsfaktor gebildet, der das Verhältnis der mittleren Last zur Höchstlast wiedergibt. Je konstanter die Last, desto stärker nähert sich der Belastungsfaktor 1,0 an. In den untersuchten Theaterspielstätten liegen die Belastungsfaktoren zwischen 0,28 in T06 und 0,47 in T08/09. Somit zeigt das Ergebnis, dass in allen Spielstätten starke Schwankungen vorliegen, die sich durch die hohen Lasten während der Vorstellungen ergeben. Zu Vorstellungszeiten erzeugen die szenische Beleuchtung sowie der Betrieb der Lüftungsanlagen eine hohe Last. Sichtbar wird dieser Zusammenhang auch in der grafischen Darstellung des Lastgangs, da die Spitzenlasten mit den Vorstellungszeiten korrelieren.

Deutlich wird die Inkonstanz der Stromlast bei Betrachtung des Lastverhältnisses, welches das Verhältnis von Grund- zu Höchstlast abbildet. Auch hier gilt, je näher das Ergebnis sich 1,0 annähert, desto geringer ist der Unterschied zwischen Grund- und Höchstlast. In den betrachteten Theaterspielstätten bewegt sich das Lastverhältnis zwischen 0,06 in T10 und T13 und 0,12 in T02. Dieses Ergebnis zeigt, dass sehr große Unterscheide zwischen Grund- und Spitzenlast bestehen.

Ein Vergleich der Theaterspielstätten lässt sich durch die Klassifizierung der auftretenden Lasten in drei Bereiche vornehmen. In den Spitzenlastbereich werden Messwerte einsortiert, welche die Mittellast um mindestens eine Standardabweichung überschreiten. Der Grundlastbereich enthält die Messwerte, welche die Mittellast um mindestens eine Standardabweichung unterschreiten und der Mittellastbereich umfasst alle Messwerte, die sich um eine Standardabweichung nach oben und nach unten um den Mittelwert bewegen. Nachdem die Einsortierung der Messwerte in die Bereiche erfolgt ist, zeigt sich, dass im Spitzenlastbereich mit 13,6% in T11 bis 26,8% in T05 die wenigsten Werte auftreten. Etwas mehr Messwerte befinden sich im Grundlastbereich mit 18,8% in T02, bzw. T13 und 29,4% in T12. Eine Ausnahme bildet hier T05, da dem Grundlastbereich keine Werte zugeordnet werden können. Im Mittellastbereich treten mit 55,0% in T01 bis 73,2% in T05 die meisten Werte auf.

Anhand der Verteilung der Messwerte auf die drei Bereiche bilden sich vier Gruppen heraus, denen alle Theaterspielstätten zugeordnet werden können. Bei der größten Gruppe, welche T01, T03, T07, T08, T09, T10, T11 und T12 enthält, beträgt der prozentuale Anteil im Mittellastbereich mehr als 55%. Im Grundlastbereich liegt der Anteil über 24% und im Spitzenlastbereich ist er um mindestens 8% geringer als im Grundlastbereich.

Eine weitere Gruppe bilden T02 und T13. Hier nimmt der Mittellastbereich mit etwa 65% einen deutlich größeren Anteil ein. Dafür zeigt der Spitzenlastbereich nur noch einen Anteil von etwa 15% und im Grundlastbereich liegt er nur minimal darüber.

In der dritten Gruppe mit T04 und T06 sind die Anteile

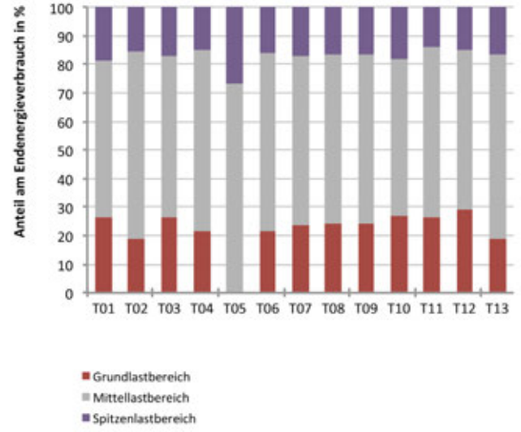

Abb. 58 Prozentualen Verteilung der Lasten auf Grund-, Mittel- und Spitzenlastbereich

im Grund- und Spitzenlastbereich unterschiedlicher. Über 20% der Werte können dem Grundlastbereich zugeordnet werden, während im Spitzenlastbereich nur ca. 15% der Werte einzuordnen sind. Mehr als 60% befinden sich im Mittellastbereich.

Einen charakteristischen Unterschied zu den vorher beschriebenen Gruppen weist T05 auf, da sich die Messwerte ausschließlich auf Mittel- und Spitzenlastbereich verteilen. Hierbei sind fast Dreiviertel in den Mittellastbereich einzuordnen und nur ein Viertel entfällt auf den Spitzenlastbereich. Inhaltlich ist dies darüber zu erklären, dass es sich bei T05 um die einzige betrachtete Spielstätte handelt, die im EnSuite-Betrieb geführt wird. Dies geht damit einher, dass während des Messzeitraums immer die gleiche Vorstellung aufgeführt wurde und die wöchentliche Vorstellungsanzahl weitaus höher ist, als in den anderen Häusern. Hierdurch leiten sich sehr

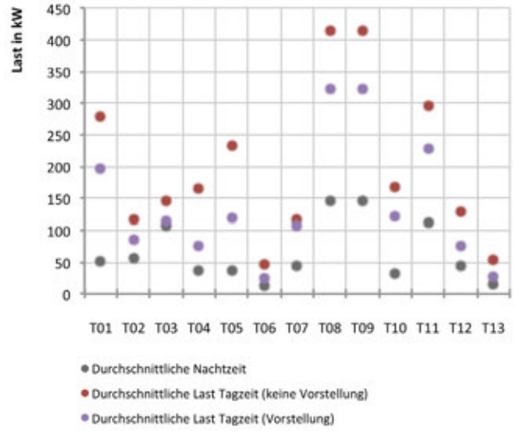

Abb. 59 Durchschnittslasten in Abhängigkeit der Tageszeiten

gleichmäßige Tages- und Wochenprofile ab.

In Theaterspielstätten lässt sich anhand der Nutzungszeiten der verschiedenen Gebäudebereiche der Tag in drei Zeitabschnitte gliedern. Während der Nachtzeit, welche etwa von 00.00 Uhr bis 8.00 Uhr andauert, ist das Gebäude ungenutzt. Die Durchschnittslasten reduzieren sich dementsprechend und liegen zwischen 12,6 kW in T06 und 144,7 kW in T08/09. Tagsüber, außerhalb der Vorstellungen und im Zeitraum von 8.00 Uhr bis 24.00 Uhr erhöht sich die Durchschnittslast auf 25,9 kW bis 323,3 kW. Hier finden Arbeiten in den Werkstätten, auf der Bühne sowie der Verwaltung statt und der Probenbetrieb läuft. Während der Vorstellungen, deren Beginn und Dauer variabel sind, treten mit 47,5 kW bis 414,5 kW die höchsten Durchschnittslasten auf. Zu diesen Zeiten sind die Beleuchtungslasten hoch und die technischen Anlagen, zu denen die Lüftungsanlagen und je nach Haus auch Kältemaschinen gehören, sind aktiv.

Betrachtet man das Verhältnis der Durchschnittslasten zu den unterschiedlichen Tageszeiten, so zeigt sich, dass die Durchschnittslast während der Nachtzeit gegenüber der Durchschnittslast zur Tagzeit ohne Vorstellungen nur von 26,4% in T01 bis 92,2% in T03 beträgt. Die Durchschnittslast während der Tagzeit mit Vorstellungen gegenüber der Tagzeit ohne Vorstellungen liegt zwischen 110,6% in T07 und 216,2% in T04. Die Lasten sind im Verlauf des Tages also recht unterschiedlich.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Lasten innerhalb der Spielstätten in Abhängigkeit der Nettogrundfläche, der Nutzung und des Technisierungsgrads stark variieren. Zu Vorstellungszeiten treten durchschnittlich die größten Lasten auf und insgesamt zeigen sich große Lastschwankungen im Tagesverlauf.[71]

Literatur

[71] Kleber, M.; Hartloff, M., Wagner, A.

5.3.2.3 Standardlastprofile für Strom

Standardlastprofile sind repräsentative Lastprofile für eine bestimmte Nutzungsgruppe und dienen als Hilfestellung zur Prognose des Energieverbrauchs ohne tatsächliche Messung der Leistung. Eine Messung der Leistung im Viertelstundentakt durch den Energieversorger erfolgt nur bei Sonder- und Großkunden. Da Theaterspielstätten zu letzteren zählen, ist die Erstellung eines Standardlastprofils aus Sicht des Energieversorgers nicht notwendig. Zur Analyse des Stromverbrauchs im Zusammenhang mit der Nutzung ist die Erstellung eines Standardlastprofils für Theaterspielstätten jedoch hilfreich. Hierzu erfolgt zunächst eine Festlegung von Typtagen, für die jeweils ein charakteristisches Lastprofil erstellt wird. Hierbei wird eine Kategorisierung aller Tage nach Faktoren, die den Energieverbrauch beeinflussen, vorgenommen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus vorangegangenen Analysen wurden für die Theaterspielstätten 10 Typtage definiert.

Zunächst erfolgte die Differenzierung zwischen den Jahreszeiten, wobei lediglich eine Gliederung des Jahres in Sommer für die Monate April bis September und Winter von Oktober bis März vorgenommen wurde. Vor allem im Sommer bei hohen Außentemperaturen kann es notwendig sein, Bereiche des Theaters, wie beispielsweise den Zuschauersaal sowie Proberäume, mechanisch zu kühlen, sodass ein Einfluss auf den Stromverbrauch besteht.

Darüber hinaus fand eine Unterscheidung zwischen Ferien- und Nutzungszeiten statt. In den Ferienzeiten lässt sich ein deutlich geringerer Energieverbrauch feststellen, da zu diesen Zeiten keine Vorstellungen terminiert sind und somit die Lastspitzen deutlich geringer ausfallen. Weiterhin wurde in der Nutzungszeit zwischen Tagen ohne Vorstellung (Leerstandstage) und mit Vorstellung (Vorstellungstage) unterschieden. An Vorstellungstagen fallen besonders während der Vorstellungen hohe Lasten durch szenische Beleuchtung und Klimatisierung des Zuschauersaals an. Es besteht somit die Erwartung, dass sich die Lastprofile an Vorstellungs- und Leerstandstagen stark unterscheiden. Für Vorstellungstage wurde außerdem zwischen den Wochentagen unterschieden. An Wochentagen sind die Verwaltungsbereiche sowie die Werkstätten regelmäßig und zu festen Kernzeiten frequentiert. Am Wochenende ist dies jedoch nur bedarfsabhängig der Fall, sodass ein reduzierter Energieverbrauch für Arbeitshilfen vorhanden ist. Die Vorstellungen am Wochenende finden, je nachdem ob es sich um einen Samstag oder einen Sonntag handelt, zu verschiedenen Uhrzeiten statt. In der Regel sind diese sonntags früher angesetzt als samstags, sodass zu vermuten ist, dass sich dies ebenfalls im Lastgang abbildet.

Pro betrachteten Gebäude wurden zwei repräsentative Lastgänge bestimmt, aus denen in einem späteren Schritt das Standardlastprofil ermittelt wurde. Zur Herbeiführung einer Vergleichbarkeit zwischen den Lastverläufen, unabhängig der absoluten Höhe der Last, wurden diese zunächst normiert. Die Normierung erfolgte, indem der gesamte Tagesverbrauch bestimmt und anschließend eine Division des viertelstündlichen Verbrauchs mit dem Tagesverbrauch vorgenommen wurde. Die so ermittelten Werte bilden prozentualen Anteil am Tagesverbrauch ab.

Die Auswahl der repräsentativen Lastgänge für ein Gebäude wurde vorgenommen, indem aus allen, dem jeweiligen Typtag zugeordneten Lastgängen, ein Durchschnittslastgang berechnet wurde. Die Lastkurven, welche im Mittel am wenigsten vom Durchschnittslastgang abweichen, gelten als repräsentative Lastgänge für das jeweilige Gebäude. Das gleiche Verfahren wurde auf die repräsentativen Lastgänge angewendet, um das Standardlastprofil zu ermitteln.

Betrachtet man die auf diese Weise entstandenen Standardlastprofile, so ist festzustellen, dass für bestimmte Zeitspannen unabhängig von den Typtagen charakteristische Verläufe vorhanden sind. Zwischen 1.30 Uhr und 6.15 Uhr tritt der geringste Verbrauch des Tages auf, der sich in dieser Zeit sehr konstant verhält, da hier nur die Grundversorgung des Gebäudes erfolgt. Ab 6.15 Uhr bis 8.00 Uhr ist dann ein erster leichter Anstieg des Verbrauchs zu verzeichnen. Zu diesem Zeitpunkt ist mindestens 10% des Tagesverbrauchs bereits angefallen. In der Zeitspanne von 8.00 Uhr bis 22.00 Uhr, welche die Hauptnutzungszeit der Gebäude darstellt, entwickelt sich der Verbrauch in

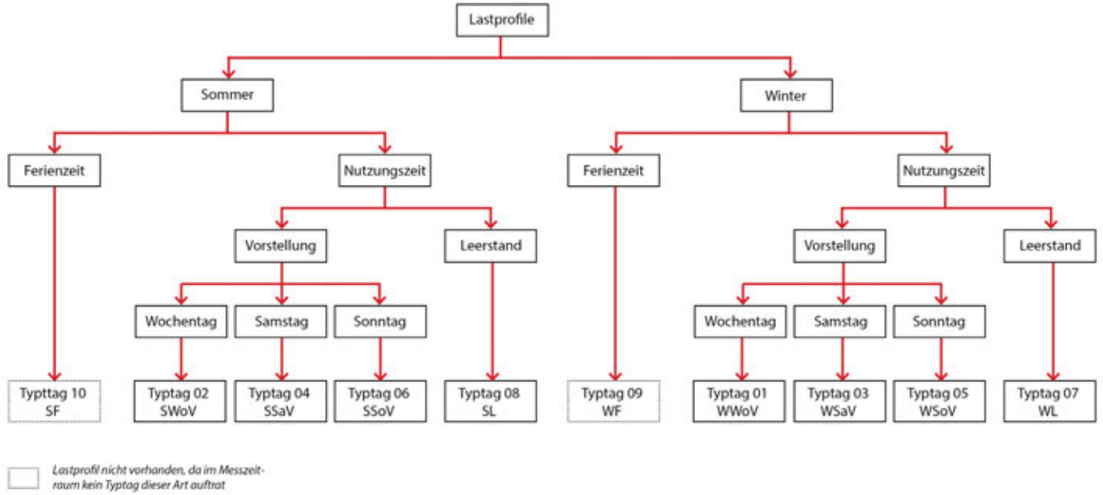

Abb. 60 Schema zur Definition der Standardlastprofile für Theaterspielstätten

Abhängigkeit des Typtags sehr unterschiedlich. Ab 22.00 Uhr ist dann bei allen Standardlastprofilen ein starkes Absinken des Verbrauchs bis 1.30 Uhr zu beobachten.
Das Standardlastprofil der Typtage 01, 02, 03, 04, 07, 08 und 11 zeigen eine Gliederung des Zeitraums zwischen 8.00 Uhr und 22.00 Uhr in zwei Tagesabschnitte. Der erste vormittägliche Abschnitt dauert bis etwa 13.30 Uhr an und zeigt ein konstant hohes Niveau. Ihren Höhepunkt erreicht die Verlaufskurve etwa zur Hälfte der Zeit. Hier ist 25% des Tagesstromverbrauchs bereits verzeichnet worden. Abschließend sinkt der Verbrauch leicht ab, bis um 13.30 Uhr ein sichtbares Minimum erreicht wird. Hier beträgt der Tagesverbrauch bereits etwas über 40%. Das mittäglich auftretende Minimum lässt sich sowohl über die Mittagspause der Beschäftigten in Werkstätten und Verwaltung als auch über das Ende der ersten Probezeit erklären.

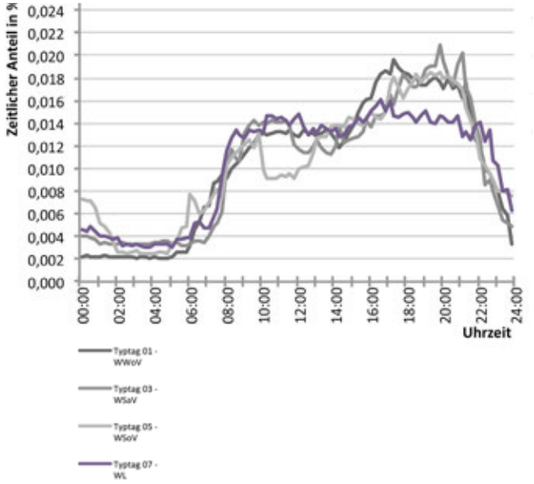

Abb. 61 Standardlastprofile für Theaterspielstätten auf Basis der Messergebnisse für den Winter

Der zweite nachmittägliche Tagesabschnitt ist für die oben genannten Typtage nicht einheitlich darstellbar.
Für die Typtage 01 und 02 erfolgt nach 13.30 Uhr erneut ein starker Anstieg des Verbrauchs, der gegen 17.15 Uhr seinen Höhepunkt erreicht und deutlich über dem Höhepunkt des ersten Tagesabschnitts liegt. Zu diesem Zeitpunkt wurden 60% des am Tag benötigten Stroms verbraucht. Anschließend fällt der Verbrauch leicht ab, da nun zwar die Vorbereitungen für die Vorstellung beginnen, aber die Kernarbeitszeit in Verwaltung und Werkstätten beendet ist.
Die Typtage 03 und 04 zeigen nach 13.30 Uhr einen geringeren, dafür aber kontinuierlichen Anstieg, bis um etwa 19.45 Uhr das Tagesmaximum auftritt und 80% des Tagesstroms verbraucht sind. Anschließend fällt der Verbrauch bis 22.00 Uhr leicht ab.
Das veränderte Verhalten gegenüber Typtag 01 und 02 ist

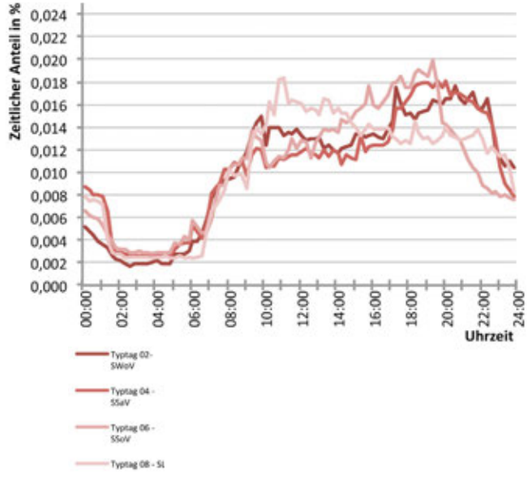

Abb. 62 Standardlastprofile für Theaterspielstätten auf Basis der Messergebnisse für den Sommer

darauf zurückzuführen, dass samstags eine geringere und nicht so geregelte Frequentierung der Verwaltungs- und Werkstattbereiche stattfindet, sodass die kontinuierlichen Verbrauchsanteile für Arbeitshilfen entfallen.
Für alle bisher betrachteten Lastprofile konnte in Abhängigkeit der Jahreszeit kein charakteristischer Unterschied festgestellt werden. Dies kann jedoch daran liegen, dass die Messzeiträume hauptsächlich auf die Monate März/April und Oktober/November beschränkt waren und die Messungen somit in den Übergangszeiten stattfanden. In Hinblick auf die Außenlufttemperatur waren zwischen den als „Sommer“ und als „Winter“ definierten Zeiten also keine großen Unterschiede vorhanden.
Obwohl die Typtage 07 und 08 beide Leerstandstage abbilden, verhalten sich diese im zweiten Tagesabschnitt unterschiedlich. Während bei Typtag 07 nach dem Minimum um 13.30 Uhr bis 17.00 Uhr wieder ein leichter

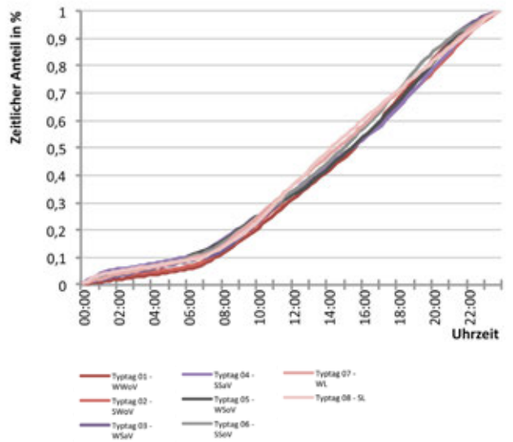

Abb. 63 Kumulativer Energieverbrauch in Abhängigkeit der Typtage

Anstieg zu erkennen ist, fällt der Verbrauch bei Typtag 08 am Nachmittag kontinuierlich leicht ab. Dies lässt sich darüber erklären, dass Typtag 07 aus repräsentativen Lastgängen gebildet wurde, die unterschiedliche Wochentage abbilden. Der zweite Anstieg am Nachmittag ist auf die Arbeitsabläufe in Werkstätten und Verwaltung zurückzuführen. Anders als bei Typtag 07 wurde das Standardlastprofil für Typtag 08 aus repräsentativen Lastgängen erstellt, die fast ausschließlich auf Montage fallen. Da in Theaterspielstätten vor allem auch am Wochenende Vorstellungen stattfinden, ist der Betrieb montags oftmals reduziert. Dies lässt sich auch über die Erkenntnisse aus [5.3.3.1] belegen, welche zeigen, dass montags im Verhältnis zu anderen Wochentagen unter der Woche, unabhängig ob es sich um Ferien- oder Nutzungszeiten handelt, ein geringerer Stromverbrauch vorliegt. Im Gegensatz zu den anderen Typtagen ist bis 13.30 Uhr auch 5% mehr Strom verbraucht worden. Erst mit Beginn der Vorstellungen um 19.30 Uhr nähert sich der Anteil am Stromverbrauch wieder an.
Für Typtag 05 und 06 findet ab 8.00 Uhr eine kontinuierliche Steigerung des Verbrauchs statt, die bis etwa 19.15 Uhr andauert. Während sich bei Typtag 05 der Verbrauch anschließend bis 20.15 Uhr auf einem konstant hohen Niveau befindet, fällt der Verbrauch bei Typtag 06 bereits direkt nach Erreichen des Maximums ab. Das sich stark von allen anderen Typtagen unterscheidende Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass es sich um Sonntage handelt, bei denen die Gebäude hauptsächlich für die Vorstellungen genutzt werden.
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für Theaterspielstätten in Abhängigkeit des Nutzungszustands sowie des Wochentags Lastprofile definiert werden können, anhand derer sich die Verteilung des Energieverbrauchs über den Tag abschätzen lässt.[73],[81]

Literatur:
[73] Kumpf, L. (2016)
[81] Meier, H. et. Al. (1999)

5.3.2.4 Verbrauch für Heizung und Warmwasser

Wie bereits unter Punkt [5.3.3.1] erläutert, kann auch der Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser nicht über den Gesamtzeitraum der Messungen betrachtet werden, sondern nur tageweise. Aufgrund der verwendeten Messtechnik sowie der Bedingungen vor Ort konnte nicht in allen Spielstätten der Verbrauch für Heizung und Warmwasser erfasst werden. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich daher lediglich auf die Spielstätten T01, T05, T07, T08, T09, T10, T11, T12, T13.
Die betrachteten Spielstätten werden überwiegend über Fernwärme versorgt. Eine Ausnahme stellen T07 und T10 dar. Für beide Spielstätten erfolgt die Versorgung über Erdgas. In den über Fernwärme versorgten Spielstätten wurden während der Messungen teilweise negative Wärmemengen erfasst. Es wird vermutet, dass es sich hierbei um Rückflussströmungen im System handelt, die sich jedoch über den Verlauf des Messzeitraums durch erhöhte positive Werte ausgleichen haben.
In den verschiedenen Spielstätten wurden durchschnittliche Tagesendenergieverbräuche für Heizung und Warmwasser zwischen 634 kWh/d in T13 und 8648 kWh/d in T11 gemessen. Die erfassten Minima bewegen sich zwischen 287 kWh/d in T09 und 6728 kWh/d in T10. Dagegen liegen die Maxima im Bereich von 2265 kWh/d in T12 bis 14.027 kWh/d in T11.
Der Energieverbrauchsanteil für die Heizung steht üblicherweise in Abhängigkeit zu den Außentemperaturen. Erste Hinweise, ob es sich beim Messzeitraum um einen verbrauchsintensiven Zeitraum handelt, können aus der Gegenüberstellung des durchschnittlichen Tagesverbrauchs mit dem Jahresverbrauch abgeleitet werden. Bei einer gleichmäßigen Verteilung des Endenergieverbrauchs für Heizung und Warmwasser über das Jahr würde pro Tag ein Verbrauchsanteil von 0,27% anfallen. Die Betrachtung des durchschnittlichen Verbrauchsanteils über den Messzeitraum zeigt sehr unterschiedliche Ergebnisse. Während in T13 mit 0,11% ein unterdurchschnittlicher Verbrauch vorliegt, zeigt T05 mit einem Verbrauchsanteil von 0,62% einen erhöhten Verbrauch. Beide Theaterspielstätten zeigen durchschnittliche Tagesmitteltemperaturen unter der Heizgrenztemperatur von 15°C, sodass in beiden Spielstätten eine Beheizung erforderlich erscheint. Die durchschnittliche Tagesmitteltemperatur am Standort von T13 liegt mit 9,53°C ein wenig über der am Standort von T05 mit 7,76°C.
Eine weitere Überprüfung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Tagesaußentemperatur und dem Tagesendenergieverbrauch ergab Korrelationen zwischen 0,15 in T13, was einem sehr schwachen linearen Zusammenhang entspricht, und -0,86 in T05, was als sehr starker linearer Zusammenhang zu bewerten ist. Mit Ausnahme von T13 liegen in allen Spielstätten negative Korrelationen vor, die so zu interpretieren sind, dass bei geringeren Außentemperaturen tendenziell der Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser steigt. Neben T13 ist T07 die einzige Spielstätte, die nicht mindestens einen mittleren linearen Zusammenhang zwischen den beiden Wertepaaren aufweist.
Auf Basis der hohen vorhandenen Korrelationen zwischen Außentemperatur und Endenergieverbrauch wird deutlich, dass zur Vergleichbarkeit der Spielstätten eine Klimabereinigung des Verbrauchs erfolgen muss. Anders als bei einer gesamtjährlichen Betrachtung kann die Klimabereinigung für die Tagesverbräuche nicht über die Klimafaktoren des Deutschen Wetterdienst durchgeführt werden. Um dennoch eine Klimabereinigung durchzuführen, kann das Verfahren zur Bildung der Klimafaktoren modifiziert werden. Zunächst werden die Gradtage mittels der Monatsdurchschnittstemperatur über einen

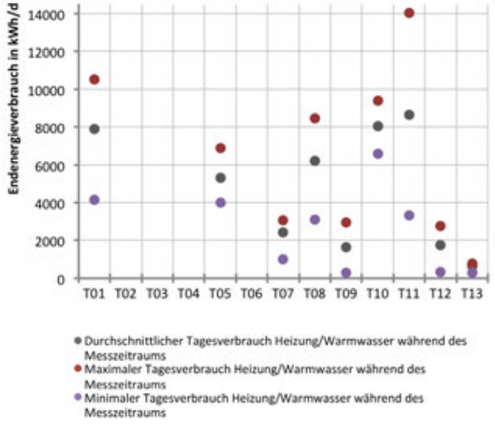

Abb. 64 Absoluter Tagesverbrauch für Heizung/Warmwasser während des Messzeitraums

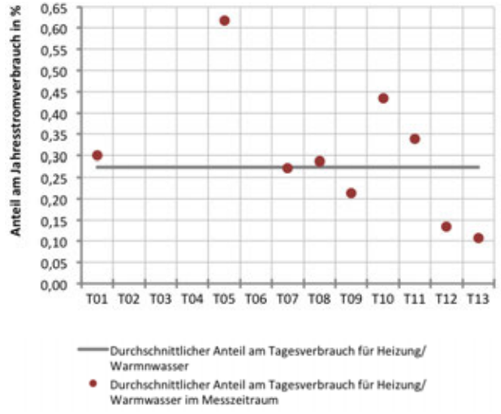

Abb. 65 Anteil des durchschnittlichen Tagesverbrauchs für Heizung/ Warmwasser am Jahresverbrauch

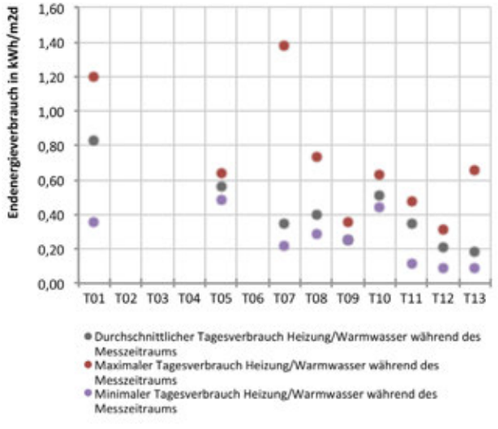

Abb. 66 Spezifischer und klimabereinigter Tagesverbrauch für Heizung/Warmwasser während des Messzeitraums

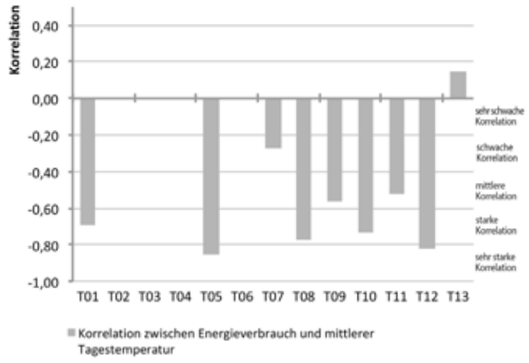

Abb. 67 Korrelationskoeffizient der mittleren Tagesaußenlufttemperatur und dem Tagesenergieverbrauch für Heizung/Warmwasser

Tag am Referenzstandort Potsdam für den Monat März ermittelt. Anschließend werden die Gradtage auf Basis der mittleren Tagesaußentemperatur für jeden Messtag berechnet und denen des Referenzstandorts gegenübergestellt. Der so erzeugte Faktor kann mit dem jeweiligen Tagesverbrauchsanteil für die Heizung multipliziert werden, sodass sich anschließend klimabereinigte Tagesverbräuche ergeben.

Die so ermittelten Tagesdurchschnittsverbräuche für die betrachteten Theaterspielstätten liegen zwischen 1081 kWh/d in T13 und 9593 kWh/d in T01. Der größte Verbraucher benötigt im Verhältnis zum kleinsten Verbraucher somit die 8,9-fache Menge an Energie.

Um den Energieverbrauch zu spezifizieren und somit die unterschiedliche Größe der Theaterspielstätten zu berücksichtigen, erfolgt der Bezug des Energieverbrauchs auf die Nettogrundfläche. So lassen sich Verbräuche zwischen 0,19 kWh/m²d in T13 und 0,83 kWh/m²d in T01 feststellen. Durch die Spezifizierung des Verbrauchs haben sich zwar die Minimal- und Maximalverbraucher nicht geändert, aber das Verhältnis hat eine leichte Angleichung erfahren. Unter Berücksichtigung der Nettogrundfläche verbraucht T01 im Messzeitraum nun noch 4,4 Mal so viel Energie wie T13. Der immer noch erhebliche Unterschied zwischen den Spielstätten lässt sich über den unterschiedlichen Zustand der Gebäudesubstanz erklären. T01 befindet sich in einem sanierungsbedürftigen Zustand, der auch bereits in der Öffentlichkeit diskutiert wird. Während der Begehung wurden in diesem Haus sehr hohe Temperaturen wahrgenommen, die auch durch große Wärmeverluste der geringfügig gedämmten Wärmeverteilung innerhalb des Gebäudes entstehen. In T13 ist im Zuge eines Energiecontractings bereits ein Austausch der Anlagentechnik erfolgt. Ebenfalls niedrig ist der spezifische Energieverbrauch in T12 und T09. Genau wie in T13 erfolgte in T12 eine Erneuerung der Anlagentechnik mit anschließendem Energiecontracting. Eine umfangreiche bauliche Sanierung hat in den letzten Jahren in T09 stattgefunden, welche erheblich zur Verbesserung der Gebäudesubstanz beigetragen hat.

Ein wichtiges Merkmal zur Bewertung der Gebäudesubstanz ist der energetische Zustand der Gebäudehülle. Diese weist in Abhängigkeit des Baujahres eine unterschiedliche Qualität auf. Betrachtet man die Korrelation zwischen dem spezifischen und klimabereinigten Tagesdurchschnittsverbrauch und der energetischen Qualität der Gebäudehülle [Ermittlung der Werte siehe 5.4.2] so zeigt diese mit -0,14 nur einen schwachen linearen Zusammenhang. Ein schlüssiger Zusammenhang zwischen Qualität der Gebäudehülle und dem Endenergieverbrauch ist folglich nicht nachweisbar. Hier spielen zu viele weitere Faktoren, wie beispielsweise die Flächenstrukturen sowie das vorhandene Temperaturniveau in den unterschiedlichen Häusern, eine Rolle.

Auf Grund dieser differenzierten Einflussfaktoren sind die Schwankungen zwischen den erfassten Minimal- und Maximalverbräuchen in den Theaterspielstätten sehr unterschiedlich. Die Minimalverbräuche variieren zwischen 0,08 kWh/m²d in T09 und 0,49 kWh/m²d in T05. Mit einem Bereich zwischen 0,32 kWh/m²d in T12 und 1,19 kWh/m²d in T01 liegen die Maximalverbräuche deutlich über den Minimalverbräuchen. Während das Verhältnis von Minimal- zu Maximalverbrauch in T13 lediglich 13,1% beträgt, liegt dieses in T05 bei 76,2%.

Zur weiteren Analyse des Einflusses der Vorstellungen auf den Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser werden die durchschnittlichen Energieverbräuche an Vorstellungs- und Leerstandstagen gegenübergestellt. Diese betragen an Vorstellungstagen zwischen 0,18 kWh/m²d in T13 und 0,82 kWh/m²d in T01. Anhand der Gegenüberstellung der Durchschnittsverbräuche an Leerstandstage, die sich zwischen 0,20 kWh/m²d in und 0,84 kWh/m²d in den gleichen Spielstätten bewegen, kann kein eindeutiger Einfluss der Vorstellungen auf den Endenergieverbrauch festgestellt werden. Während in T08, T10 und T11 an Vorstellungstagen zwischen 3,6% und 21,9% mehr Energie verbraucht wird, zeigen T01, T05, T07, T09, T12 und T13 einen Mehrverbrauch an

Leerstandstagen, der sich zwischen 0,1% und 72,8% bewegt. Anders als beim Stromverbrauch [siehe 5.3.2.1] sind die Vorstellungen nicht verantwortlich für einen erhöhten Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser. Der erhöhte Stromverbrauch wird vor allem durch die Klimatisierung des Zuschauersaals sowie die szenische Beleuchtung erzeugt. Da durch die szenische Beleuchtung und die Zuschauer bereits hohe Wärmeeinträge im Zuschauersaal entstehen, ist der Heizwärmebedarf im Verhältnis zu anderen Gebäudebereichen tendenziell unterdurchschnittlich. Andere Bereiche, die einer kontinuierlicheren Nutzung unterliegen, haben daher einen erheblich größeren Einfluss auf den Bedarf an Endenergie für Heizung und Warmwasser.[31]

Literatur:

[31] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2003)

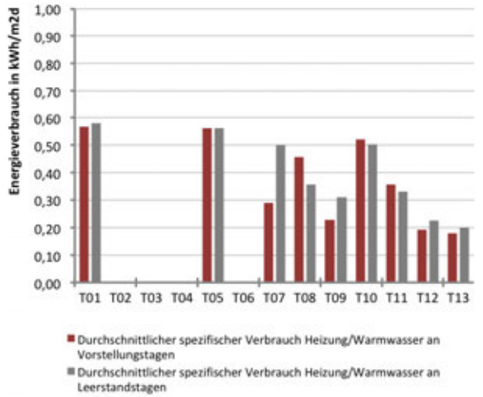

Abb. 68 Durchschnittlicher spezifischer Verbrauch für Heizung/ Warmwasser an Vorstellungs- und Leerstandstagen

Zur Analyse der Stromverbräuche in den einzelnen Theaterspielstätten wurde zunächst der durchschnittliche Jahresstromverbrauch aus drei aufeinanderfolgenden Jahren gebildet. Die mittleren Verbräuche [siehe 5.3.4.2] wurden den Verbräuchen im Messjahr gegenübergestellt. So konnte festgestellt werden, ob es sich bei dem Messjahr um ein Jahr mit über- oder unterdurchschnittlichem Verbrauch handelt. Die Stromverbräuche im Messjahr, die sich aus den Lastgängen ermitteln ließen, die für die Jahre der Messung mit Ausnahme von T01 und T05 für alle Spielstätten vorliegen, bewegen sich zwischen 181.529 kWh in T06 und 1.997.178 kWh in T03. Die Gegenüberstellung mit den durchschnittlichen Jahresverbräuchen zeigt, dass sich alle Theaterspielstätten mit Ausnahme von T02 unter dem durchschnittlichen Verbrauch bewegen. Dieser wird um 0,2% in T03 bis 11,9% in T13 unterschritten. Lediglich T02 hat im Messjahr einen um 11,9% erhöhten Verbrauch. Da die Abweichungen vom Durchschnittsverbrauch 10% nicht deutlich überschreiten, werden die Messjahre als durchschnittliche Verbrauchsjahre angesehen.

Mithilfe der Lastgänge können die Monatsverbräuche, die im Jahresverlauf schwanken, ermittelt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit der Spielstätten untereinander wurden die absoluten monatlichen Verbrauchswerte in Monatsverbrauchsanteile umgerechnet. So zeigt sich über alle Theaterspielstätten eine relativ gleichmäßige Verteilung des Verbrauchs auf die Monate Januar bis Juni sowie September bis Dezember. Die ermittelten Werte für die einzelnen Theaterspielstätten bewegen sich in diesem Zeitraum zwischen 6,8% für T11 im September und 11,1% für T13 im Dezember. Neben T13 ist auch für T02, T06 und T12 ein erhöhter Verbrauchsanteil im Dezember zu erkennen. Dies ist in diesen Theaterspielstätten auf die wahrscheinlich erhöhte Vorstellungszahl in der Weihnachtszeit zurückzuführen. Viele Theaterspielstätten haben zu

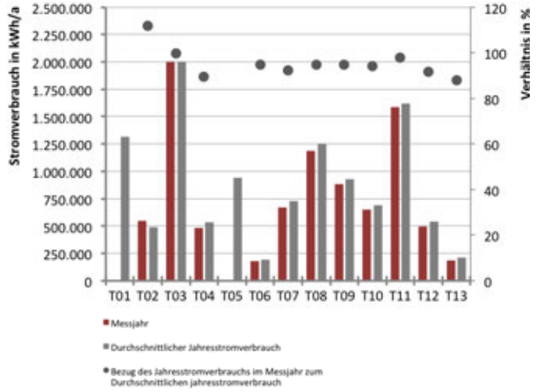

Abb. 69 Stromverbrauch im Messjahr gegenüber des durchschnittlichen Jahresstromverbrauchs

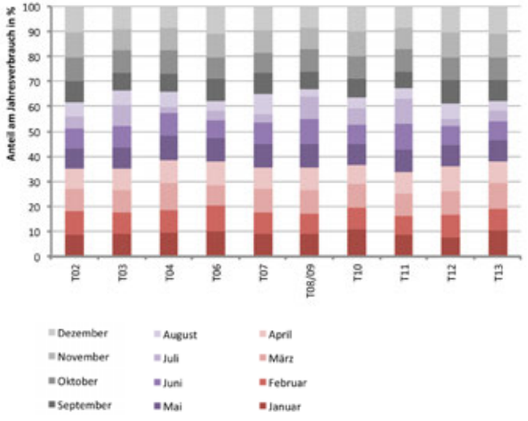

Abb. 70 Monatliche Verteilung des Jahresstromverbrauchs in den einzelnen Theaterspielstätten

dieser Zeit Weihnachtsmärchen im Repertoire, die sie auch vormittags für Schulklassen anbieten. Im September fällt der Verbrauchsanteil, wie bereits bei T11 zu beobachten war, bei vielen Theaterspielstätten geringer aus als in den restlichen Monaten. Dies hängt damit zusammen, dass die neue Spielzeit erst im September anläuft und daher in diesem Monat weniger Vorstellungen stattfinden. Auch im Juni ist eine Tendenz zu einem geringeren Verbrauchsanteil zu erkennen, hier endet in den meisten Theaterspielstätten die Spielzeit, sodass auch hier weniger Vorstellungen angesetzt sind. Während der Spielpause im Juli und August sind die geringsten Verbrauchsanteile zu verzeichnen. Diese bewegen sich zwischen 2,4% in T04 im Juli und 9,9% im Juni in T11. Der außergewöhnlich hohe Verbrauchsanteil im Juni bei T11 ist damit zu erklären, dass die Theaterpause eng mit den Schulferien der jeweiligen Bundesländer verknüpft ist. Im Jahre der Messung begannen die Schulferien im Bundesland von T11 erst Ende Juli und dauerten bis Anfang September an. Hierdurch ist sowohl der hohe Verbrauchsanteil im Juli als auch der geringe Anteil im September zu erklären. Gleiches gilt bezüglich des Beginns der Schulferien für T03 und T08/09. Bei T08/09 kommt hinzu, dass zum Ende der Spielzeit ein anderes Konzept verfolgt wurde, da der Ausklang der Spielzeit mit einer besonderen Dichte an Vorstellungen einherging. Einen weiteren Einfluss auf den erhöhten Verbrauchsanteil bei T08/09 übt möglicherweise die Klimatisierung eines Großteils des Theaters über eine Kältemaschine aus, die einen erhöhten Stromverbrauch verursacht.

Aus den Monatsverbrauchsanteilen der einzelnen Theaterspielstätten kann ein durchschnittliches Monatsprofil des Stromverbrauchs für Theaterspielstätten erstellt werden. Der Verlauf des Monatsprofils zeigt, dass der Verbrauchsanteil zwischen Januar und Mai um 9% mit einer maximalen Abweichung von 0,4% schwankt. Im Juni, kurz vor Ende der Spielzeit, sinkt der Verbrauchsanteil dann gegen 8% ab. Während der Spielzeitpause im Juli und August liegt der Verbrauchsanteil dann nur noch bei etwa 5%. Im September, mit Beginn der nächsten Spielzeit, steigt dieser wieder auf etwa 8% an und steigert sich dann bis Dezember auf seinen Höhepunkt von 9,7%.

Der anhand des Monatsprofils zu beobachtende Verbrauchsunterschied zwischen Spielpause und Spielzeit spiegelt sich auch in den durchschnittlichen Tagesverbräuchen wieder. Um diese getrennt voneinander beurteilen zu können, wurde die Spielpause für jede Theaterspielstätte anhand der Sommerferienzeiten der jeweiligen Bundesländer definiert. Als Spielzeit gelten dementsprechend die restlichen Tage des Jahres. Für beide Zeiträume wurden durchschnittliche Tagesverbräuche ermittelt, die deutliche Unterschiede zeigen. Der Tagesverbrauch außerhalb der Spielzeit liegt zwischen 201 kWh in T13 und 3540 kWh in T03. Während der Spielzeit wird dagegen täglich mit 536 kWh in T06 und 6144 kWh in T08/09 deutlich mehr Strom verbraucht. Der Unterschied im täglichen Stromverbrauch zwischen Spielzeit und Spielpause beträgt somit 304 kWh in T06 bis 3860 kWh in T08/09. Während der Spielzeit wird täglich also zwischen 1,6 in T03 und 2,7 Mal so viel Strom in T13 verbraucht wie in der Spielpause.

Neben der jährlichen Verteilung des Stromverbrauchs auf die Monate kann auch die wöchentliche Verteilung anhand der Wochentage Anhaltspunkte zur Verbrauchsstruktur geben. Hierzu erfolgte zunächst die Bildung des mittleren täglichen Stromverbrauchs in Abhängigkeit des Wochentags. Auch hier wurden Spielzeit und Spielpause als getrennter Zeitraum betrachtet, da sowohl die Nutzung als auch die Höhe des Stromverbrauchs sehr unterschiedlich sind. Zur Vergleichbarkeit der Theaterspielstätten untereinander wurden prozentuale Verbrauchsanteile für die einzelnen Wochentage gebildet. Anhand derer wird sichtbar, dass während der Spielzeit

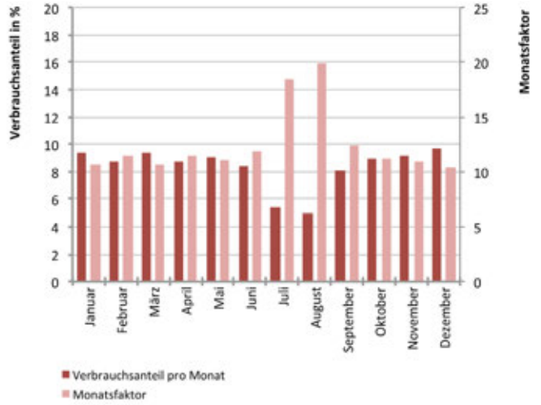

Abb. 71 Monatsprofil des Stromverbrauchs und Faktoren zur Hochrechnung des Monatsverbrauchs auf ein ganzes Jahr

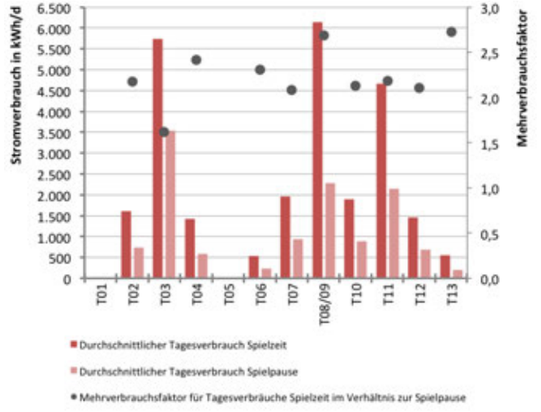

Abb. 72 Durchschnittlicher Tagesstromverbrauch während der Spielzeit und der Spielpause

T10 mit 6,5% den größten Verbrauchsunterschied zwischen den Wochentagen zeigt. Im Gegensatz zu Sonntag, der den geringsten Verbrauchsanteil mit 10,0% aufweist, liegt der Verbrauchsanteil mittwochs bei 16,5%. Den gleichmäßigsten Wochenverlauf zeigt T11. Hier liegt der Unterschied zwischen den Wochentagen lediglich bei 1,1%. Der geringste Verbrauch wird durchschnittlich montags mit einem Anteil von 13,7% verzeichnet, während der größte Verbrauch mit 14,7% donnerstags entsteht. Wie bereits zur Erstellung des Monatsprofils kann auch anhand der Wochenverbrauchsanteile der einzelnen Theaterspielstätten ein durchschnittliches Wochenprofil erstellt werden. Dieses zeigt, dass der Verbrauch am Wochenende etwas geringer ausfällt als an Wochentagen. Zum Wochenstart liegt der Verbrauchsanteil bei durchschnittlich 13,8% und steigert sich dann bis Donnerstag auf das Maximum von 15,4%. Anschließend sinkt der Verbrauch wieder kontinuierlich ab, bis er am Sonntag das Minimum von 12,6% erreicht.

Bei Betrachtung der Verbrauchsanteile außerhalb der Spielzeit zeigt sich bei T08/09 mit 9,4% zwischen den Wochentagen der größte Unterschied. Hier wird der geringste Verbrauchsanteil sonntags mit 8,1% verzeichnet, während donnerstags der höchste Anteil von 17,9% entsteht. Den gleichmäßigsten Verlauf zeigt dagegen T12 mit einem Unterschied von lediglich 2,9% zwischen den Wochentagen. Auch für diese Spielstätte ist der Tag mit dem geringsten Verbrauchsanteil von 12,9% der Sonntag sowie der Tag mit dem höchsten Verbrauchsanteil der Donnerstag mit 15,9%.

Erstellt man auch für die Spielpause ein Wochenprofil, so wird folgender Verlauf sichtbar: Montags liegt der Verbrauchsanteil bei 14,2% und steigert sich dann bis Donnerstag auf einen Anteil von 16,0%. Danach ist zum Wochenende hin ein stärkeres Absinken zu verzeichnen als während der Spielzeit, sodass der Verbrauchsanteil am Sonntag nur noch 11,6% beträgt. Insgesamt ist über die Spielpause von ca. sechs Wochen ein größerer Unterschied zwischen Wochentag und Wochenende festzustellen als während der Spielzeit. Gründe hierfür sind, dass während der Spielzeit Werkstatt-, Proben- und Verwaltungsbetrieb überwiegend zu geregelten Zeiten unter der Woche stattfinden, während am Wochenende hauptsächlich Vorstellungen sind. Somit entfallen am Wochenende größtenteils die kontinuierlichen Verbrauchsanteile für Werkstatt-, Proben- und Verwaltungsbetrieb, sodass der Stromverbrauch hauptsächlich durch die Vorstellungen verursacht wird. Obwohl diese energieintensiv sind, scheint der Stromverbrauch, der durch Werkstätten, Proben und Verwaltung entsteht, zu überwiegen. Der Werkstatt- und Verwaltungsbetrieb wird in reduziertem Maß auch während der Spielpause fortgeführt, während die Vorstellungen am Wochenende gänzlich entfallen. Somit wird der Unterschied zwischen Wochentag und Wochenende während der Spielpause besonders deutlich.

Um die Gesamtenergieeffizienz der verschiedenen Theaterspielstätten effektiv miteinander vergleichen zu können, werden Jahresverbrauchskennwerte benötigt. Auf Basis der Messwerte aus den Kurzzeitmessungen kann eine Hochrechnung auf ein volles Jahr erfolgen, sofern der Messzeitraum einen für den Jahresverbrauch repräsentativen Zeitraum umfasst. Die Messzeiträume waren auf die Monate März/April und Oktober/November festgelegt und liegen damit in den Monaten der Spielzeit, in denen ein durchschnittlicher Verbrauch von ca. 9% am

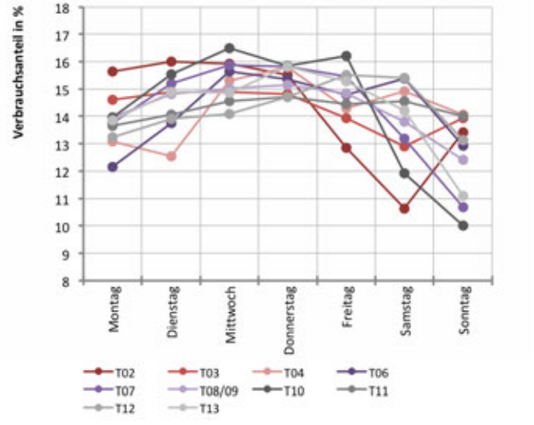

Abb. 73 Stromverbrauchsanteil nach Wochentag während der Spielzeit

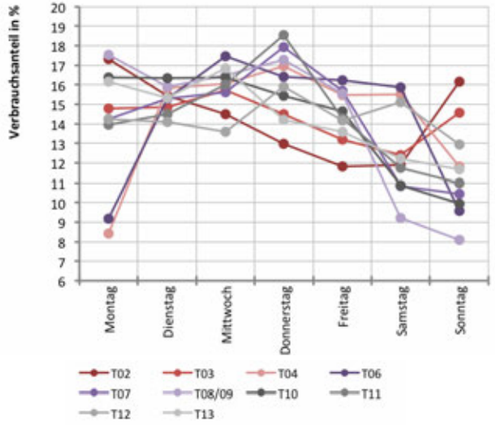

Abb. 74 Stromverbrauchsanteil nach Wochentag während der Spielpause

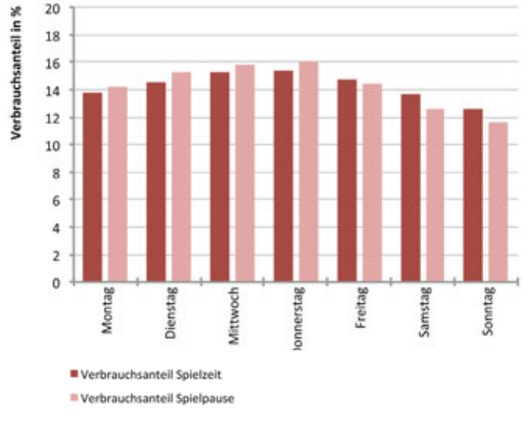

Abb. 75 Wochenprofil des Stromverbrauchs

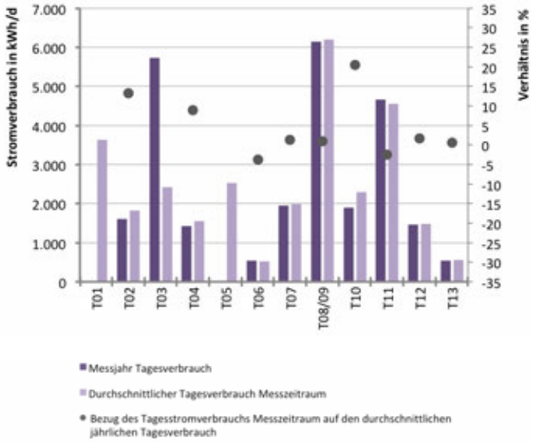

Abb. 76 Durchschnittliche Tagesstromverbräuche im Messzeitraum gegenüber der des Jahresdurchschnitts

Jahresverbrauch auftritt. Somit besteht die Annahme, dass der gemessene Verbrauch für die Spielzeit repräsentativ ist. Zur Überprüfung dieser Annahme wird der gemessene durchschnittliche Tagesverbrauch dem durchschnittlichen Tagesverbrauch während der gesamten Spielzeit gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass der durchschnittliche Tagesverbrauch während des Messzeitraums bei den meisten Spielstätten weniger als 10% vom jährlichen Durchschnittstagesverbrauch abweicht. Nur T02 und T10 bilden hier eine Ausnahme, da sich hier die Verbräuche um 13,2%, bzw. 20,4% vom Durchschnittsverbrauch unterscheiden. Bei Verwendung der Durchschnittstagesverbräuche aus den Messungen für eine Hochrechnung des Verbrauchs auf ein Jahr für diese beiden Theaterspielstätten sind folglich größere Toleranzen zu erwarten.

Des Weiteren ist zu beobachten, dass fast alle Spielstätten einen im Vergleich zum jährlichen Durchschnittstagesverbrauch höheren Tagesverbrauch aufweisen. Nur T06 und T11 zeigen einen leicht geringeren Verbrauch. Dadurch bedingt ist zu erwarten, dass ein hochgerechneter Jahresverbrauch tendenziell eher zu hoch ausfällt.

Zur Hochrechnung der Verbräuche im Messzeitraum wird in der „VDI 3807 – Verbrauchskennwerte für Gebäude“ ein Verfahren zur zeitlichen Bereinigung vorgeschlagen. Sofern ein repräsentativer Zeitraum für die Messungen gewählt wurde und der Verbrauch gleichmäßig über das Jahr verteilt ist, kann aus den Messwerten ein durchschnittlicher Tagesverbrauch gebildet werden, der dann auf 365 Tage hochgerechnet wird. Wie bereits anhand der Beschreibung der monatlichen Verteilung des Stromverbrauchs sowie anhand der Unterschiede zwischen Tagesverbrauch während der Spielzeit und der Spielpause zu schließen ist, liegt eine gleichmäßige Verteilung für Theaterspielstätten nicht vor. Da die Messungen während der Spielzeit erfolgt sind, hätte die Anwendung des Verfahrens für eine gleichmäßige Verteilung die Berechnung eines zu hohen Jahresstromverbrauchs zur Folge.

Alternativ zu diesem Verfahren erlaubt die VDI aber auch die Bildung von Monatsprofilen, die zur Hochrechnung verwendet werden.

Anhand des oben beschriebenen Monatsprofils können Monatsfaktoren gebildet werden, die zur Hochrechnung des Stromverbrauchs herangezogen werden können. Die Bildung der Monatsfaktoren erfolgt, indem der jeweilige monatsbezogene Verbrauchsanteil mit dem Gesamtverbrauch von 100% ins Verhältnis gesetzt wird. Anschließend werden die durchschnittlichen Tagesverbräuche während der Messung ermittelt und mit der Anzahl der Tage des Messmonats multipliziert, sodass ein Monatsverbrauch entsteht. Der Monatsverbrauch wird wiederum mit dem Monatsfaktor multipliziert,

Abb. 77 Verhältnis des hochgerechneten zum gemessenen Jahresstromverbrauch

5.3.3.2 Einordnung der Messwerte für Heizung und Warmwasser

sodass sich ein Jahresverbrauch ergibt. Diese Vorgehensweise wurde auf die Messwerte aller Theaterspielstätten angewendet.

Da für die meisten Spielstätten der Jahresverbrauch des Messjahres vorliegt, kann die Genauigkeit des Verfahrens überprüft werden, indem die errechneten Werte dem Jahresverbrauch gegenübergestellt werden. Die im Rahmen der Messungen entstandenen Hochrechnungen zeigen Abweichungen sowohl nach oben als auch nach unten im Bereich zwischen 2,2% für T07 und 14,9% für T10. Mit Ausnahme von T03, welche eine Abweichung von 60,6% nach unten zeigt, liegen diese im Toleranzbereich. Sollte für zukünftige Analysen des Gebäudetypus Theaterspielstätten zur Bildung von Verbrauchskennwerten keine Jahresverbräuche vorliegen und diese somit aus Kurzzeitmessungen gebildet werden müssen, können die gemessenen Verbräuche, durch das angewendete Verfahren, mit einer durchschnittlichen Abweichung von 5,5% hochgerechnet werden.

Weiter zu überprüfen wäre, ob die Hochrechnung des Verbrauchs mit einer ähnlichen Genauigkeit für Theaterspielstätten durchgeführt werden kann, deren jährliche Verbrauchsstruktur nicht in das Monatsprofil eingeflossen sind. Des Weiteren wäre zu untersuchen, ob eine höhere Genauigkeit der Hochrechnung erzielt werden kann, wenn die Nutzung, z.B. durch die Anzahl der Vorstellungen oder der Vorstellungsstunden im Messzeitraum, berücksichtigt wird.[13],[105]

Literatur:
[13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009a)
[105] Verein deutscher Ingenieure e.V. (2013)

Für den Endenergieverbrauch von Heizung und Warmwasser liegen im Jahr der Kurzzeitmessungen keine Jahresgesamtverbräuche vor, die zur Bildung von Verbrauchskennwerten notwendig sind. Sie können daher nur durch eine Hochrechnung aus den Daten der Kurzzeitmessungen ermittelt werden.

Hinweise zu Hochrechnungsmethoden finden sich in der VDI 3807. Zunächst wird dort eine Unterteilung des Verbrauchs für Heizung und Warmwasser in einen außentemperaturunabhängigen und einen außentemperaturabhängigen Anteil vorgenommen, wobei der erstere die Warmwasserbereitung enthält. Zur Ableitung der Verbrauchshöhe wird die Analyse des Verbrauchs in den Sommermonaten Juni, Juli und August empfohlen. Der zweite, außentemperaturabhängige Verbrauchsanteil umfasst den Energieverbrauch für die Beheizung des Gebäudes und muss vor Ermittlung der Verbrauchskennwerte klimabereinigt werden. Diese erfolgt nach VDI 3807 über die Gradtage. Rückschlüsse von Kurzzeitmessungen auf den gesamtjährlichen Verbrauch sind nur möglich, wenn der betrachtete Zeitraum mindestens 400 Kd umfasst. Die Überprüfung der Gradtage in den Messzeiträumen zeigt, dass diese mit minimal 189,3 Kd für den Standort von T08 sowie T09 und maximal 398,4 Kd für T10 den erforderlichen Mindestwert bei allen Kurzzeitmessungen unterschreiten. Somit wiesen die Messzeiträume entweder eine zu geringe Dauer oder zu hohe mittlere Tagesaußentemperaturen auf, sodass eine Hochrechnung nach VDI 3807 nicht durchgeführt werden konnte. Darüber hinaus liegt für Theaterspielstätten bisher kein Monatsverbrauchsprofil vor, anhand dessen die Hochrechnung erfolgen könnte.

Besser geeignet für die Hochrechnung erscheint die Saison-Index-Methode, da für diese lediglich die Messwerte für einen Monatsverbrauch mit den entsprechenden Gradtagzahlen sowie den Referenzgradtagzahlen vorliegen müssen. Bei der Saison-Index-Methode wird das Verhältnis zwischen

dem durchschnittlichen Monatsverbrauch und dem Jahresverbrauchswert gebildet. Diese Verhältnisse wurden für unterschiedliche Heizgrenztemperaturen ermittelt, die für die meisten Gebäudetypologien angewendet werden können. Sofern keine Verbrauchswerte für einen ganzen Monat vorliegen, muss zunächst eine zeitliche Korrektur erfolgen. Diese kann vorgenommen werden, indem der mittlere Tagesverbrauch mit der Anzahl der Tage des Monats multipliziert wird.

Bevor die Klimabereinigung im Vorfeld der Hochrechnung erfolgt, muss zunächst der außentemperaturunabhängige Verbrauchsanteil separiert werden. Nach der „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ kann dieser pauschal mit 5% vom Jahresverbrauch angenommen werden. Aus den durchschnittlichen Jahresverbräuchen dreier aufeinanderfolgender Jahre [siehe Werte aus 5.3.3.3] wird der tägliche Verbrauchsanteil für Warmwasser ermittelt. Hierbei wird die idealisierende Annahme getroffen, dass dieser gleichmäßig auf alle Tage des Jahrs verteilt ist. Nach Abzug des durchschnittlichen täglichen Warmwasserverbrauchs vom Gesamttagesverbrauch wird der außentemperaturabhängige Anteil über einen Faktor aus Gradtagzahl im Messzeitraum und Referenzgradtagzahl klimabereinigt. Anschließend erfolgt die Addition des außentemperaturunabhängigen und außentemperaturabhängigen Anteils zu einem Tagesgesamtverbrauch, welcher über die Multiplikation mit den Tagen des Messmonats zu einem Monatsverbrauch hochgerechnet wird. Abschließend wird der so gebildete Monatsverbrauch über den Index des Messmonats für eine Heizgrenze von 15°C auf einen Jahresverbrauch hochgerechnet.

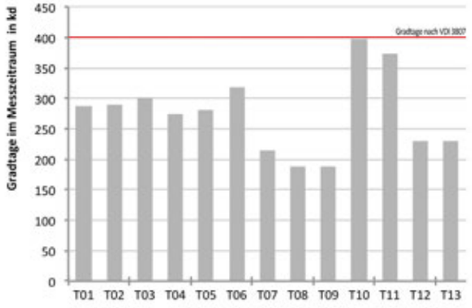

Abb. 78 Gradtage im Messzeitraum für die Standorte der Theaterspielstätten

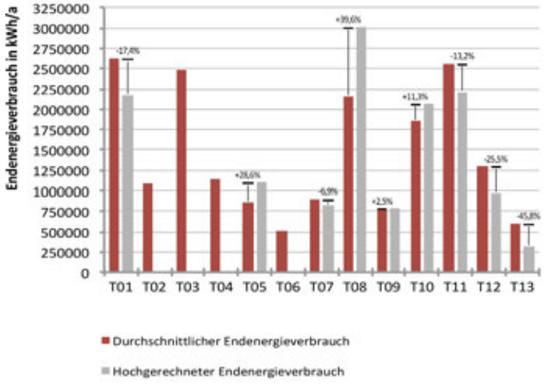

Abb. 79 Durchschnittlicher gemessener gegenüber dem hochgerechneten Jahresverbrauch für Heizung/Warmwasser

	Alle Gebäude außer Schulen		
	HGT=15°C	HGT=12,5°C	HGT=10°C
Januar	14%	15%	17%
Februar	13%	14%	15%
März	13%	14%	15%
April	9%	10%	9%
Mai	5%	0%	0%
Juni	0%	0%	0%
Juli	0%	0%	0%
August	0%	0%	0%
September	5%	0%	0%
Oktober	7%	7%	7%
November	12%	13%	14%
Dezember	16%	17%	19%

Abb. 80 Anteiliger Monatsverbrauch im Verhältnis zum Gesamtjahresverbrauch nach Institut Wohnen und Umwelt GmbH [01]

Abb. 81 Fernwärmeverteilung im Opernhaus Bonn

Die Gegenüberstellung der so berechneten Werte mit den Durchschnittswerten zeigt absolute prozentuale Abweichungen zwischen 2,5% in T09 und 45,8% in T13. Davon ausgehend, dass die Durchschnittswerte auch in etwa dem Jahresverbrauch des Messjahrs entsprechen, kommt es teilweise zu einer deutlichen Überschreitung der prognostizierten Genauigkeit der Saison-Index-Methode von 20%.

Gründe hierfür können sein, dass es sich beim Messjahr um eines mit höheren oder niedrigeren Verbrauch gegenüber dem Jahresverbrauchsdurchschnitt handelt. Des Weiteren stellen nach den TEK-Tool-Berechnungen zuschauerfrequentierte Bereiche wie Foyer und Zuschauersaal durchschnittlich 25,3% am Verbrauch für die Heizung. Diese steht in diesen Bereichen in Abhängigkeit zum Spielplan. Es muss daher sichergestellt werden, dass es sich bei dem Zeitraum der Kurzzeitmessungen um einen repräsentativen Zeitraum handelt, der eine typische Häufigkeit von Vorstellungen umfasst. Darüber hinaus besteht eine Unsicherheit bezüglich der Warmwasserbereitung. Der Anteil dieser wurde nur über TEK-Tool rechnerisch ermittelt, nicht jedoch messtechnisch erfasst. Zwar zeigen die Berechnungen einen durchschnittlichen Anteil von ca. 5% über alle Spielstätten, jedoch kann dieser in Abhängigkeit der Spielstätte stark variieren. Es ist zu überprüfen, ob der die bestehenden Monatsindizes auf die Gebäudetypologie der Theaterspielstätten angewendet werden kann oder ob diese eine Anpassung erfahren müssen. Die Ergebnisse aus den Hochrechnungen sind nur begrenzt belastbar.[13],[65],[105]

Literatur

[01] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2013a)
[13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009a)
[65] Jacob, D., Herkel, S. (2010)
[105] Verein deutscher Ingenieure e.V. (2013)

5.3.3.3 Bewertung

Zur Bewertung des Jahresenergieverbrauchs wurden die Angaben aus den Fragebögen herangezogen, die im Zuge der Aufnahme technischer Daten im Vorfeld der Messungen an die Theaterspielstätten versendet wurden. In Anlehnung an die „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ wurden Jahresendenergieverbräuche für Strom und Heizung/Warmwasser für drei aufeinanderfolgende Jahre abgefragt, um aus diesen Angaben energetische Kennwerte für die jeweilige Theaterspielstätte zu bilden.
Der absolute Energieverbrauch für Strom bewegt sich in den betrachteten Häusern zwischen 191.834 kWh/a für T06 und 2.001.571 kWh/a für T03. Die Spannweite zwischen dem Theater mit dem geringsten Verbrauch und dem höchsten beträgt 1.809.737 kWh/a. Somit benötigt T03 mehr als 11 Mal so viel Strom wie T06. Die stark unterschiedlichen absoluten Verbrauchswerte liegen in der Größe der Häuser sowie in der Art und Frequenz der Nutzung begründet.
Nach der Klimabereinigung des Verbrauchs für Wärme und Warmwasser zeigt sich, dass T06 mit 516.527 kWh/a den geringsten Verbrauch aufweist. Den höchsten hat dagegen T11 mit 2.550.968 kWh/a. Auch hier zeigt sich neben der großen Spannweite von 2.034.441 kWh/a der stark unterschiedliche Energieverbrauch darin, dass der größte Verbraucher im Bezug zum kleinsten Verbraucher ca. 5 Mal so viel Energie benötigt.
Um einen Vergleich der Häuser trotz unterschiedlicher Größe zu ermöglichen, erfolgt der Bezug des Energieverbrauchs auf die Nettogrundfläche der jeweiligen Theaterspielstätte. Für den Stromverbrauch ergeben sich somit energetische Kennwerte zwischen 36,1 kWh/m²a bei T13 und 113,6 kWh/m²a bei T01. Im Mittel liegt der Stromverbrauch der betrachten Theaterspielstätten bei 61,7 kWh/m²a. Der Verbrauch für Wärme und Warmwasser ist gegenüber dem Stromverbrauch mit durchschnittlich 111,1 kWh/m²a um 49,4 kWh/m²a höher. Er bewegt sich zwischen 71,3 kWh/m²a in T05 und 226,2 kWh/m²a in T01.
In Bezug auf die energetischen Vergleichskennwerte für Theaterspielstätten, die 40 kWh/m²a für Strom und 110 kWh/m²a für Wärme und Warmwasser betragen, zeigt sich, dass der Stromverbrauch nahezu in allen Theaterspielstätten den Vergleichskennwert überschreitet. Eine Ausnahme bilden T10, T11, T12 und T13, die nur einen geringfügig vom Vergleichskennwert abweichenden Stromverbrauch aufweisen. Im Verhältnis zum Stromverbrauchskennwert zeigen die erfassten Werte eine prozentuale Abweichung zwischen -9,8% für T13 bis +184,1% für T01.
Bezüglich des Verbrauchs für Wärme und Warmwasser kann keine allgemeingültige Aussage für die untersuchten Spielstätten getroffen werden. Während mit T03, T05, T07, T08, T09, T11, T12 und T13 acht der untersuchten Spielstätten den Vergleichskennwert unterschreiten, weichen die restlichen Spielstätten nach oben ab. Hier weichen die erfassten Werte, bezogen auf den Vergleichskennwert, zwischen -35,1% für T05 und 105,7% bei T01 ab.
Neben der Betrachtung der einzelnen Kennwerte erfolgt auch eine Analyse des gesamten Endenergieverbrauchs. Bei einer Addition der Endenergiekennwerte für Strom und Wärme/Warmwasser zu einem Gesamtwert, beträgt dieser 150 kWh/m²a. Obwohl die einzelnen Kennwerte für Strom und Wärme/Warmwasser in vielen Theaterspielstätten von den Vergleichskennwerten abweichen, unterscheidet sich der Gesamtendenergieverbrauch für die einzelnen Spielstätten weniger. T05, T07, T11, T12 und T13 weisen einen, im Verhältnis zum Vergleichskennwert geringeren Gesamtendenergieverbrauch auf. Im Falle von T11, T12 und T13 ist sowohl der Verbrauch für Strom als auch der für Wärme/Warmwasser, bezogen auf die jeweiligen Vergleichskennwerte, geringer. Die

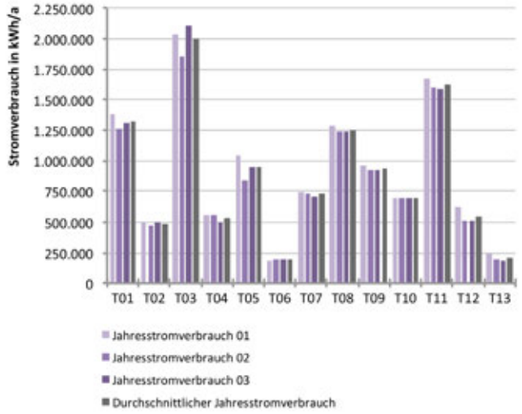

Abb. 82 Bildung des durchschnittlichen Stromverbrauchs aus drei aufeinanderfolgenden Jahren

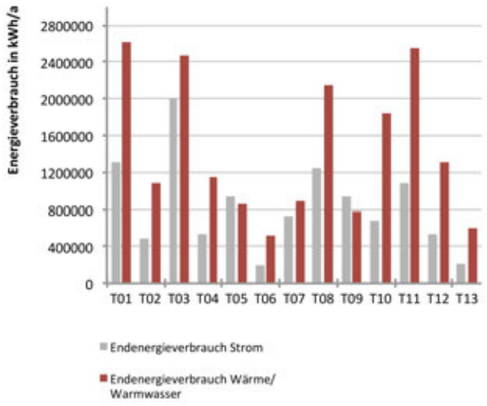

Abb. 83 Absoluter Endenergieverbrauch für Strom und Wärme/ Warmwasser

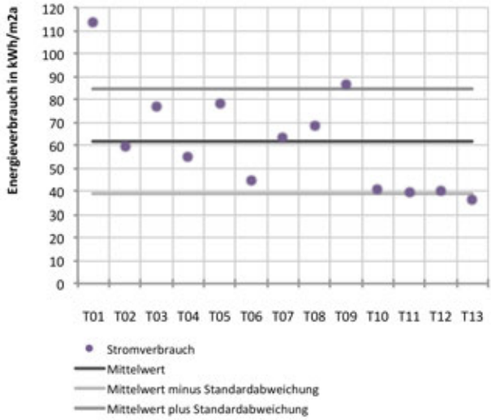

Abb. 84 Endenergieverbrauchskennwerte für Strom

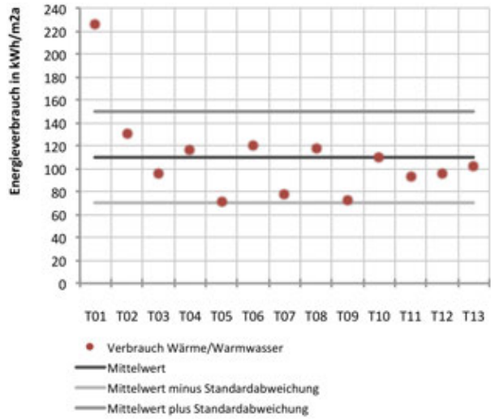

Abb. 85 Endenergieverbrauchskennwerte für Heizung/Warmwasser

Spielstätten T05 und T07 überschreiten dagegen den Vergleichskennwert für Strom und weisen für Wärme/Warmwasser gleichzeitig einen geringeren Verbrauch auf. Einen geringfügig abweichenden Verbrauch in Bezug zum Gesamtendenergiekennwert haben T09 und T10. Während eine weitere Gruppe, die T02, T03, T04 und T06 umfasst, den Kennwert um weniger als 30% überschreitet, ist der Verbrauch von T01 und T08 deutlich erhöht. Ursächlich hierfür sind vor allem die Stromverbräuche.

Bei einer Betrachtung des Verhältnisses von Stromverbrauch zum Verbrauch für Heizung/Warmwasser anhand der Vergleichskennwerte wird sichtbar, dass der Anteil für Strom mit 26,7% gegenüber 73,3% auf endenergetischer Ebene deutlich weniger ins Gewicht fällt. In den untersuchten Theaterspielstätten fällt das Verhältnis der Verbräuche zueinander sehr unterschiedlich aus. In T13 entspricht es mit einem Anteil des Stromverbrauchs von 26,1% zu 73,9% fast der Verteilung der Vergleichskennwerte. Gleiches gilt für T06 und T10. Dem gegenüber steht ein nahezu ausgeglichenes Verhältnis des Verbrauchs von 54,5% zu 45,5% in T09. Obwohl das Verhältnis von Stromverbrauch zum Verbrauch für Heizung/Warmwasser in den einzelnen Theaterspielstätten stark variiert, wird deutlich, dass der Anteil des Stromverbrauchs in allen Spielstätten im Bezug zur Norm größer ist.

Neben der Betrachtung der Anteile am Gesamtendenergieverbrauch auf endenergetischer Ebene erfolgt diese außerdem auf primärenergetischer Ebene. Die Gewichtung beider Verbrauchsanteile mit Primärenergiefaktoren führt zu einer anderen Verteilung. Während der Primärenergiefaktor für Strom auf 1,8 festgelegt ist, wird die Energie für Wärme und Warmwasser, mit Ausnahme zweier Spielstätten die über Erdgas versorgt werden, über Fernwärme bereitgestellt. Da die Fernwärme über Kraft-Wärme-Kopplung, teils mit fossilen und teils mit erneuerbaren Brennstoffen, erzeugt wird, bewegen sich die von den Energieversorgern angegebenen Primärenergiefaktoren zwischen 0,0 und 0,7. Da der Primärfaktor für Fernwärme somit geringer ist als der für Strom, kommt es zu einer Verschiebung der Verbrauchsanteile auf der primärenergetischen Ebene. Der Verbrauchsanteil für Strom variiert zwischen 37,9% in T10 und 100,0% in T01, T02, T04, T08 und T09. Der Stromverbrauch der Theaterspielstätten stellt somit in den meisten Theaterspielstätten eine größere Umweltbelastung dar, als der Verbrauch für Wärme und Warmwasser.

Der durchschnittliche Primärenergieverbrauchskennwert der untersuchten Theaterspielstätten für Strom wurde mit 111,1 kWh/m²a ermittelt. Der geringste Kennwert wurde in T13 mit 65,0 kWh/m²a festgestellt, während T01 mit 204,5 kWh/m²a den höchsten Kennwert aufweist. Aufgrund des Primärenergiefaktors für Fernwärme, die über erneuerbare Brennstoffe erzeugt wird, zeigen hiermit versorgte Spielstätten keinen Primärenergieverbrauch für Wärme/

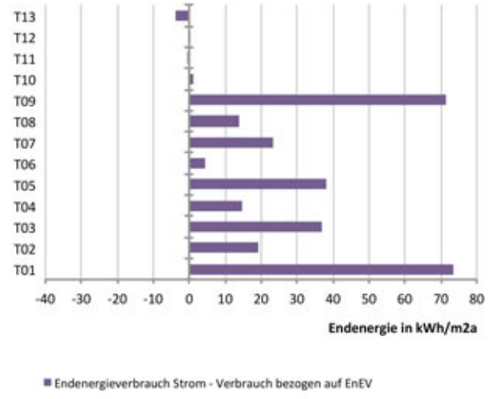

Abb. 86 Endenergieverbrauchskennwerte für Strom gegenüber des Vergleichskennwerts

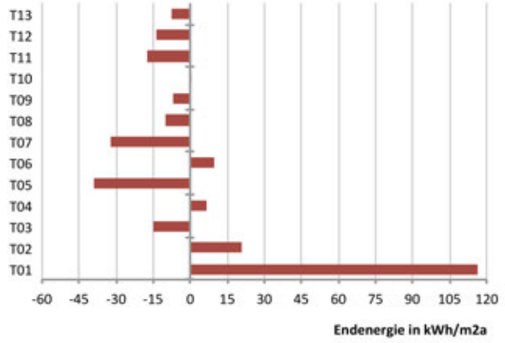

Abb. 87 Endenergieverbrauchskennwerte für Heizung/Warmwasser gegenüber des Vergleichskennwerts

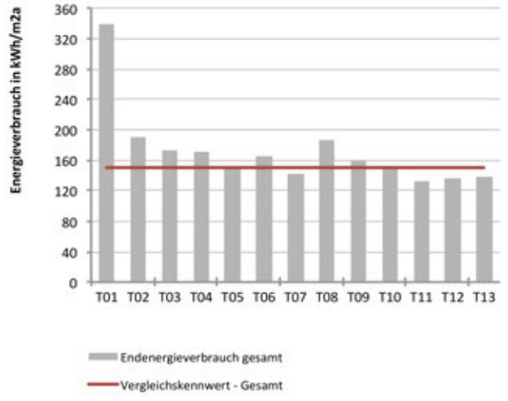

Abb. 88 Gesamtendenergieverbrauchskennwerte gegenüber des Vergleichskennwerts

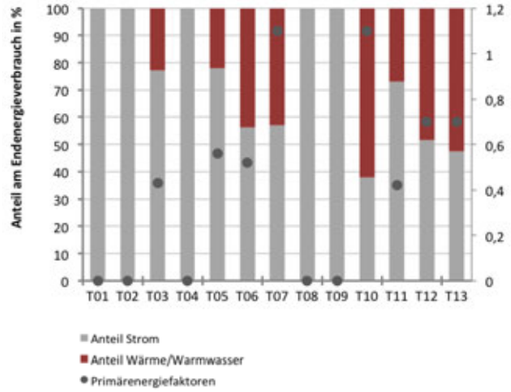

Abb. 90 Gegenüberstellung der Verbrauchsanteile für Strom und Wärme/Warmwasser auf primärenergetischer Ebene

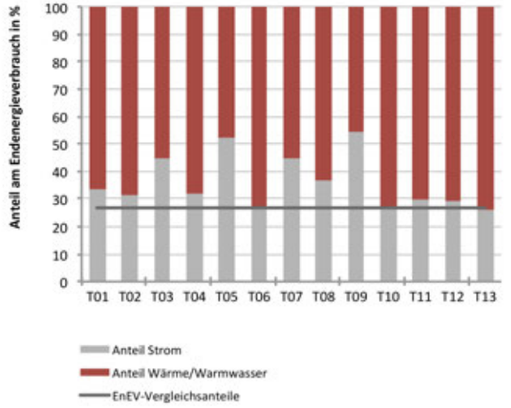

Abb. 89 Verbrauchsanteile für Strom und Heizung/Warmwasser auf endenergetischer Ebene

Warmwasser. Somit liegt der geringste erfasste Kennwert bei 0,0 kWh/m²a. Da nicht alle Theaterspielstätten in einem Gebiet liegen, das durch Fernwärme mit diesem geringen Primärenergiefaktor versorgt wird, wurde der höchste Primärenergiekennwert für T10 mit 121,1 kWh/m²a festgestellt. Der hohe Primärenergiekennwert bei T10 ist auch dadurch zu erklären, dass es sich bei T10 um eine von zwei Theaterspielstätten handelt, die nicht durch Fernwärme, sondern durch Erdgas mit einem Primärenergiefaktor von 1,1 versorgt werden. Bei einer Ermittlung des Primärenergiekennwerts für Wärme/Warmwasser ergibt sich im Durchschnitt für alle betrachteten Theaterspielstätten ein Wert von 40,6 kWh/m²a. Im Vergleich zum Primärenergiekennwert für Strom beträgt dieser somit weniger als die Hälfte des dort ermittelten Durchschnittwerts.[13],[25]

Literatur

[13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009a)
[25] Deutscher Bundestag (2017)

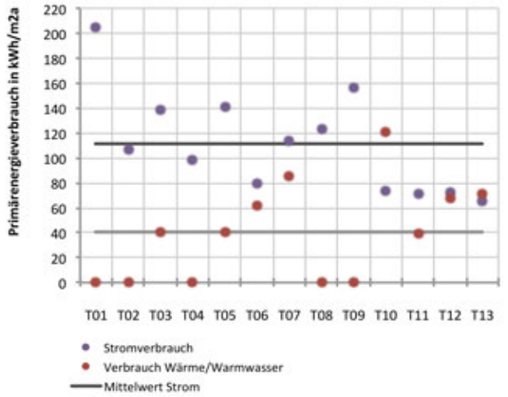

Abb. 91 Primärenergieverbrauchskennwerte für Strom und Heizung/Warmwasser

5.3.4 Benchmarking

5.3.4.1. Definition von Energiebezugsgrößen

Energieverbrauchskennwerte werden eingesetzt, um die energetische Qualität von Gebäuden vergleichen und beurteilen zu können. Sie sind ein Hilfsmittel zur eingehenden Analyse sowie ein Steuerungselement im Energiemanagement. In der Analyse können beispielsweise Zeitvergleiche die Entwicklung einer energetischen Kenngröße aufzeigen, indem Perioden und Zeiträume verglichen, oder mittels Querschnittsvergleich Gebäude ähnlicher Nutzung gegenübergestellt werden, um so den Energieverbrauch zu klassifizieren oder über Mittel- und Richtwerte zu bewerten. Anhand der Analyse, vor allem über die Bewertung des Gebäudes anhand der Mittel- und Richtwerte, kann also die Notwendigkeit von Energiesparmaßnahmen herausgearbeitet werden. Anschließend können über die Mittel- und Richtwerte Ziele definiert und deren Einhaltung überprüft werden.
Zur Bildung der Energieverbrauchskennwerte erfolgt der Bezug des Energieverbrauchs auf eine feste Bezugsgröße. Bei Gebäuden wird meistens die Fläche als Bezugsgröße angesetzt, um Gebäude unterschiedlicher Größe und Nutzung miteinander vergleichen zu können. Die EnEV definiert hierzu ein Verfahren, bei dem die Energiebezugsfläche aus der Summe aller beheizten und gekühlten Nettogrundflächen eines Gebäudes besteht. Ein ähnliches Vorgehen wird auch in der VDI 3807 beschrieben, jedoch wird hier auch die Verwendung anderer Bezugsgrößen als Möglichkeit aufgezeigt, sofern Flächenangaben nicht vorliegen oder andere Bezugsgrößen für den jeweiligen Gebäudetypus aussagekräftiger sind. Als aussagekräftiger werden solche Bezugsgrößen definiert, die den jährlichen Energieverbrauch des Gebäudes maßgeblich beeinflussen. Daraus folgt, dass Bezugsgrößen also in Abhängigkeit der Gebäudenutzung variieren können. Beispiele für die Anwendung alternativer Bezugsgrößen sind Krankenhäuser, deren Gesamtenergieverbrauch stark von der Anzahl der Betten abhängig ist. Hier ist ein gängiger Kennwert der jährliche Energieverbrauch pro Bett. Auch in der Hotellerie werden andere Bezugsgrößen, wie der Verbrauch pro Zimmer oder pro Übernachtung, gewählt. Mittels der verschiedenen Bezugsgrößen werden unterschiedliche Faktoren, die den Energieverbrauch beeinflussen, stärker berücksichtigt. Dementsprechend kann eine Klassifizierung der untersuchten Gebäude stark variieren.
Bei den beiden beispielhaft genannten Gebäudetypen handelt es sich, ebenso wie bei Theaterspielstätten, um Gebäude mit komplexen Nutzungsstrukturen. Dies lässt darauf schließen, dass auch bei Theaterspielstätten neben der Fläche weitere Bezugsgrößen definiert werden sollten, um verschiedene Einflussfaktoren zu berücksichtigen.
Eine Studie von Heathfield und Bottrill aus England, im Rahmen derer Benchmarks für Theaterspielstätten definiert wurden, legt neben der Fläche die Sitzplatzkapazität zu Grunde. Da Gebäudeflächen von den Theaterspielstätten nur bedingt genannt und Angaben zur Sitzplatzkapazität sowie den Vorstellungszahlen betriebsbedingt jedoch genau angegeben werden konnten, kommt die Studie zu dem Schluss, dass die Sitzplatzkapazität eine geeignetere Bezugsgröße als die Fläche darstellt.
Um Kenngrößen definieren zu können, wurde für Industrieunternehmen eine Methodik entwickelt, bei der auch die Wahl der Bezugsbasis thematisiert wird. Die Gliederung der Bezugsbasen nach energiewirtschaftlichen und produktionstechnischen Zusammenhängen lässt sich teilweise auch auf Theaterspielstätten übertragen.
Als globale Betriebsgröße zählt unter anderem der Energieverbrauch pro Mitarbeiter. Übertragen auf Theaterspielstätten kann in diesem Zusammenhang auch der Energieverbrauch pro Zuschauer betrachtet werden. Dies gibt Aufschluss darüber, welcher Energieaufwand notwendig ist, um einem zahlenden Zuschauer den Theaterbesuch zu ermöglichen. Die Höhe dieser Kennzahl ist zum einen von der verbrauchten Energie zur Produktion und Durchführung des Theaterstücks abhängig und zum anderen von der Anzahl der zahlenden Zuschauer,

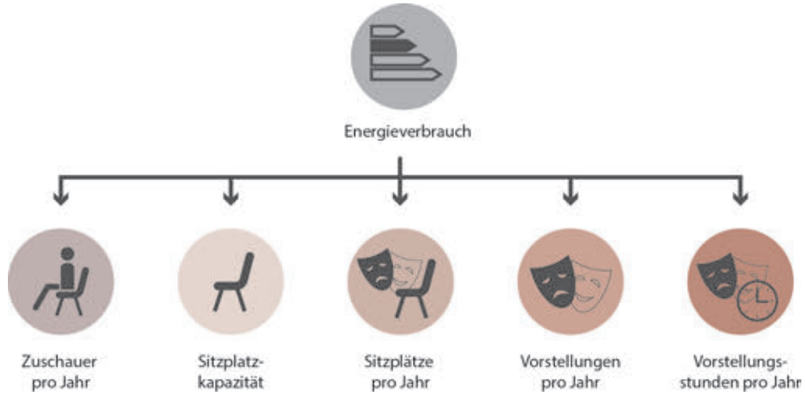

Abb. 92 Energiebezugswerte für Theaterspielstätten

die sich wiederum nach der Sitzplatzkapazität und der Auslastung richtet. Da die Zuschauerzahlen über die Ticketkäufe erfasst werden, liegen hierfür Daten bei den Theaterspielstätten vor.
Eine aggregat- und prozessbezogene Größe, wie der Energieverbrauch pro Kapazität, stellt im Theater die Kapazität der im gesamten Jahr zur Verfügung stehenden Sitzplätze dar. Um diese Größe zu ermitteln, muss die Anzahl der Vorstellungen mit der jeweiligen Sitzplatzkapazität multipliziert werden. Der so generierte Kennwert kann dem Energieverbrauch pro Zuschauer gegenübergestellt werden, der die Auslastung des Theaters berücksichtigt.
Als Struktureinheiten bezogene Größe, wie dem Energieverbrauch pro Fertigungsbereich, kann die Sitzplatzkapazität des Theaters betrachtet werden. Bei der Sitzplatzkapazität handelt es sich um eine Größe, die ebenfalls für jede Theaterspielstätte abrufbar ist und welche die maximale Personenanzahl wiedergibt, die pro Vorstellung bedient werden kann. Aus Gründen der besseren Verfügbarkeit gegenüber der Nettogrundfläche, die außerdem eine höhere Fehleranfälligkeit aufweist, wurde dieser Bezugswert bereits von [Heathfield und Bottrill] verwendet.
Produktionsbezogene Größen beziehen sich auf die Anzahl der erzeugten Produkte. Bei Theaterspielstätten besteht das erzeugte Produkt in Theatervorstellungen. Hier besteht die Vermutung, dass der Energieverbrauch pro Vorstellung sinkt, je häufiger eine Vorstellung zur Aufführung kommt, da sich der Energieverbrauch für Fertigung und Proben anteilig reduziert. Somit ist zu erwarten, dass der Energieverbrauch pro Vorstellung in EnSuite-Theatern niedriger ausfällt als in Gastspieltheatern.
In der Industrie werden leistungs- und arbeitsbezogene Größen zum Beispiel als die Betriebsstunden der höchsten Jahresdauerleistung ausgedrückt. Bei Theaterspielstätten fallen die energieintensivsten Stunden während der Vorstellungen an, sodass ein Bezug des Energieverbrauchs auf Vorstellungsstunden möglich wäre. Dieser Bezug erlaubt eine weitergehende Betrachtung des Energieverbrauchs pro Vorstellung. Der alleinige Bezug auf die Vorstellungsanzahl berücksichtigt die Dauer der Vorstellungen noch nicht, die in Abhängigkeit der Sparte, bzw. der Aufführung stark variieren kann.
Ob mithilfe der vorgeschlagenen Bezugswerte aussagekräftige Vergleiche erzielt werden können, muss mit den erhobenen Daten in einem nächsten Schritt statistisch überprüft werden. Aus Gründen der Verfügbarkeit von Daten zu den beschriebenen möglichen Bezugsgrößen erfolgt für die weitere Betrachtung eine Beschränkung auf die Sitzplatzkapazität sowie die Nettogrundfläche.[05],[17],[53],[59],[76],[90],[105],[106]

Literatur:
[05] Bernard, S., Voss, K. (2012)
[17] Bundesregierung (2014)
[53] Heathfield, H.; Bottrill, C. (2012)
[59] Infas enermetric GmbH (2009)
[76] Löffler, T. (2011)
[90] Schieferdecker, B., Fuenfgeld, C., Bonneschky, A. (2006)
[105] Verein deutscher Ingenieure e.V. (2013)
[106] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2014)

Abb. 93 Sitzplätze im Zuschauersaal des Theaters Krefeld

5.3.4.2 Flächenbezogene Energiekennwerte

Für die folgende Ermittlung von Kennwerten wurde die Nettogrundfläche als Bezugsgröße gewählt. Dieser allgemein gängige Bezugswert für Gebäude lässt auch einen Vergleich der Gebäudetypologie „Theaterspielstätte“ mit anders genutzten Gebäuden zu. Es erfolgt sowohl eine Betrachtung der einzelnen Verbräuche auf endenergetischer Ebene als die der Gesamtverbräuche auf end- und primärenergetischer Ebene.
Der durchschnittliche Stromverbrauch wurde mit 60,5 kWh/m²a ermittelt. Gegenüber dem Referenzwert in Höhe von 40 kWh/m²a [siehe 5.3.3.3] liegt eine durchschnittliche Überschreitung von 51,3% vor. Die größte Überschreitung ist bei T09 mit 116,8% vorhanden. Lediglich T13 zeigt eine Unterschreitung des Grenzwerts um 9,8% und bei T12 wird dieser nahezu genau erfüllt.
Bei einer Sortierung der Stromverbrauchskennwerte bilden sich drei Gruppen heraus, die unterschiedliche mittlere Stromverbräuche aufweisen. Die erste Gruppe zeigt einen mittleren Verbrauch von 40,4 kWh/m²a, der Durchschnittsverbrauch der zweiten Gruppe beträgt 61,0 kWh/m²a und der Verbrauch der letzten Gruppe liegt bei 80,1 kWh/m²a. Anhand dieser Mittelwerte lassen sich Gruppen ableiten, die zur Klassifizierung des Stromverbrauchs angesetzt werden können, indem die Mittelwerte der jeweiligen Gruppen gerundet werden und um diesen Bereich gebildet werden. Theaterspielstätten mit geringem Stromverbrauch haben nach dieser Vorgehensweise Kennwerte unter 50 kWh/m²a. Bei einem mittleren Stromverbrauch liegt dieser im Bereich zwischen 50 und 70 kWh/m²a und ab 70 kWh/m²a ist der Stromverbrauch als hoch einzustufen. Indikatoren, die den Stromverbrauch beeinflussen, sind vor allem die Anschlussleistung der Lüftungsanlagen und die Anschlussleistung der durchschnittlichen Bühnenbeleuchtung während den Vorstellungen. Dies lässt sich auch aus den in [5.4.1] dargestellten Auswertungen schließen, die verdeutlichen, dass der größte Strombedarf in Theaterspielstätten für die Beleuchtung und die Luftförderung anfällt. So zeigen Theaterspielstätten mit einer höheren Gesamtanschlussleistung in den beiden Bereichen tendenziell einen höheren Stromverbrauch.
Die mittlere Anschlussleistung der ersten Gruppe liegt bei 76,1 kW, während sie in der zweiten Gruppe mit 144,4 kW nahezu doppelt so hoch ist. In der Gruppe mit dem höchsten durchschnittlichen Verbrauch ist auch die durchschnittliche Anschlussleistung mit 304,4 kW am größten. Einen Ausreißer bezüglich der Anschlussleistung zeigt T10 in Gruppe 01 mit einer hohen Anschlussleistung von 184,7 kW, welche den Mittelwert stark beeinflusst. Bleibt der Ausreißer bei der Mittelwertbildung unberücksichtigt, so liegt dieser nur noch bei 39,9 kW, welcher bei der Zuordnung und Bildung der Anschlussleistungen der Klassifizierungsgruppen berücksichtigt wird. Die erste Gruppe mit geringem Stromverbrauch zeigt bezüglich der Anschlussleistung eine obere Grenze von 50 kW, der zweiten Gruppe ist ein Bereich zwischen 50 kW und 270 kW zuzuordnen und die Gruppe mit hohem Stromverbrauch hat eine untere Grenze von 270 kW.

Gruppe	Endenergieverbrauch Strom			Anschlussleistung		
	Mittelwert [kWh/m²a]	untere Grenze [kWh/m²a]	obere Grenze [kWh/m²a]	Mittelwert [kW]	untere Grenze [kW]	obere Grenze [kW]
01 geringer Verbrauch	40	-	50	40	-	50
02 mittlerer Verbrauch	60	50	70	160	50	270
03 hoher Verbrauch	80	70	-	320	270	-

Abb. 94 Klassifizierung des Stromverbrauchs auf endenergetischer Ebene

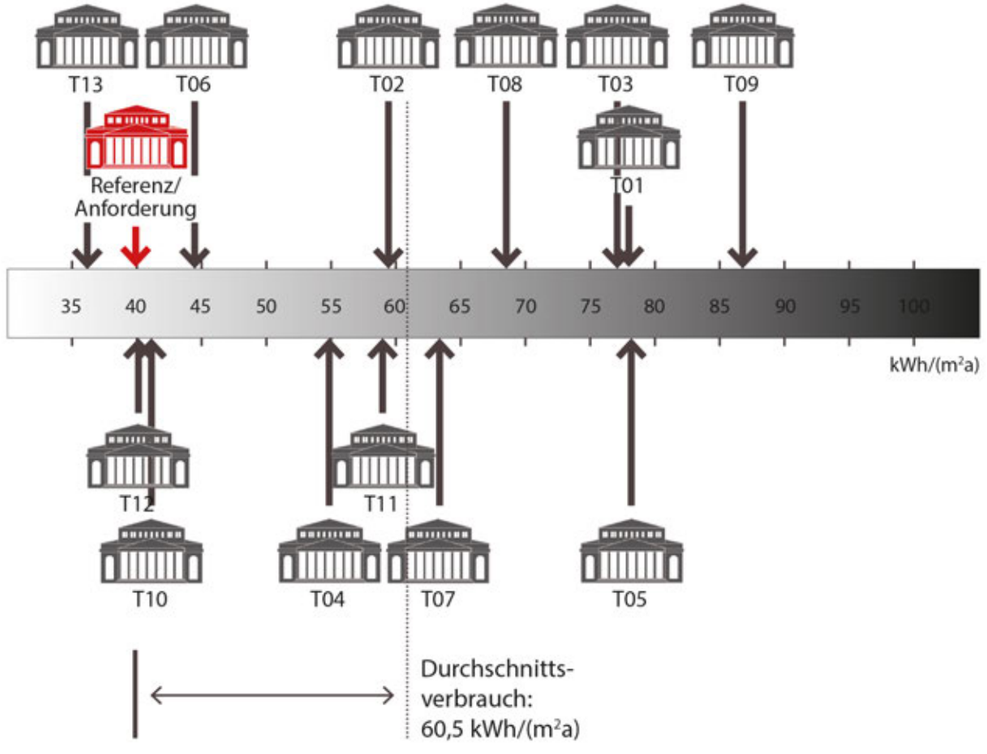

Abb. 95 Benchmarking des flächenbezogenen Stromverbrauchs auf endenergetischer Ebene

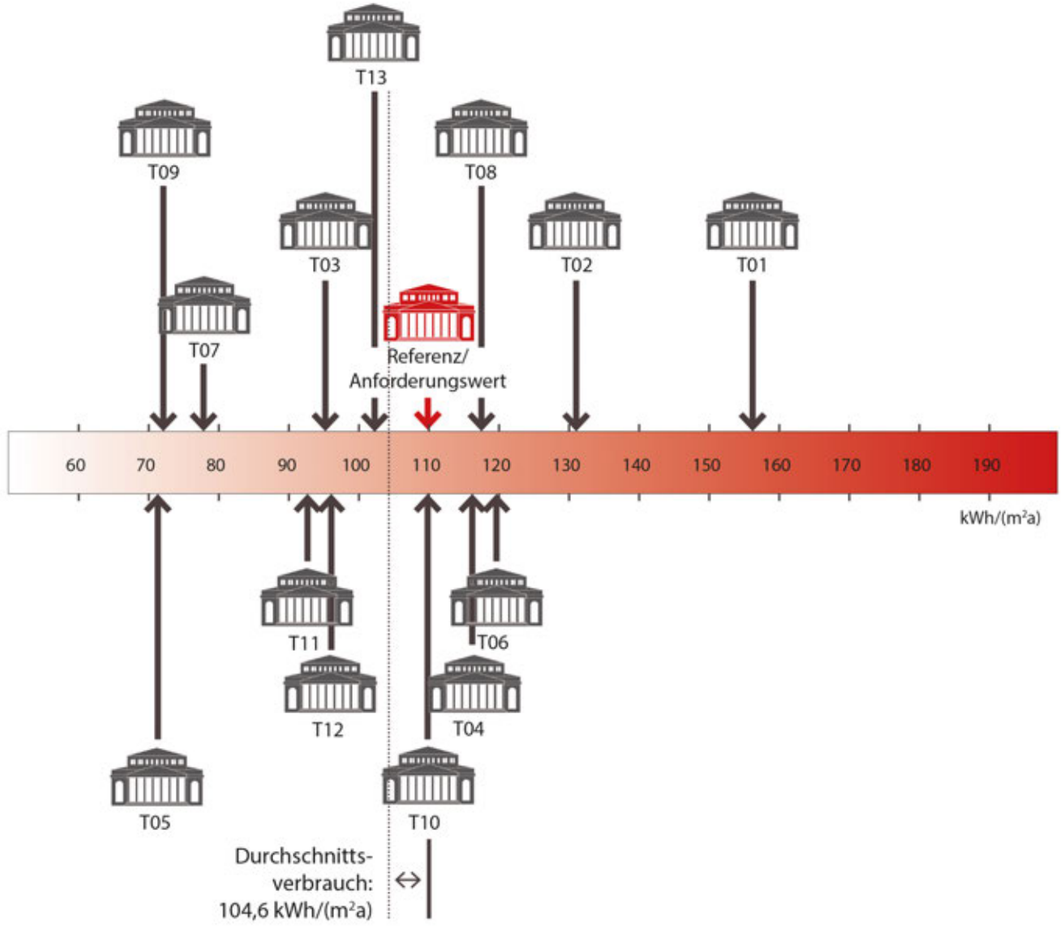

Abb. 96 Benchmarking des flächenbezogenen Verbrauchs für Heizung/Warmwasser auf endenergetischer Ebene

Betrachtet man den spezifischen Durchschnittsverbrauch für Heizung/Warmwasser, so liegt dieser bei 104,6 kWh/m²a. Da der Referenzwert 110 kWh/m²a beträgt, wird er bei den betrachteten Theaterspielstätten durchschnittlich um 5% unterschritten und ist somit auch bei vielen betrachteten Spielstätten geringer. Am weitesten unterschritten wird dieser durch T05 mit 35,1%. Die größte Überschreitung des Grenzwerts wird dagegen durch T01 mit 42% sichtbar.

Bei einer Sortierung des spezifischen Endenergieverbrauchs nach Größe wird deutlich, dass sich zwar, ebenso wie beim Stromverbrauch, mehrere Gruppen ableiten lassen, der Unterschied zwischen den Gruppen aber weniger deutlich abzugrenzen ist. Die erste Gruppe zeigt einen mittleren Verbrauch von 74,0 kWh/m²a, während er bei der zweiten Gruppe bei 96,6 kWh/m²a liegt und bei der dritten Gruppe 116,1 kWh/m²a beträgt. Der Verbrauch der letzten Gruppe ist mit durchschnittlich 143,6 kWh/m²a am höchsten. Insgesamt zeigt sich ein etwa gleichmäßiger Abstand zwischen den Mittelwerten der jeweiligen Gruppen. Anhand der gerundeten Mittelwerte der Gruppen lassen sich Klassen zum Verbrauch für Heizung/Warmwasser ableiten. In die erste Klassifizierungsstufe mit einem geringen Verbrauch können Theaterspielstätten einsortiert werden, deren Verbrauch für Heizung/Warmwasser unter 85 kWh/m²a liegt. Theaterspielstätten in der zweiten Stufe weisen einen mittleren Verbrauch auf, der sich im Bereich zwischen 85 kWh/m²a und 105 kWh/m²a bewegt. Die dritte Stufe umfasst einen Bereich zwischen 105 kWh/m²a und 125 kWh/m²a und zeigt einen hohen Verbrauch. Als Spielstätten mit sehr hohem Verbrauch werden Häuser eingestuft, die mehr als 125 kWh/m²a für Heizung/Warmwasser benötigen. Anders als beim Stromverbrauch lässt sich kein Indikator feststellen, der den Verbrauch für Heizung/Warmwasser bei allen Theaterspielstätten in ähnlicher Weise beeinflusst. Weder bei Überprüfung der energetischen Qualität der

Gruppe	Endenergieverbrauch Heizung/Warmwasser		
	Mittelwert [kWh/m²a]	untere Grenze [kWh/m²a]	obere Grenze [kWh/m²a]
01 geringer Verbrauch	75	-	85
02 mittlerer Verbrauch	95	85	105
03 hoher Verbrauch	115	105	125
04 sehr hoher Verbrauch	135	125	-

Abb. 97 Klassifizierung des Verbrauchs für Heizung/Warmwasser auf endenergetischer Ebene

Gebäudehülle noch bei der energetischen Qualität der Lüftung kann ein eindeutiger Einfluss nachgewiesen werden.

Der spezifische Gesamtendenergieverbrauch liegt im Mittel bei 165,1 kWh/m²a. Gegenüber dem Gesamtreferenzwert aus dem Anteil für Heizung/Warmwasser und Strom, welcher 150 kWh/m²a beträgt, liegt eine Überschreitung des Mittelwerts um 10,1% vor. Die Überschreitung des Referenzwerts resultiert in den meisten Fällen aus dem höheren spezifischen Stromverbrauch im Bezug zum Referenzwert. Die Gegenüberstellung des durch Strom erzeugten Verbrauchs auf endenergetischer Ebene mit dem Verbrauch für Heizung/Warmwasser zeigt, dass der Anteil für Heizung/Warmwasser in den meisten Fällen überwiegt [siehe 5.3.3.3]. Der Verbrauch für Heizung/Warmwasser beeinflusst somit den Gesamtendenergieverbrauch stärker als der Stromverbrauch.

Sichtbar wird dies auch an der möglichen Clusterung des Verbrauchs in vier Gruppen, wie es bereits beim

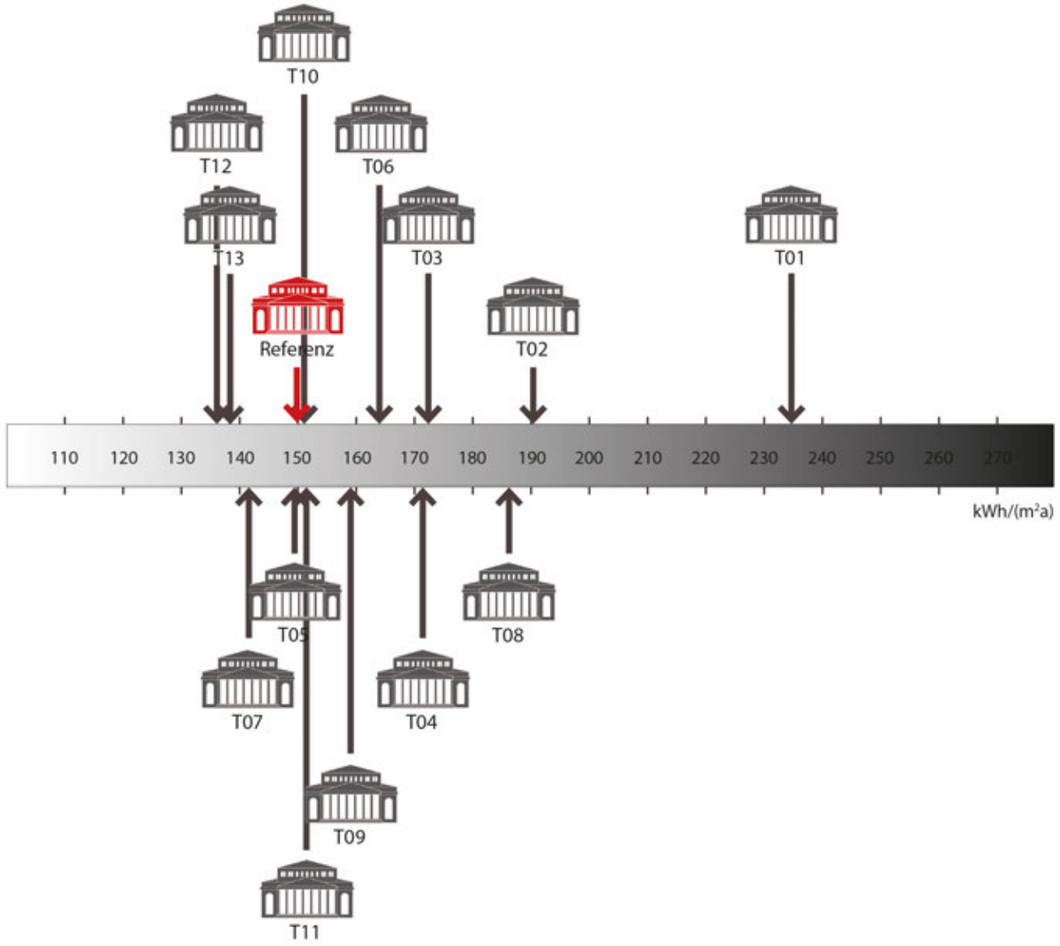

Abb. 98 Benchmarking des flächenbezogenen Gesamtenergieverbrauchs auf endenergetischer Ebene

Verbrauch für Heizung/Warmwasser der Fall ist. Die erste Gruppe zeigt einen eher geringen Verbrauch und hat einen Mittelwert vom 138,6 kWh/m²a, während der Mittelwert bei der zweiten Gruppe bei 150,7 kWh/m²a liegt. Die dritte Gruppe mit einem hohen Verbrauch besitzt einen Mittelwert von 166,8 kWh/m²a und bei der letzten Gruppe befindet sich dieser bei 203,7 kWh/m²a. Erneut zeigt sich, dass T01, durch den nach oben abweichenden Verbrauch sowohl im Bereich von Heizung/Warmwasser als auch beim Strom, den Mittelwert stark beeinflusst. Erneut kann mithilfe der Mittelwerte eine Klassifizierung des gesamten Endenergieverbrauchs in „gering", „mittel", „hoch" und „sehr hoch" erfolgen, indem Bereiche um einen angepassten Mittelwert abgeleitet werden. Als „geringer Verbrauch" gelten alle Gesamtendenergieverbräuche unter 145 kWh/m²a. Im mittleren Bereich werden dagegen Verbräuche zwischen 145 kWh/m²a und 155 kWh/m²a eingeordnet, während hohe Verbräuche sich zwischen 155 kWh/m²a und 175 kWh/m²a bewegen. Ein sehr hoher Verbrauch ist vorhanden, wenn der Gesamtendenergieverbrauch 175 kWh/m²a überschreitet. Stellt man die Klassifizierung der Spielstätten für den Verbrauch für Heizung/Warmwasser mit der des Gesamtendenergieverbrauchs gegenüber, so zeigt sich hier für T01, T02, T04, T06, T07, T08 und T11 eine Übereinstimmung. Bei T03, T05 und T09 ist die Klassifizierung des Gesamtendenergieverbrauchs dagegen höher als die des Verbrauchs für Heizung/Warmwasser, da bei diesen Spielstätten der Stromverbrauch im Verhältnis zum Verbrauch für Heizung/Warmwasser eher ausgeglichen ist. Im Falle von T10, T12 und T13 fällt die Einstufung des Verbrauchs dagegen geringer aus. Hier ist der spezifische Stromverbrauch besonders niedrig und führt so zu einer geringeren Klassifizierung des Endenergieverbrauchs gegenüber der Einstufung des Verbrauchs für Heizung/Warmwasser.

Anders als bei Betrachtung der Verbräuche auf endenergetischer Ebene ist beim Primärenergieverbrauch die Bildung eines Referenzwerts, gleichermaßen bezogen auf alle Theaterspielstätten, nicht möglich. Auf primärenergetischer Ebene muss die Art der Erzeugung jeweils mitberücksichtigt werden und diese ist bei Heizung/Warmwasser nicht für alle Theaterspielstätten gleich. Aufgrund der Erzeugung für Heizung/Warmwasser zum einen durch Fernwärme und zum anderen durch Erdgas erfolgt die Bewertung mit unterschiedlichen Primärenergiefaktoren. Für Erdgas beträgt der Primärenergiefaktor 1,1, während er bei Fernwärme je nach Standort zwischen 0,0 und 0,7 liegt. Da für den nicht erneuerbaren Anteil des allgemeinen Strommixes ein Primärenergiefaktor von 1,8 gilt, übt der Stromverbrauch auf primärenergetischer Ebene einen stärkeren Einfluss aus als der Verbrauch für Heizung/Warmwasser. Der durchschnittliche Primärenergieverbrauch beträgt 149,6 kWh/m²a. Die Theaterspielstätten T07 und T10, bei denen eine Erzeugung für Heizung/Warmwasser über Erdgas sichergestellt wird, zeigen einen überdurchschnittlich hohen Verbrauch. Dagegen haben T02, T04 und T08 einen unterdurchschnittlichen

Gruppe	Gesamtendenergieverbrauch		
	Mittelwert [kWh/m²a]	untere Grenze [kWh/m²a]	obere Grenze [kWh/m²a]
01 geringer Verbrauch	140	-	145
02 mittlerer Verbrauch	150	145	155
03 hoher Verbrauch	165	155	175
04 sehr hoher Verbrauch	185	175	-

Abb. 99 Klassifizierung des Gesamtverbrauchs auf endenergetischer Ebene

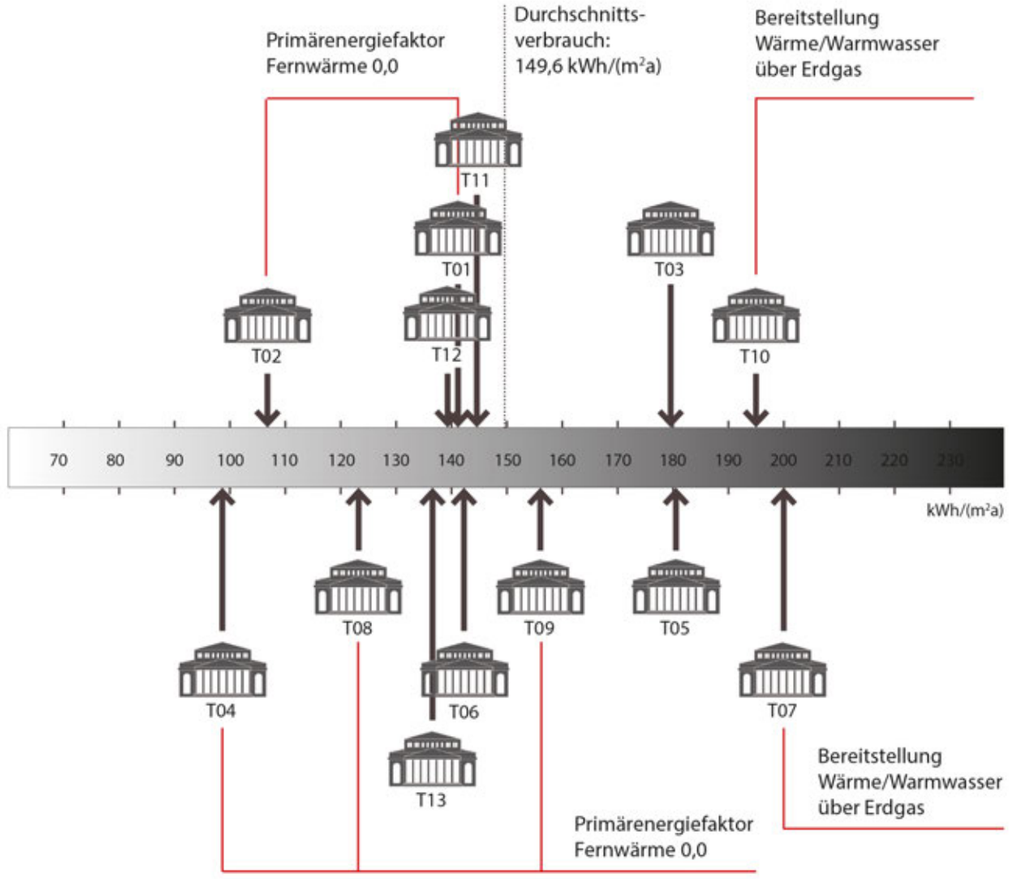

Abb. 100 Benchmarking des flächenbezogenen Gesamtverbrauchs auf primärenergetischer Ebene

Verbrauch, da diese Spielstätten über Fernwärme mit einem Primärenergiefaktor von 0,0 versorgt werden, sodass nur noch der Stromverbrauch bei der Bewertung ins Gewicht fällt. Tendenziell ist der Primärenergieverbrauch also höher, je größer der Primärenergiefaktor für die Erzeugung von Heizung/Warmwasser ist.
Auch für den Primärenergieverbrauch lässt sich eine Gruppenbildung feststellen. Die erste Gruppe mit einem geringen Verbrauch besitzt einen Mittelwert von 109,6 kWh/m²a. Das charakteristische Merkmal ist hier, dass alle dort einzusortierenden Theaterspielstätten über Fernwärme mit einem Primärenergiefaktor von 0,0 versorgt werden. Die Gruppe mit mittlerem Verbrauch, der die meisten Theaterspielstätten zuzuordnen sind, haben einen Mittelwert von 143,4 kWh/m²a. Es handelt sich hier um mittels Fernwärme versorgte Spielstätten, die einen Primärenergiefaktor von unter 0,7 aufweisen oder aber einen hohen Stromverbrauch auf endenergetischer Ebene zeigen. Um einen Mittelwert von 188,7 kWh/m²a bildet sich die Gruppe mit einem hohen Primärenergieverbrauch. Die Gruppe beinhaltet Spielstätten, die entweder im Bereich Heizung/Warmwasser nicht über Fernwärme versorgt werden oder bei der Versorgung über Fernwärme einen mittleren Primärenergiefaktor aufweisen und zusätzlich einen hohen Stromverbrauch zeigen. Wie bereits bei Bewertung der vorangegangenen Verbräuche können auch hier anhand der Mittelwerte Gruppen definiert werden. Als Theaterspielstätten mit geringem Primärenergieverbrauch werden Häuser mit einem Verbrauch unter 125 kWh/m²a klassifiziert. Einen mittleren Verbrauch haben Spielstätten im Bereich zwischen 125 kWh/m²a und 155 kWh/m²a und als hoch kann dieser angesehen werden, wenn 155 kWh/m²a überschritten werden.

Gruppe	Merkmal	Primärenergieverbrauch		
		Mittelwert [kWh/Sa]	untere Grenze [kWh/Sa]	obere Grenze [kWh/Sa]
01 geringer Verbrauch	Fernwärmeversorgung mit Primärenergiefaktor von 0,0	110	-	125
02 mittlerer Verbrauch	Fernwärmeversorgung mit mittlerem Primärenergiefaktor oder Fernwärmeversorgung mit Primärenergiefaktor von 0,0 und hoher Stromverbrauch	140	125	155
03 hoher Verbrauch	Bereitstellung Heizung/Warmwasser nicht über Fernwärme oder Fernwärmeversorgung mit mittlerem Primärenergiefaktor und hoher Stromverbrauch	185	155	-

Abb. 101 Klassifizierung des Gesamtverbrauchs auf primärenergetischer Ebene

Abb. 102 Außenansicht des Stadttheaters Nordhausen

5.3.4.3 Sitzplatzbezogene Energiekennwerte

Im Folgenden wird der Energieverbrauch bezogen auf die Sitzplatzkapazität dargestellt. Auf endenergetischer Ebene erfolgt die Betrachtung der Verbräuche für Strom und Heizung/Warmwasser getrennt. Die Analyse der Kennwerte für Heizung/Warmwasser zeigt, dass tendenziell ein höherer Verbrauch bei Theaterspielstätten vorliegt, die um die Jahrhundertwende errichtet worden sind und somit Baujahresgruppe 1 zugeordnet werden können. Darüber hinaus bilden sich jedoch keine Gruppen heraus, anhand derer Rückschlüsse auf Merkmale in der Gebäudesubstanz oder der Nutzung möglich sind, die einen maßgeblichen Einfluss auf den Energieverbrauch ausüben. Somit ist eine Einordnung des Verbrauchs für Heizung/Warmwasser nur über dem Mittelwert möglich, welcher bei 1569 kWh/Sa (Sitzplatz pro Jahr) liegt.
Im Gegensatz zur Betrachtung des Verbrauchs für Heizung/Warmwasser zeigt der Stromverbrauch, welcher im Mittel bei 902 kWh/Sa liegt, eine Gruppierung von Theaterspielstätten, anhand derer sich der Verbrauch als gering, mittel, hoch und sehr hoch einstufen lässt. Hier ist in Bezug auf den Stromverbrauch eine Tendenz in Zusammenhang mit der Sitzplatzkapazität ablesbar. Je größer der Stromverbrauch pro Sitzplatz, desto größer ist auch die Zuschauerkapazität. Eine Ausnahme bilden T05, welche trotz sehr großer Sitzplatzkapazität anhand der Zuschauerkapazität der ersten Gruppe zuzuordnen ist und T07, welche trotz geringer Sitzplatzkapazität in die dritte Gruppe einsortiert werden muss.
Die Betrachtung des Primärenergieverbrauchs erfolgt für alle anfallenden Verbräuche gemeinsam. Im Mittel beträgt dieser über alle betrachteten Theaterspielstätten hinweg 2272 kWh/Sa. Bei genauerer Analyse der Kennwerte bilden sich drei Gruppen heraus, die einen geringen, mittleren und hohen Verbrauch zeigen und somit die Charakteristik des Stromverbrauchs wiederspiegeln.

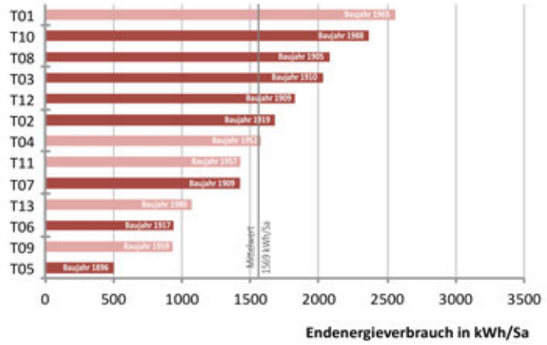

Abb. 103 Sitzplatzbezogene Energiekennwerte für Heizung/Warmwasser

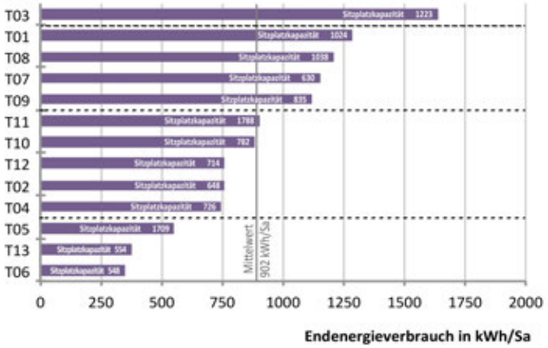

Abb. 104 Sitzplatzbezogene Energiekennwerte für Strom

Die erste Gruppe, welche T02, T04, T05, T06 und T13 umfasst, weist einen geringen Verbrauch auf, der zwischen 1120 kWh/Sa und 1430 kWh/Sa beträgt. Der Mittelwert liegt bei 1305 kWh/Sa. Die zweite Gruppe mit mittlerem Verbrauch beinhaltet T01, T08, T09, T11 und T12. Hier bewegt sich der Verbrauch von 2009 kWh/Sa bis 2646 kWh/Sa und der Mittelwert beträgt 2274 kWh/Sa. Die dritte Gruppe, zu der T03, T07 und T10 zählen, zeigt den höchsten Verbrauch, der von 3638 kWh/Sa bis 4188 kWh/Sa reicht. Der Mittelwert tritt in Höhe von 3881 kWh/Sa auf. Erfolgt eine Analyse der Zusammensetzung der Gruppen, so ist festzustellen, dass Spielstätten mit einer geringen Nettogrundfläche pro Sitzplatz der ersten Gruppe zugeordnet sind. Spielstätten mit einer großen Nettogrundfläche bezogen auf die Sitzplätze befinden sich dagegen in der dritten Gruppe. Bestätigt wird diese Beobachtung auch bei Untersuchung der Korrelation zwischen Primärenergieverbrauch pro Sitzplatz und Nettogrundfläche pro Sitzplatz. Diese liegt bei 0,88 und zeigt einen starken linearen Zusammenhang. Anhand des Primärenergieverbrauchs pro Sitzplatz können daher Rückschlüsse auf die Gebäudefläche erfolgen. Der höhere Primärenergiebedarf für Gebäude mit größerer Nettogrundfläche pro Sitzplatz lässt sich auch aus der Nutzungsstruktur von Theaterspielstätten heraus begründen. Sofern eine hohe Nettogrundfläche pro Sitzplatz vorhanden ist, ist dies ein Hinweis auf große Werkstatt-, Probe- und Verwaltungsflächen. Diese drei Funktionen gehen einher mit einer regelmäßigen wöchentlichen Nutzung, die wiederum einen großen Energieverbrauch für Beleuchtung, Arbeitshilfen und Beheizung verursacht. Betrachtet man die Theaterspielstätten in der dritten Gruppe, so haben diese alle gemeinsam, dass die genannten Funktionen kompakt am Ort der Spielstätte zusammengefasst sind. Bei Spielstätten der ersten Gruppe findet dagegen eine

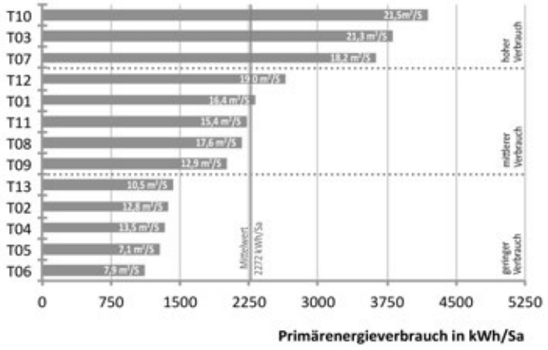

Abb. 105 Sitzplatzbezogene Energiekennwerte für Primärenergie

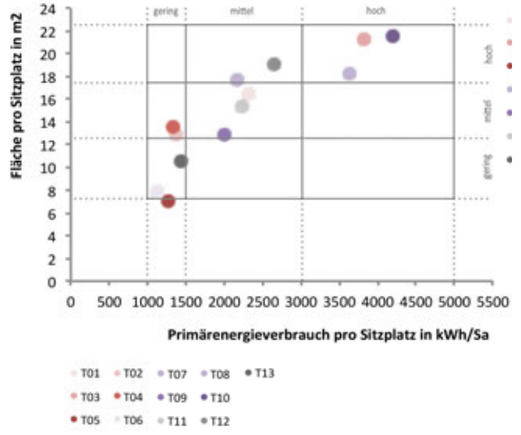

Abb. 106 Einordnung der Messwerte zum Primärenergieverbrauch anhand des Bewertungsschemas

Gruppe	Merkmal	Primärenergieverbrauch			Fläche pro Sitzplatz		
		Mittelwert [kWh/Sa]	untere Grenze [kWh/Sa]	obere Grenze [kWh/Sa]	Mittelwert [m²/S]	untere Grenze [m²/S]	obere Grenze [m²/S]
01 geringer Verbrauch	Größtenteils Auslagerung Werkstätten, Proberäume und Verwaltung	1250	1000	1500	10	7,5	12,5
02 mittlerer Verbrauch	Teilweise Werkstätten, Proberäume und Verwaltung vor Ort	2250	1500	3000	15	12,5	17,5
03 hoher Verbrauch	Größtenteils Werkstätten, Proberäume und Verwaltung vor Ort	4000	3000	5000	20	17,5	22,5

Abb. 107 Bewertungsschema für den sitzplatzbezogenen Primärenergieverbrauch

Auslagerung eines großen Teils der Funktionen auf andere Areale statt.
Mithilfe der Ergebnisse aus der Querschnittserhebung lassen sich Gruppen ableiten, anhand derer eine Einstufung des Primärenergieverbrauchs auch für weitere Spielstätten möglich ist. Die Gegenüberstellung der Mittelwerte der drei definierten Gruppen zeigt, dass die Verbrauchssteigerung gegenüber der vorangegangenen Gruppe das 1,71 bis 1,74-fache beträgt. Unter Berücksichtigung dieser Verbrauchssteigerung sowie Rundung der Mittelwerte wurden Gruppen erstellt. Unter Berücksichtigung der Mittelwerte wurden für die drei Gruppen untere und obere Grenzen abgeleitet. Die erste Gruppe zeigt einen Bereich um den Mittelwert, in Höhe von 1250 kWh/Sa, von 1000 kWh/Sa bis 1500 kWh/Sa. Charakteristisch für diese Gruppe ist, dass bei Spielstätten, die dort einzuordnen sind, größtenteils eine Auslagerung der Werkstätten, Proberäume und Verwaltungsbereiche stattgefunden hat. Der Mittelwert der zweiten Gruppe wurde mit 2250 kWh/Sa festgelegt. Um diesen ist ein Bereich von 1500 kWh/Sa bis 3000 kWh/Sa definiert. Hier stehen Teile der Werkstätten, der Proberäume und Verwaltung in räumlichen Bezug zum Theatersaal. Die dritte Gruppe deckt einen Bereich von 3000 kWh/Sa bis 5000 kWh/Sa ab. Dementsprechend liegt der Mittelwert bei 4000 kWh/Sa. Das Merkmal dieser Gruppe ist, dass Werkstätten, Proberäume und Verwaltung größtenteils gemeinsam mit dem Theatersaal in einem Gebäude untergebracht sind.
Durch die oben genannten Zusammenhänge können auch anhand der Fläche pro Sitzplatz Rückschlüsse auf den vorhandenen Primärenergieverbrauch gezogen werden. Daher erfolgt für die drei Gruppen auch eine Zuordnung von Grenzwerten für die Fläche pro Sitzplatz. Für Gruppe 01 bildet sich ein Bereich von 8 m²/S bis 12 m²/S um den Mittelwert von 10 m²/S heraus. In der zweiten Gruppe liegt der Mittelwert mit 15 m²/S um 5 m²/S über dem der ersten Gruppe. Der Bereich erstreckt sich von 12 m²/S bis 18 m²/S. Die letzte Gruppe weist einen Mittelwert von 23 m²/S auf, sodass sich der Bereich zwischen 18 m²/S und 28 m²/S bewegt. Auch hier erfolgt, wie bereits bei Definition der Grenzwerte für absolute Messwerte, eine Idealisierung der Zahlen.
Legt man sowohl die Kriterien für den flächenbezogenen Primärenergieverbrauch als auch für die Fläche pro Sitzplatz an, so lassen sich die untersuchten Spielstätten ebenfalls mit großer Übereinstimmung den jeweiligen Gruppen zuordnen.

5.4 Auswertung der TEK-Tool Berechnungen

5.4.1 Struktur des Energiebedarfs nach Verbraucher

Der mit TEK-Tool berechnete Endenergiebedarf lässt sich auf unterschiedliche Gewerke aufteilen, die in Abhängigkeit der Antriebsenergie in zwei Gruppen gegliedert sind. Unterschieden wird hier zwischen Brennstoffen, bzw. Fernwärme und elektrischer Energie. Um einen Vergleich zwischen den Theaterspielstätten zu ermöglichen, die einen sehr unterschiedlichen spezifischen Energiebedarf aufweisen, werden im Folgenden die Anteile des Gewerks am Gesamtbedarf für die jeweilige Antriebsenergie betrachtet.

Zu den Gewerken in Theaterspielstätten, die durch Brennstoffe, bzw. Fernwärme betrieben werden, zählt vor allem die Heizung. Hier liegt der Anteil des auf Brennstoffe, bzw. Fernwärme entfallenden Bedarfs zwischen 76,9% in T04 und 100% in T06. Auch für die Warmwassererzeugung, sofern diese zentral erfolgt, entsteht mit Ausnahme von T06 ein Bedarf. Dieser variiert zwischen 0,8% in T02 und 16,5% in T01. Bei Theaterspielstätten, die über eine Lüftungsanlage mit Befeuchtungsfunktion verfügen, kann je nach Art der Erzeugung auch ein Anteil für Dampf anfallen. Dies trifft auf T01 mit 4,4% und T12 mit 5,6% zu. Wird Kälte ebenfalls über ein zentrales System bereitgestellt, so entsteht auch hier ein Bedarf. In T04 findet eine gemeinschaftliche Kälteversorgung durch den Erzeuger einer anderen städtischen Liegenschaft statt, sodass die Versorgung hier als Fernkälte betrachtet wird. Der Anteil der Kälteversorgung für T04 am Gesamtbedarf für Brennstoffe, bzw. Fernwärme beträgt 22,0%. Aufgrund des hohen Anteils der Kälteversorgung ist der Anteil für die Heizung in T04 im Gegensatz zu den anderen betrachteten Theaterspielstätten deutlich geringer, da dieser mit Ausnahme von T04 und T01 deutlich über 80% liegt. Fällt bei T04 besonders der Anteil der Kälteversorgung ins Gewicht, so zeigt T01 einen besonders hohen Anteil am Bedarf für Warmwasser. Zu den „Zentralen Diensten“ zählen zentrale EDV-Anlagen, Schwachstromanlagen und zentrale Küchen. Sofern das Kochen in den zentralen Küchen der Kantine, bzw. der Restaurants über Gas erfolgt, wie in T02 und T07, entsteht auch hierfür ein Brennstoffbedarf. Für beide Spielstätten sind diese Anteile mit 0,6%, bzw. 1,5% jedoch sehr gering.

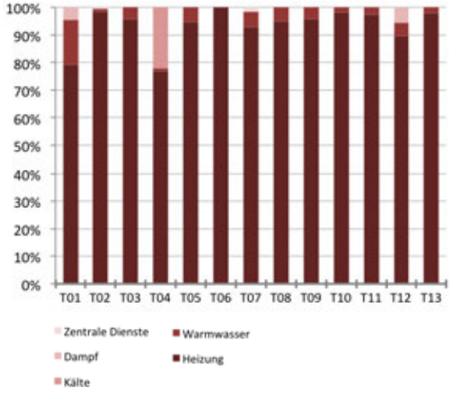

Abb. 108 Anteile der Verbraucher am Bedarf für Brennstoffe, bzw. Fernwärme

Nach Betrachtung des Bedarfs für Brennstoffe, bzw. Fernwärme ist festzuhalten, dass in den untersuchten Theaterspielstätten durchschnittlich der größte Anteil von über 90% für die Heizung aufgewendet werden muss. Der restliche Anteil entfällt meistens auf die Warmwassererzeugung. In wenigen Fällen kann ein geringer Anteil für Dampf- oder Kälteerzeugung und für das Kochen mit Gas anfallen.

Die Gewerke, die als Antriebsenergie Strom nutzen, sind zahlreicher als die, die Brennstoffe nutzen. Der größte Bedarf fällt für die Beleuchtung an, da besonders die Bühnenbeleuchtung während den Vorstellungszeiten eine sehr hohe Anschlussleistung zwischen 13,6 kW und 150 kW zeigt, sodass der Bedarfsanteil für Beleuchtung zwischen 13,4% in T03 und 52,1% in T07 liegt. Ebenfalls einen hohen durchschnittlichen Anteil am Strombedarf erzeugt die Luftförderung. Dies liegt darin begründet, dass Theaterspielstätten oftmals über zahlreiche Lüftungsanlagen verfügen, die in ihrer Gesamtheit zu einer hohen Anschlussleistung führen. Im Zuschauersaal werden leistungsstarke Anlagen benötigt, die kurzzeitig große Luftvolumina fördern können. Darüber hinaus gibt es in vielen Fällen innenliegende Räume, wie Werkstätten und Proberäume, die ebenfalls mechanisch belüftet werden müssen. In den betrachteten Theaterspielstätten liegen die Anschlussleistungen jeweils für Zu- und Abluft zwischen 6,6 kW und 167,4 kW. Dies führt dazu, dass sich der Anteil für Luftförderung am Bedarf zwischen 1,8% in T10 und 58,7% in T03 bewegt.

Der nächstgrößere Posten umfasst die diverse Technik, wozu elektrische Großverbraucher, Hilfsenergie für Heizung sowie Warmwasser und Antriebsenergie für die Aufzüge gehören. Während sowohl Hilfsenergien durch TEK-Tool auf Basis der Daten zum Gebäude und der eingegebenen Gebäudetechnik berechnet als auch der Energiebedarf für Aufzüge durch die Angabe der Anzahl sowie der überwiegend vorliegenden Antriebstechnik durch das Programm überschlägig ermittelt werden, wurden die Großverbraucher während den Begehungen in den Theaterspielstätten detailliert erfasst. Bei diesen handelt es sich in den meisten Theaterspielstätten um Waschmaschinen und Trockner, welche für die Reinigung der Bühnenkostüme oftmals täglich über mehrere Stunden verwendet werden. Darüberhinaus fallen Energiebedarfe für die Kühlhäuser der Kantinen, bzw. Restaurants sowie für Kühltheken an, die in den Foyers zum Getränkeausschank genutzt werden. Sofern Schneidereien in die Häuser integriert sind, wurden dort Bügelstationen festgestellt, die meist während der gesamten Nutzungszeit in Betrieb sind. Dies führt dazu, dass der Energiebedarf für diverse Technik zwischen 7,5% und T01 und 31,7% in T10 variiert. Wie bereits oben beschrieben, fallen unter die zentralen Dienste zentrale EDV-Anlagen, zentrale Küchen und Schwachstromanlagen. Dieser Anteil beträgt zwischen 4,0% in T09 und 20,1% in T04. Der Bedarf für Kälte fällt in den einzelnen Theaterspielstätten je nach Technisierungsgrad sehr unterschiedlich aus. Um die Wärme aus den Serverräumen abzuführen, verfügen alle Theaterspielstätten zumindest in diesem Gebäudebereich über Split-Geräte. Mit Ausnahme von T02 und T06, die beide nur ein solches Split-Gerät im Serverraum installiert haben, sind die Theaterspielstätten mit Kältemaschinen zum Kühlung des Zuschauersaals ausgestattet. Dies führt dazu, dass Anteile für die Kälteerzeugung zwischen 0,0% in T06 und 21,0% in T09 auftreten. Zur Erzeugung der Kälte werden außerdem Hilfsenergien benötigt. Der Anteil hierfür liegt zwischen 0,0% in T06 und 12,0% in T09. Unter Arbeitshilfen werden Arbeitsgeräte, die für die jeweilige Nutzung typisch und notwendig sind, zusammengefasst. Diese werden nicht für jede Nutzung eigenständig erfasst, sondern der Energiebedarf für diese ergibt sich aus dem Nutzungsprofil gemäß DIN V 18599, welches der jeweiligen Zone zugeordnet ist. Die Höhe des Anteils am Energiebedarf ist in Abhängigkeit der Theaterspielstätte sehr unterschiedlich. In T13 beträgt dieser lediglich 0,5% und ist damit sehr gering, während dieser in T10 mit 14,9% recht hoch ist. Zu erklären ist dies über die unterschiedliche

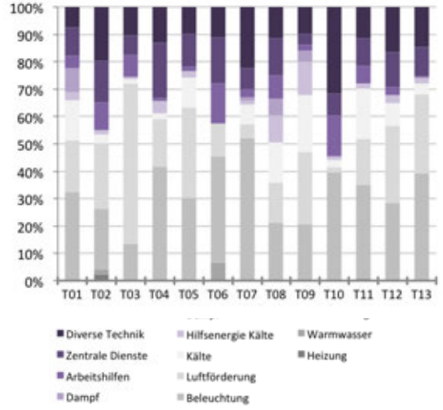

Abb. 109 Anteile der Verbraucher am Bedarf für elektrische Energie

5.4.2 Energiebedarfsstruktur nach Zonen

Flächen- und Nutzungsstruktur in den Häusern. Der Anteil für Arbeitshilfen ist neben T13 auch in T04 und T05 sehr gering. Alle drei Häuser haben gemeinsam, dass sie nur über einen geringen Flächenanteil für Werkstätten und Verwaltung verfügen. In T10 ist besonders der Flächenanteil für Werkstätten, die einen hohen spezifischen Strombedarf für Arbeitshilfen aufweisen, dagegen überdurchschnittlich groß. Ein weiterer Punkt, für den Bedarfe anfallen können, ist die Befeuchtung der Zuluft, die unter „Dampf" berücksichtigt wird. Eine Zuluftbefeuchtung erfolgt jedoch nicht in jeder Theaterspielstätte. Des Weiteren können unterschiedliche Systeme verwendet werden. In T01 und T12 wird die Luft zwar befeuchtet, jedoch wird die Energie hierfür nicht allein über Stromeinsatz erzeugt, sondern auch über Brennstoffe, bzw. Fernwärme. Anders verhält es sich bei T07, T08 und T09. In diesen Spielstätten liegt der Anteil für die Dampferzeugung zwischen 1,5% in T07 und 8,7% in T01. Wird das Warmwasser nicht über Brennstoffe, bzw. Fernwärme zentral bereitgestellt, so muss es dezentral über den Einsatz von Strom erzeugt werden. In T02 und T11 wurden bereits Bedarfe für die Warmwassererzeugung unter den Bedarfen an Brennstoffen, bzw. Fernwärme festgestellt, sodass hier eine gemischte Erzeugung vorliegt. In T06 erfolgt diese ausschließlich dezentral. Der Anteil am Bedarf bewegt sich zwischen 1,0% in T11 und 6,6% in T06. Neben der Warmwassererzeugung kann auch die Heizung in Einzelfällen über Strom erfolgen. Dies ist jedoch nur in T02 mit einem Anteil von 2,4% der Fall.
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durchschnittlich der meiste Strom für die Beleuchtung sowie die Lüftungsanlagen benötigt wird, sodass hier Einsparpotentiale vermutet werden. Weitere hohe Verbrauchsanteile entstehen durch zentrale Dienste und Arbeitshilfen. Da für beide Punkte der Bedarf überschlägig ermittelt wird, sind Potentiale hier nur schwer abschätzbar. Je nach technischer Ausstattung der Spielstätten fallen auch hohe Anteile für die Kälteerzeugung an, da die großen, kurzfristig auftretenden Lasten im Zuschauersaal durch den Wärmeeintrag der Besucher sowie der Beleuchtung abgeführt werden müssen.

Nachdem in [5.4.1] der Energiebedarf für die Gewerke aufgeschlüsselt wurde, wird im Folgenden der Energiebedarf in den einzelnen Zonen untersucht.
Eine Betrachtung des Anteils am Endenergiebedarf für die verschiedenen Zonen zeigt, dass durchschnittlich mit über 10% am meisten Endenergie in den Bereichen 01_Lager/Technik, 09_Foyer, und 11_Theatersaal benötigt wird. Besonders gering ist der Endenergiebedarfsanteil dagegen in den Zonen 10_Eingangsbereich/Garderobe und 13_Aufenthaltsräume Personal, die aber beide einen sehr geringen Flächenanteil aufweisen. In Spielstätten wie T02, T03 und T10, die viele Werkstätten besitzen, tritt außerdem ein hoher Bedarfsanteil für die Zone 02_Werkstätten auf.
Eine alleinige Betrachtung der Bedarfsanteile ist jedoch für eine Beurteilung des Energiebedarfs der Zonen nicht ausreichend. Zusätzlich muss die Einbeziehung der Flächen erfolgen. Dies führt zu einem Vergleich der spezifischen Energiebedarfe.
Die Analyse zeigt, dass der spezifische Bedarf in Zone 08_Gastronomie, bezogen auf den spezifischen Endenergiebedarf des Gesamtgebäudes, besonders hoch ist, da er zwischen 91,1 kWh/m²a in T13 und 935,6 kWh/m²a in T04 liegt. Somit ist er gegenüber dem Gesamtbedarf durchschnittlich um 145,8% erhöht. Trotz des sehr hohen spezifischen Bedarfs zeigt die Zone 08_Gastronomie aufgrund der geringen Gebäudefläche nur einen geringen Anteil an der Gesamtbilanz.
Ebenfalls hohe Bedarfe zwischen 185,6 kWh/m²a in T05 und 674,8 kWh/m²a in T10 bestehen für die Zone 03_Sanitär. Die umfasst neben den WC-Anlagen auch die Duschräume der Künstler. Hier ist der spezifische Bedarf gegenüber dem Gesamtbedarf im Mittel um 167,1% erhöht. Neben den erhöhten Lufttemperaturen in den Duschräumen sind hohe Luftwechselraten erforderlich, um Feuchtelasten und Gerüche abzuführen. Ebenso wie Zone 08_Gastronomie fällt auch hier der Bedarf in der Gesamtbilanz aufgrund der geringen Gebäudefläche nicht erheblich ins Gewicht.
Anders verhält es sich in Zone 11_Theatersaal, in der sich der spezifische Bedarf zwischen 64,2 kWh/m²a in T06 und 671,8 kWh/m²a in T05 bewegt. Im Vergleich zum spezifischen Gesamtendenergiebedarf der Gebäude ist dieser durchschnittlich um 107,6% erhöht. Wegen dem hohen spezifischen Endenergiebedarf in Kombination mit den großen Flächenanteilen zeigt diese Zone einen großen Anteil am Gesamtenergiebedarf.
Besonders geringe Bedarfe zeigen sich dagegen in den Zonen 01_Lager/Technik und 04_Verkehrsfläche. Der spezifische Bedarf für 01_Lager/Technik liegt zwischen 8,6 kWh/m²a in T05 und 163,9 kWh/m²a in T09 und ist damit um 63,3% geringer als der durchschnittliche Gebäudebedarf. Trotz des verhältnismäßig geringen spezifischen Endenergiebedarfs zeigt diese Zone einen großen Anteil am Endenergiebedarf, da diese einen erheblichen Anteil an der Gebäudefläche

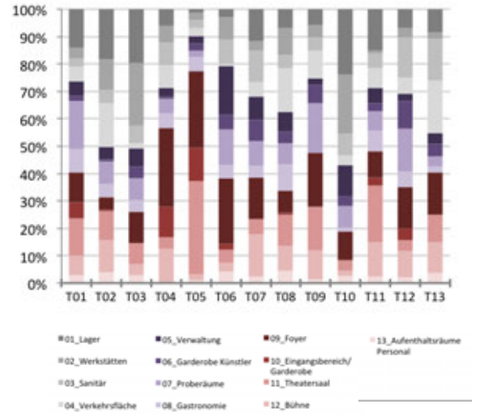

Abb. 110 Anteile der Zonen am Endenergiebedarf

besitzt. In Zone 04_Verkehrsfläche bewegt sich der Bedarf sogar nur zwischen 6,0 kWh/m²a in T06 und 176,0 kWh/m²a in T02 und ist somit durchschnittlich um 56,4% geringer. Obwohl die Zone über eine recht große Gebäudefläche verfügt, spiegelt sich dies nicht im Anteil am Endenergiebedarf wieder.
Um den Energiebedarf in den einzelnen Zonen weiter zu untersuchen, muss die Aufteilung auf die einzelnen Gewerke betrachtet werden. Die Analyse in [5.4.1] hat gezeigt, dass der größte Bedarfsanteil an Brennstoffen, bzw. Fernwärme für die Heizung entsteht. Für die elektrische Energie zeigen die Beleuchtung, die Luftförderung und die Kälteerzeugung den größten bewertbaren Bedarf.
Die betrachteten Theaterspielstätten wurden in unterschiedlichen Jahren erbaut, sodass sich auch die energetische Qualität der Gebäudehülle unterscheidet. Die Konstruktion der Gebäudeteile wurde jedoch nicht für jede Theaterspielstätte erhoben, sondern aus Tabellenwerten der „Bekanntmachung der Regeln für die Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand" vereinfacht ermittelt. Trotz nachträglicher Baumaßnahmen, wie beispielsweise späteren Anbauten, welche den durchschnittlichen U-Wert der Gebäudehülle verändern, zeigt sich, dass früher erbaute Theaterspielstätten eine geringere Qualität der Gebäudehülle und auch einen höheren Energiebedarf für die Heizung aufweisen. Dies wird daran sichtbar, dass zwischen der energetischen Qualität der Gebäudehülle, welche zwischen 0,65 W/m²K in T05 und 1,63 W/m²K in T03 beträgt, und dem Energiebedarf für die Heizung eine Korrelation von 0,62 besteht, was einem starken linearen Zusammenhang entspricht. Ebenfalls wird der Energiebedarf für die Heizung durch die energetische Qualität der Lüftung beeinflusst, die Werte zwischen 0,23 W/(m³/h K) in T07 und 1,21 W/(m³/h K) in T05 zeigt. Zwischen dem Energiebedarf für die Heizung und der energetischen Qualität der Lüftung besteht eine Korrelation von 0,35 und somit ein schwach linearer Zusammenhang.

Die Verteilung des Heizenergiebedarfs auf die Zonen ist vergleichbar mit dem Endenergiebedarf. Wiederum zeigen Zone 01_Lager/Technik und Zone 04_Verkehrsfläche einen deutlich geringeren spezifischen Heizenergiebedarf, der gegenüber dem Gesamtbedarf für die Heizung um 55,9%, bzw. 44,1% unterschritten wird. In Zone 01_Lager/Technik liegt mit 4,7 kWh/m²a in T05 bis 126,5 kWh/m²a in T02 der geringste spezifische Bedarf vor. Auch in Zone 04_Verkehrsfläche zeigt sich ein niedriger Bedarf mit 14,1 kWh/m²a in T03 bis 147,4 kWh/m²a in T08. Dies lässt sich darüber erklären, dass es sich bei diesen Zonen um keinen dauerhaften Aufenthaltsbereich handelt, sodass hier geringere Lufttemperaturen vorherrschen als in anderen Gebäudebereichen. Des Weiteren ist auch nur ein geringer Luftwechsel erforderlich, sodass nur wenige Lüftungswärmeverluste anfallen. Ebenso wie bei Analyse des Endenergiebedarfs wird in Zone 03_Sanitär und 08_Gastronomie der spezifische Gesamtheizwärmebedarf stark überschritten. Für die Zone 03_Sanitär variiert der Heizwärmebedarf in den verschiedenen Theaterspielstätten sehr stark und liegt zwischen 58,4 kWh/m²a in T03 und 598,1 kWh/m²a in T10. Gleiches gilt für Zone 08_Gastronomie, wo sich der Energiebedarf zwischen 85,0 kWh/m²a in T13 und 404,9 kWh/m²a in T04 bewegt. Beide Zonen weisen üblicherweise einen hohen Lüftungsbedarf auf. Im Sanitärbereich trifft dieser mit erhöhten Lufttemperaturen zusammen.

Anhand der bisher analysierten Zonen zeigt sich, dass der Endenergiebedarf maßgeblich durch den Heizwärmebedarf geprägt ist. Eine Ausnahme zeigt sich bei Zone 11_Theatersaal. Hier ist der Energiebedarf für die Heizung im Durchschnitt nur wenig höher als der Gesamtbedarf. Betrachtet man einzelne Theaterspielstätten, so liegen teilweise sogar

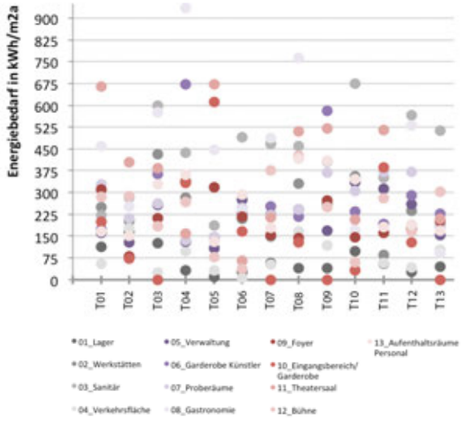

Abb. 111 Spezifischer Endenergiebedarf nach Zonen

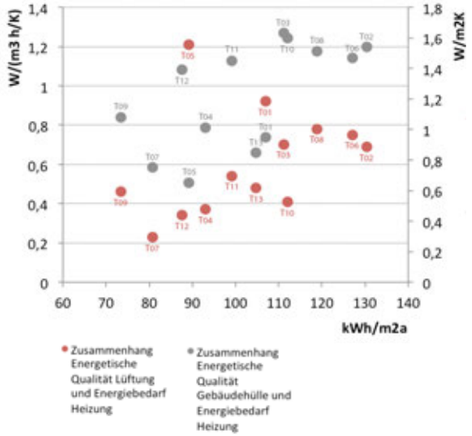

Abb. 112 Zusammenhang zwischen der Energetischen Qualität der Gebäudehülle sowie der Lüftung und dem Energiebedarf für Heizung

unterdurchschnittliche Werte vor. Daraus lässt sich schließen, dass im Falle des Theatersaals nicht der Heizenergiebedarf der Grund für den vergleichsweise hohen Endenergiebedarf ist.

Der erste, große Einflussfaktor auf den Bedarf an elektrischer Energie ist die Beleuchtung. Besonders hoch fällt diese in den Zonen 11_Theatersaal und 12_Bühne aus. Im Theatersaal beträgt diese zwischen 0,4 kWh/m²a in T06 und 197,4 kWh/m²a in T05, was durchschnittlich einen um 231,8% erhöhten spezifischen Beleuchtungsenergiebedarf in dieser Zone ergibt. Mit einem um 234,8% höheren spezifischen Beleuchtungsenergiebedarf und Werten, die sich zwischen 4,9 kWh/m²a in T12 und 300,6 kWh/m²a in T07 bewegen, weicht dieser für Zone 12_Bühne in ähnlicher Höhe vom Gesamtbeleuchtungsenergiebedarf ab. Zu erklären sind diese hohen Werte zum einen durch die szenische Beleuchtung, welche eine sehr hohe Anschlussleistung mit sich bringt und zum anderen durch die Arbeitsbeleuchtung auf der Bühne, welche täglich mehrere Stunden benötigt wird. Somit spielt die Beleuchtung eine große Rolle bei der Zusammensetzung des Endenergiebedarfs für die Zone 11_Theatersaal.

Sehr gering fällt dagegen die Beleuchtungsenergie in der Zone 01_Lager/Technik aus. Hier fallen nur spezifische Beleuchtungsenergiebedarfe zwischen 1,5 kWh/m²a und 20,5 kWh/m²a an. Zurückzuführen ist dies darauf, dass in diesem Bereich nur geringe Sehaufgaben zu erfüllen sind und somit nur eine schwache Beleuchtungsstärke notwendig ist. Hinzu kommt, dass es sich nicht um eine Aufenthaltszone handelt, weshalb die relative Abwesenheit, also die Zeit in der die Beleuchtung nicht genutzt wird, 98% beträgt.

Bisher wurden nur Gewerke betrachtet, für die in allen

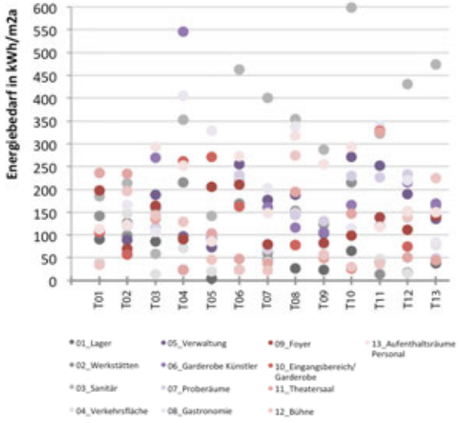

Abb. 113 Spezifischer Energiebedarf für Heizung nach Zonen

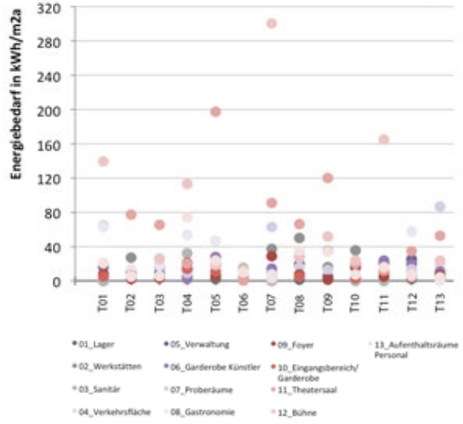

Abb. 114 Spezifischer Energiebedarf für Beleuchtung nach Zonen

Zonen Energiebedarfe anfallen. Für Luftförderung und Kälte entsteht jedoch nicht für jede Zone einen Bedarf, da nicht überall eine mechanische Belüftung oder Klimatisierung erforderlich ist. Welche Bereiche so behandelt werden, kann in Abhängigkeit der Theaterspielstätte variieren.

Bezogen auf die Luftförderung lassen sich die Zonen in vier Gruppen zusammenfassen. Die erste Gruppe enthält Zonen, die überwiegend nicht mechanisch belüftet werden. Dazu zählen die Zonen 02_Werkstätten, 04_Verkehrsfläche, 05_Verwaltung und 13_Aufenthaltsräume Personal. Da es sich zumindest bei den beiden letzten Zonen um Aufenthaltsräume handelt, müssen diese Fenster besitzen, sodass eine Fensterlüftung vorgesehen werden kann.

In der zweiten Gruppe sind die Zonen 07_Proberäume und 10_Eingangsbereich/Garderobe enthalten. Für diese Zonen wird die mechanische Belüftung in den Theaterspielstätten unterschiedlich gehandhabt und ist teilweise vorhanden. Mit wenigen Ausnahmen werden die Zonen 01_Lager/Technik, 03_Sanitär, 08_Gastronomie und 09_Foyer überwiegend mechanisch belüftet. Die Notwendigkeit hierzu ergibt sich vor allen beim Sanitär- und Gastronomiebereich daraus, dass Gerüche konstant abgeführt werden müssen. Während die Zone 01_Lager/Technik einen besonders geringen Energiebedarf für die Luftförderung zeigt, der sich zwischen 0,1 kWh/m²a in T06 und 23,2 kWh/m²a in T03 bewegt, ist dieser im Gastronomiebereich durchschnittlich besonders hoch. Hier zeigen sich Bedarfswerte zwischen 0,2 kWh/m²a in T10 und 356,9 kWh/m²a in T03. Auch der Sanitärbereich zählt zu den drei Zonen mit den höchsten Bedarfswerten, da diese zwischen 0,4 kWh/m²a in T07 und 489,4 kWh/m²a in T03 liegen.

Die letzte Gruppe umfasst die Zonen 11_Theatersaal und 12_Bühne. Hier erfolgt in allen Theaterspielstätten eine mechanische Belüftung, da die Räume einerseits keinen Bezug nach draußen besitzen und anderseits große Mengen an Frischluft zugeführt werden müssen. So ist es zu erklären, dass hier Bedarfswerte zwischen 9,1 kWh/m²a in T10 und 163,3 kWh/m²a in T05 vorliegen. Der vergleichsweise besonders hohe Bedarfswert in T05 lässt sich darüber erklären, dass in dieser Theaterspielstätte ein EnSuite-Betrieb stattfindet, durch den mehr Vorstellungen pro Woche stattfinden als in anderen Häusern, sodass sich mehr jährliche Betriebsstunden für diese Lüftungsanlagen ergeben.

Wie bereits bei der Luftförderung, lassen sich auch für die Kälteversorgung Zonen zusammenfassen. Die meisten Zonen werden nicht mit Kälte versorgt. Zu etwa 75% und damit teilweise gekühlt werden die Zonen 07_Proberäume, 09_Foyer und 10_Eingangsbereich/Garderobe.

In nahezu allen Theaterspielstätten erfolgt eine Kühlung der Zonen 01_Lager/Technik und 11_Theatersaal. Zone 01_Lager/Technik enthält auch die Serverräume sowie Räume, die Standorte der gebäudetechnischen

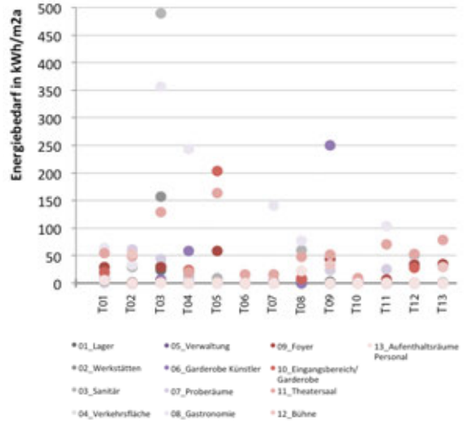

Abb. 115 Spezifischer Energiebedarf für Luftförderung nach Zonen

Anlagen sind. Um diese Geräte, welche selbst Abwärme erzeugen, effizient betreiben zu können, bestehen hier Anforderungen an die Maximaltemperaturen. Daher ist es notwendig diese Räume zu kühlen. Da es sich bei so zu klimatisierenden Räumen um einen geringen Flächenanteil in dieser Zone handelt, ist der spezifische Bedarf eher gering. Dieser bewegt sich zwischen nahezu 0,0 kWh/m²a in T04 und 8,1 kWh/m²a in T02.

In Zone 11_Theatersaal ist der Bedarf dagegen deutlich höher und liegt zwischen 3,0 kWh/m²a in T03 und 101,6 kWh/m²a in T05. Hier wird, mit Ausnahme von T03, der gesamte Bereich der Theatersäle gekühlt, um Wärmelasten durch Personen und Beleuchtung abzuführen und für die Besucher ein komfortables Raumklima zu schaffen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in den Zonen 01_Lager/Technik, 09_Foyer und 11_Theatersaal der höchste Anteil der Endenergie benötigt wird. Der hohe absolute Energiebedarf in der Zone 01_Lager/Technik entsteht jedoch aufgrund der großen Gebäudefläche. Die spezifischen Bedarfswerte für die einzelnen untersuchten Gewerke sind unterdurchschnittlich. Der hohe Endenergiebedarf in Zone 11_Theatersaal liegt dagegen in überdurchschnittlich hohen spezifischen Energiebedarfen für die Beleuchtung und Luftförderung begründet. Hinzu kommt, dass es sich beim Theatersaal um eine der wenigen Zonen handelt, die in Theaterspielstätten gekühlt werden. Der Heizwärmebedarf fällt bei dieser Zone nicht so sehr ins Gewicht. Ein überdurchschnittlich hoher Energiebedarf für die Heizung entsteht dagegen in der Zone 03_Sanitär und 08_Gastronomie, da hier vor allem ein erhöhter Lüftungsbedarf vorliegt.[14]

Literatur:
[14] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009b)

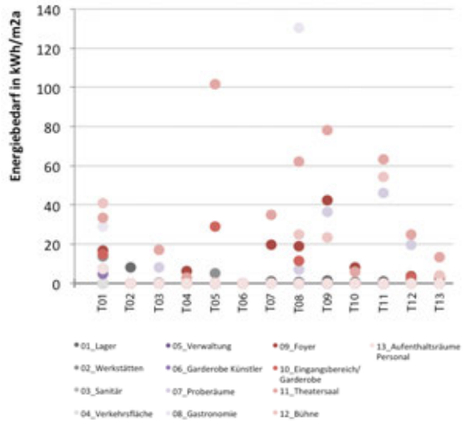

Abb. 116 Spezifischer Energiebedarf für Kälte nach Zonen

Abb. 117 Garderobenbereich des Opernhauses Chemnitz

5.5 Auswertung des Raumkomforts

5.5.1 Bewertungskriterien

5.5.1.1 Raumluftqualität

Zur Beurteilung der Raumluftqualität dient das Maß der Verunreinigung der Luft als Grundlage. Zu den Verunreinigungen, die durch die Lüftung abgeführt werden müssen, zählen vor allem die CO_2-Belastung, Gerüche und Staubpartikel. Sofern Personen in dem zu betrachtenden Raum die Hauptverursacher der Verunreinigung sind, ist die Messung der CO_2-Konzentration zur Beurteilung der Raumluftqualität ausreichend, da das geruchslose Gas durch den menschlichen Stoffwechsel kontinuierlich freigesetzt wird.

Bei unzureichender Lüftung steigt die CO_2-Konzentration in einem Raum fortlaufend an, was sich auf die darin befindlichen Personen negativ auswirkt, da es bei zu hohen CO_2-Konzentrationen zu einer Abnahme der mentalen Leistung sowie zu Symptomen wie Kopfschmerzen, Müdigkeit, Schwindel und Konzentrationsschwäche kommen kann. Während Konzentrationen unter 1000 ppm als hygienisch unbedenklich einzustufen sind, ist eine Konzentration zwischen 1000 und 2000 ppm bereits als hygienisch auffällig und Werte über 2000 ppm als hygienisch inakzeptabel zu beurteilen.

Eine detailliertere Empfehlung von Auslegungswerten zur Luftqualität erfolgt sowohl in der „DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme“ als auch in der „DIN EN 15251: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik“. Beide Normen definieren vier Kategorien nach denen eine Klassifizierung der Raumluftqualität erfolgen kann, welche sich nur geringfügig in ihren Vorgaben voneinander unterscheiden. Während in der DIN EN 15251 nur Standartwerte zur Auslegung angegeben sind, enthält DIN EN 13779 darüber hinaus Auslegungsbereiche. Die Grenzen beider Bewertungskriterien werden in Abhängigkeit der CO_2-Außenluftkonzentration definiert, da die Angaben in der Norm Werten darüber entsprechen. Die CO_2-Konzentration in der Außenluft unterliegt jährlichen Schwankungen und weist Konzentrationen im Bereich von 350 bis 600 ppm auf.

In Stadtzentren, wo die meisten Theaterspielstätten verortet sind, werden üblicherweise CO_2-

	CO2-Konzentration in der Raumluft
hygienisch unbedenklich	*< 1000 ppm*
hygienisch auffällig	*1000 - 2000 ppm*
hygienisch inakzeptabel	*> 2000 ppm*

Abb. 118 Hygienische Bewertung der CO_2-Konzentration nach Pettenkofer [74]

	CO_2-Konzentration über Außenluftkonzentration		CO_2-Konzentration bei Außenluftkonzentration von 400 ppm	
	von	bis	von	bis
IDA I	*< 400 ppm*		*< 800 ppm*	
IDA II	*400 ppm*	*600 ppm*	*800 ppm*	*1000 ppm*
IDA III	*600 ppm*	*1000 ppm*	*1000 ppm*	*1400 ppm*
IDA IV	*> 1000 ppm*		*> 1400 ppm*	

Abb. 119 Kategorisierung der CO_2-Konzentration nach DIN EN 13779 [35]

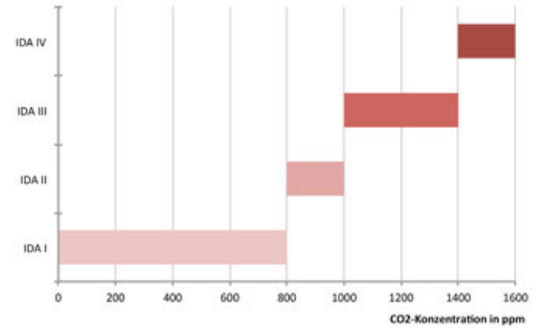

Abb. 120 Darstellung Raumluftklassen (IDA)

Konzentrationen von 400 ppm gemessen, sodass dies als Auslegungswert für die Bewertung gewählt wurde. Somit liegt mit IDA 1 eine hohe Raumluftqualität im Innenraum der Theaterspielstätte vor, wenn die CO_2-Konzentration unter 800 ppm liegt. Mit IDA 2 wird eine mittlere Raumluftqualität erreicht, wenn sich die CO_2-Konzentration im Bereich zwischen 800 und 1000 ppm bewegt. Diese sollte bei Neubauten und Sanierungen mindestens erreicht werden. Eine mäßige Raumluftqualität mit IDA 3 liegt vor, wenn die CO_2-Konzentration zwischen 1000 und 1400 ppm beträgt. Als niedrige Raumluftqualität mit IDA 4 werden CO_2-Konzentrationen über 1400 ppm eingestuft.[35],[36],[74],[110]

Literatur:
[35] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012a)
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012b)
[74] Lahrz, T. et al. (2008)
[110] Voss, K. et al. (2016)

5.5.1.2 Thermischer Komfort

Der ideale Zustand des Körpers in Bezug auf das Wärmeempfinden ist als thermisches Gleichgewicht definiert. Es ist daher ein Bestreben, durch die Architektur und die Gebäudetechnik ein Innenraumklima herbeizuführen, das dieses begünstigt. Zur Vorhersage des gesamtkörperlichen Wärmeempfindens wurde von P.O. Fanger auf Grundlage von umfassenden Studien eine Formel entwickelt. Das PMV (predicted mean vote) berücksichtigt die Bekleidung, Aktivität, Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte. Die Bewertung der thermischen Empfindung wird mittels einer 7-stufigen Likert-Skala durchgeführt, welche im Bereich von -3 bis +3 die Empfindungen „kalt“ bis „heiß“ erfasst.

Aus dem PMV ableiten lässt sich der PPD (predicted percentage of dissatified). Dieser erlaubt die Vorhersage des prozentualen Anteils an Personen, die mit dem vorhandenen Umgebungsklima unzufrieden sind, da sie es wahrscheinlich als zu warm oder zu kalt empfinden. Auf Basis des PPD wurden vier Kategorien festgelegt, anhand derer das Raumklima klassifiziert werden kann. Die vier Kategorien orientieren sich an der Erwartungshaltung der Nutzer an das Raumklima und geben eine Empfehlung für die Anwendbarkeit. Während mit Kategorie I die Erfüllung eines hohen Maßes an Erwartungen angestrebt wird, wird bei Kategorie II von einer normalem und bei Kategorie III von einer annehmbaren, moderaten Erwartungshaltung ausgegangen. In Kategorie IV werden alle Werte zusammengefasst, die nicht in die vorherigen Kategorien eingeordnet werden können. Somit können Raumklimawerte, die dieser Kategorie zugeordnet werden, keine Erwartungshaltung erfüllen. Zur Beurteilung des Raumklimas bestehender Gebäude kann Kategorie III als Bewertungsgrundlage dienen, während an neue und renovierte Gebäude mit Kategorie II höhere Anforderungen gestellt werden.

Sowohl in DIN EN ISO 7730 als auch in DIN EN 15251 befinden sich Beispiele für Innenraumtemperaturen

unterschiedlicher Gebäude- bzw. Raumtypen, die als Gestaltungskriterien für den Raumkomfort, bzw. für Energieberechnungen angesetzt werden können. Üblicherweise werden die operativen Temperaturen als Bewertungsgrundlage verwendet. Sofern die Temperaturen großer Raumoberflächen nicht signifikant von der Lufttemperatur abweichen, reicht aber meist die mittlere Raumlufttemperatur als Kriterium aus, wovon bei der Beurteilung der Querschnittserhebung ausgegangen wird.

Für einige Raumtypen sind in der Norm für die vier Stufen zulässige Innenraumtemperaturbereiche angegeben, die mit Hilfe der PMV-Grenzen sowie über die Festsetzung der Parameter „Aktivität“ und „Bekleidung“ ermittelt wurden. Die Temperaturbereiche ermöglichen eine einfache Kategorisierung des Raumklimas anhand von gemessenen Temperaturen ohne eine aufwändige Berechnung des PMV.

Zur Bewertung der Zuschauersäle in den evaluierten Theaterspielstätten wurde zunächst der Raumtyp „Hör-, bzw. Zuschauersäle“ angewendet. Dieser ist durch eine sitzende Aktivität mit einer Wärmeabgabe von 1,2 met geprägt. Zur Definition der weiteren Parameter wird zwischen der Heiz- und der Kühlperiode unterschieden. Während die Heizperiode dadurch gekennzeichnet ist, dass eine Beheizung des Gebäudes zumindest zeitweise erforderlich ist, um die Innenraumtemperaturen auf einem konstanten Niveau zu halten, ist in der Kühlperiode hierzu meist der Einsatz von Kühlgeräten erforderlich. Gemäß der DIN 4108 sind Tage, an denen die mittlere Außentemperatur unter der Heizgrenze von 15°C liegt, als Heiztage zu bewerten. Während der Querschnittsmessungen waren 97,0% der Messtage als Heiztage einzustufen. Im Heizfall, der zur Bewertung der Messergebnisse zu Grunde gelegt wird, wird von einer Bekleidung mit 1,0 clo ausgegangen. Die Temperaturbereiche wurden für eine durchschnittliche Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s, einen Turbulenzgrad von 40% und eine relative Luftfeuchte von 40% festgelegt. Unter Berücksichtigung dieser Parameter wurde ein Neutralitätspunkt von 22°C für die operative Temperatur ermittelt. In Abhängigkeit der Erwartungen an das Raumklima schwanken die operativen Temperaturen um diesen für Kategorie I mit +- 1K, für Kategorie II mit +- 2K und für Kategorie III mit +- 3K.

Die Anwendung der beschriebenen Behaglichkeitsbereiche sollte nur für stationäre Bedingungen erfolgen. Temperaturzyklen sowie Temperaturdrifts und -gefälle können zur Beeinträchtigung der thermischen Behaglichkeit führen, sodass Grenzwerte festgelegt wurden, innerhalb derer die Bedingungen als stationär angesehen werden können. Für Temperaturzyklen gilt, dass die Spitze-Spitze-Schwankungen weniger als 1K betragen sollten, während bei Temperaturdrifts und –gefällen die Änderungsrate geringer als 2,0 K/h sein sollte.

Eine alleinige Beurteilung des gesamtkörperlichen Wärmeempfindens ist zur Bewertung des thermischen Komforts jedoch nicht ausreichend, da der Mensch besonders bei geringen Aktivitätsgraden gegenüber lokalen thermischen Veränderungen anfällig ist. Vor allem durch vertikale Temperaturunterschiede, zu warme oder kalte Fußbodentemperaturen, Asymmetrie der Strahlungstemperatur und Zugluft können lokale thermische Unbehaglichkeiten entstehen.

Um die vertikalen Lufttemperaturunterschiede zwischen Kopf und Fußgelenk zu bewerten, sieht die DIN EN ISO 7730 sowie die DIN 7726 Messungen in Höhe von 1,1m und 0,1m über dem Fußboden vor, was der Höhe der am Messtorso installierten Sensoren entspricht. Auch hier erfolgt eine Einordnung in jeweils vier Kategorien in Abhängigkeit des Temperaturunterschieds zwischen Kopf und Fußgelenk. In Kategorie A werden alle Messwerte einsortiert, die eine geringere Differenz als 2 K aufweisen. Bei einem Unterschied, der geringer als 3 K ist, können die Werte der Kategorie B zugeordnet werden. Sofern die Abweichung geringer als 4 K ist, erfolgt eine Einordnung in Kategorie C. Es ist jedoch zu beachten, dass die Bewertung sich auf eine zum Kopf hin ansteigende Temperatur bezieht. Zum Kopf hin abfallende Temperaturen werden von den Nutzern weniger stark empfunden.

Zur Untersuchung der Beeinträchtigung der Nutzer durch Zugluft kann die DR (draught rating) berechnet werden. Die Kennzahl bezieht die Luftgeschwindigkeit, den Turbulenzgrad der Luftströmung und die Lufttemperatur mit ein. Bei einer nahezu neutralen gesamtthermischen Empfindung des Körpers treten bei geringen Aktivitätsgraden, wie es bei dem Besuch einer Theatervorstellung der Fall ist, am häufigsten Zugerscheinungen auf. Bei höheren Aktivitätsgraden oder einem höheren Temperaturempfinden ist der Mensch gegenüber Zug unempfindlicher. Besonders empfindlich ist der Mensch im Nackenbereich. Wird die Berechnung der Kennzahl dagegen für Messergebnisse in Höhe der Arme und Beine angewendet, so kann dies zu einer Überbewertung

Kategorie	Beschreibung
Kategorie A / IDA I	*hohes Maß an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z. B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen*
Kategorie B / IDA II	*normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude*
Kategorie C / IDA III	*annehmbares, moderates Maß an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden*
IDA IV	*Werte außerhalb der oben genannten Kategorien. Diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden*

Abb. 121 Beschreibung der Kategorien zur Bewertung des thermischen Komforts nach DIN EN 15251 [36]

	Temperatur		Temperatur-differenz	Luft-geschwindigkeit	Luftfeuchte	
	von	bis			von	bis
Kategorie A / I	*21 °C*	*23 °C*	*< 2°C*	*< 0,10 m/s*	*30%*	*50%*
Kategorie B/ II	*20°C*	*24°C*	*< 3°C*	*< 0,16 m/s*	*25%*	*60%*
Kategorie C / III	*19°C*	*25°C*	*< 4°C*	*< 0,21 m/s*	*20%*	*70%*

Abb. 122 Gestaltungskriterien nach DIN EN 15251 für den Raumtypen „Hör, bzw. Zuschauersäle“ [36]

der Ergebnisse führen. Auch für das Zugempfinden bestehen drei Kategorien zur Einschätzung, die über die Höhe des PD definiert sind. Um die Bewertung anhand von Luftgeschwindigkeiten vornehmen zu können, wurden in Abhängigkeit des Raumtyps Annahmen für die Lufttemperatur und einen üblichen Turbulenzgrad getroffen. Da ein Mindestmaß an Luftgeschwindigkeit für die thermische Behaglichkeit nicht erforderlich ist, sind lediglich Höchstwerte in Abhängigkeit der Jahreszeit definiert. Diese sind für Kategorie A auf 0,1 m/s, bei Kategorie B auf 0,16 m/s und bei Kategorie C auf 0,21 m/s beschränkt.
Zwar hat die Luftfeuchte nur eine geringe Auswirkung auf die Temperaturempfindung, dennoch sollten auch hier bestimmte Grenzen nicht über-, bzw. unterschritten werden. Während zu hohe Raumluftfeuchten mikrobielles Wachstum begünstigen, verursachen sehr niedrige Raumluftfeuchten unangenehme Trockenheit und Reizungen der Augen sowie Atemwege. Daher wird in der DIN EN 15251 empfohlen, dass Grenzwerte von 30% nicht unter- und 65% nicht überschritten werden sollten. Eine weitere Differenzierung kann über die Betrachtung der Anforderungen an die Auslegung von Be- und Entfeuchtungsanlagen erfolgen. Hieraus ergeben sich unterschiedliche große Feuchtigkeitsspannen, die in drei Kategorien eingeordnet werden können. In Kategorie I liegt die Spanne bei 30% bis 50%, während Kategorie II eine Spanne von 25% bis 60% beinhaltet. Kategorie III hat die größte Spanne mit 20% bis 70%.[30],[32],[36],[37],[55],[85]

Literatur:
[30] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2002)
[32] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2006)
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012b)
[37] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2003)
[55] Hellwig R. T. et. al. (2008)
[85] Richter, W. (2007)

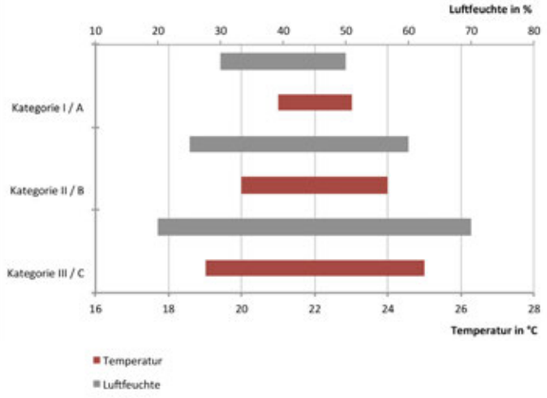

Abb. 123 Anforderungsbereiche für Relative Luftfeuchte und Operative Temperatur nach den Kategorien

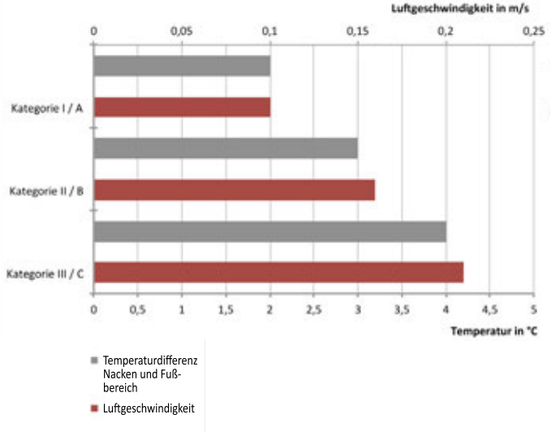

Abb. 124 Anforderungsbereiche für Zugluft und Vertikale Temperaturunterschiede nach den Kategorien

5.5.2 Darstellung und Bewertung der Messergebnisse

5.5.2.1 Raumluftqualität

Wie bereits in [5.3.1.1] beschrieben, wird zur Bewertung der Raumluftqualität der CO_2-Gehalt zu Grunde gelegt. Die während des gesamten Messzeitraums in den verschiedenen Theaterspielstätten durchschnittlich erfassten Messwerte liegen zwischen 403 ppm in T09 und 573 ppm bei T06. Somit befinden sich die Durchschnittswerte nur wenig über der angenommenen CO_2-Konzentration der Außenluft von 400 ppm. Die geringen Durchschnittswerte können zum einen auf das große Raumluftvolumen der Theatersäle sowie den geringen Nutzungsanteil zurückgeführt werden. Innerhalb des Messzeitraums fanden in den Zuschauersälen durchschnittlich nur zu 7,2% der Zeit Vorstellungen statt, sodass der Raum zu 92,8% ungenutzt blieb oder bei Proben nur mit einer geringen Personenanzahl belegt war. Zum anderen spielt bei manchen Theaterspielstätten sicherlich auch die Lage und die Ansaugposition der Frischluft für die Lüftungsanlagen eine Rolle.

Die gemessenen Minima liegen zwischen 328 ppm in T02 sowie T09 und 459 ppm in T07. Dahingegen wurden Maxima von 673 ppm in T09 bis 1719 ppm in T12 erfasst. Die Maxima treten, aufgrund der hohen Personenanzahl in Zusammenspiel mit der hohen Belegungsdichte, meist während der Vorstellungen auf.
Die stark erhöhte CO_2-Konzentration während der Vorstellungen wird sichtbar, wenn der Mittelwert der ungenutzten Zeit dem während der Vorstellungszeit auftretenden Wert gegenübergestellt wird. Während der Vorstellungen liegt die CO_2-Konzentration zwischen 441 ppm in T09 und 762 ppm in T12. Demgegenüber stehen Werte während der Nichtnutzung zwischen 399 ppm in T09 und 570 ppm in T06. Somit sind die Werte während der Vorstellung gegenüber der Nichtnutzung durchschnittlich von 39 ppm in T08 bis 254 ppm in T12 erhöht.
Aufgrund der gemessenen Werte ist die CO_2-

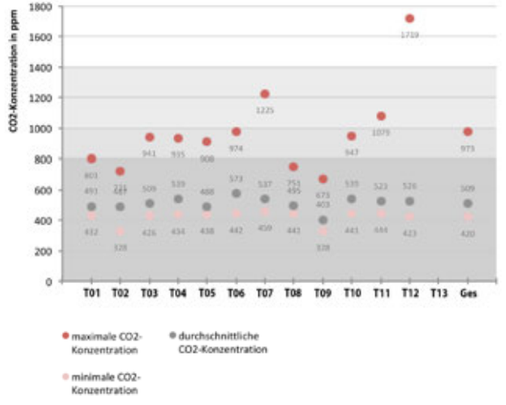

Abb. 125 Minimale, maximale und durchschnittliche CO_2-Konzentrationen in den Theaterspielstätten

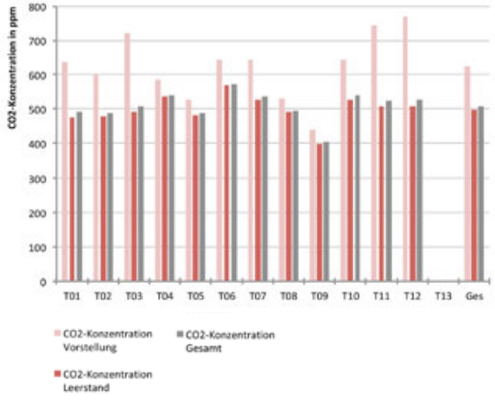

Abb. 126 Durchschnittlichen CO_2-Konzentrationen während der Nutzungs- und des Leerstandszeiten

Konzentration in nahezu allen Theaterspielstätten als hygienisch unbedenklich einzustufen, da diese unter 1000 ppm liegen und somit eine ausreichende Lüftung vorliegt. Eine Ausnahme bilden hier T07, T11 und T12, bei welchen einige Messwerte den Grenzwert überschreiten und sich damit im hygienisch bedenklichen Bereich befinden. Bei T07 wurde die maximale CO_2-Konzentration im Zuschauerraum außerhalb der Vorstellungszeit gemessen und ist somit zu vernachlässigen. Dennoch traten auch gegen Ende einer dreistündigen Vorstellung, die eine Auslastung von über 90% zeigte, kurzfristig Werte über 1000ppm auf.
Im Falle von T11 lag das Maximum mit 1079 ppm nur knapp über dem Grenzwert, jedoch zeigten sich entsprechende Werte zu Beginn einer Vorstellung konstant über eine Stunde lang. Gegenüber den anderen Vorstellungen im Messzeitraum wies, wie bereits bei T07 beobachtet, auch diese mit 97,5% eine sehr hohe Auslastung und eine Dauer von drei Stunden auf. In weiteren Vorstellungen traten keine vergleichbaren CO_2-Konzentrationen auf, jedoch bestand dort auch eine geringere Auslastung.
In T12 wurde mit 1719 ppm von allen betrachteten Theaterspielstätten die höchste CO_2-Konzentration erfasst. Entgegen der Beobachtungen aus den anderen beiden Theaterspielstätten zeigte sich diese bei einer Vorstellung, die eine Auslastung von nur 50% aufwies. Eine Gemeinsamkeit ist jedoch in der Dauer der Vorstellung zu erkennen, die dreieinhalb Stunden betrug. Während der gesamten Vorstellungsdauer lag die CO_2-Belastung über 1000 ppm. Im Anschluss an Vorstellungen dauerte es etwa fünf Stunden bis wieder der Ausgangswert für die CO_2-Konzentration vor der Vorstellung erreicht war. Dies lässt vermuten, dass die Lüftungsanlage an diesem Tag ein zu geringes Luftvolumen förderte oder die Außenluft bereits eine sehr hohe CO_2-Konzentration aufwies. Nur bei einer weiteren Vorstellung wurde kurzfristig ein Messwert über 1000 ppm erfasst. Dies kann aber auch darauf zurückzuführen sein, dass alle anderen Vorstellungen eine geringere Dauer oder eine noch geringere Auslastung zeigten.
Zur Überprüfung ob eine hohe Auslastung oder eine lange Vorstellungsdauer tatsächlich in Bezug auf die Lüftung problematisch sind, wurden Korrelationen zwischen der durchschnittlichen CO_2-Konzentration einer Vorstellung und deren Dauer, bzw. der Auslastung gebildet. Die Korrelation der CO_2-Konzentration zur Vorstellungsdauer liegt zwischen -0,41 in T10 und 0,61 in T12. Alle Spielstätten, bis auf T12, zeigen somit nur einen schwach linearen Zusammenhang, sodass allgemein nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Steuerung und Auslegung der Lüftungsanlagen bei langandauernden Vorstellungen zu Problemen führt.
Die Betrachtung der Korrelation zwischen der CO_2-Konzentration und der Auslastung ergab ein heterogeneres Bild. Hier bewegte sich die Korrelationen im Rahmen von -0,65 in T07 und 0,97 in T06. Somit wiesen T01, T03, T04, T05 und T12 nur einen schwach linearen Zusammenhang auf. Dies ist damit zu erklären, dass die Lüftungsanlagen eine bedarfsabhängige oder variable Steuerung besitzen, indem sie entweder in Abhängigkeit der CO_2-Konzentration in der Raumluft oder der Nutzung ein entsprechendes Luftvolumen fördern.
Mittlere lineare Zusammenhänge sind bei T02, T07, T10 und T11 festzustellen. Hier zeigt sich, dass diese Lüftungsanlagen überwiegend über eine konstante Steuerung verfügen, sodass eine höhere Auslastung tendenziell zu höheren CO_2-Konzentrationen führt. Eine Ausnahme bildet T07. In diesem Fall sinkt die CO_2-Konzentration mit steigender Zuschauerzahl.
Ein stark linearer Zusammenhang konnte in T06 beobachtet werden, obwohl der Zuschauersaal nach Angaben der Theaterspielstätte durch eine bedarfsabhängig gesteuerte Lüftungsanlage versorgt wird. Die Untersuchung der Korrelation zwischen der CO_2-Konzentration in der Raumluft sowie der Auslastung im Zuschauersaal spiegelt im Allgemeinen die unterschiedlichen Arten der Anlagensteuerung wieder.
Zur Beurteilung, welche Raumluftqualität in allen betrachteten Spielstätten vorliegt, werden alle erfassten Messwerten Kategorien gemäß DIN EN 13779 zugeordnet. Durch diese Kategorisierung ist festzustellen, dass sich mehrere Gruppen herausbilden. Die erste Gruppe umfasst Spielstätten, bei denen IDA I während des gesamten Nutzungszeitraums erreicht wird und somit eine hohe Raumluftqualität besteht. Dies trifft auf T02, T05, T08 und T09 zu. In der zweiten Gruppe mit T01, T04 und T07 liegt der zeitliche Anteil, in dem IDA I nicht erreicht wird, aber die Werte in IDA II einzusortieren sind, unter 2%. Auch in diesen Spielstätten liegt somit eine hohe Raumluftqualität vor. Keiner Gruppe zugeordnet werden kann T10, da hier der Anteil der Werte in IDA II nur knapp 5% übersteigt, sodass hier die Raumluftqualität als mittel zu bewerten ist. Auch in den restlichen Theaterspielstätten wird IDA I während eines Großteils der Zeit erreicht. In die dritte Gruppe sind T03 und T06 einzuordnen, da über 10% der gemessenen Werte auf IDA II entfallen. Außerhalb dieser Kategorie wurden jedoch keine Werte erfasst. Somit liegt in diesen Spielstätten eine mittlere Raumluftqualität

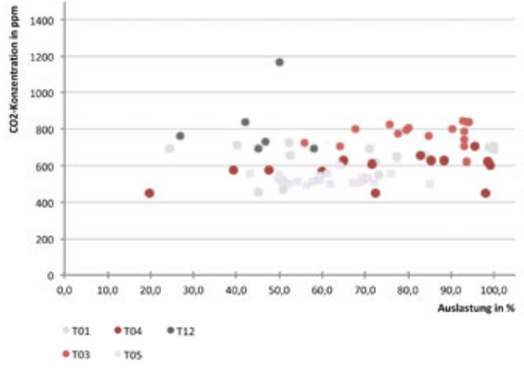

Abb. 127 Theaterspielstätten mit einem schwachen linearen Zusammenhang zwischen CO_2-Konzentration und Auslastung

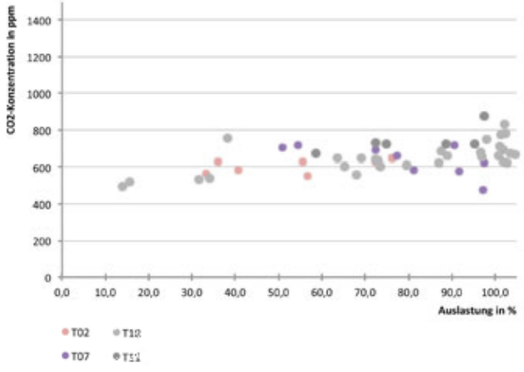

Abb. 128 Theaterspielstätten mit einem mittleren linearen Zusammenhang zwischen CO_2-Konzentration und Auslastung

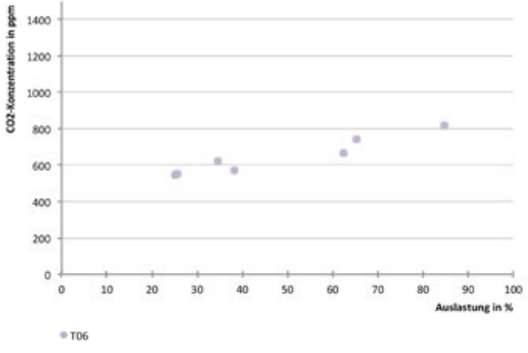

Abb. 129 Theaterspielstätten mit einem starken linearen Zusammenhang zwischen CO_2-Konzentration und Auslastung

vor. Die vierte Gruppe beinhaltet T11 und T12. Beide Spielstätten zeigen neben großen Anteilen in IDA I und IDA II auch Raumluftqualitäten, die der Kategorie IDA III entsprechen. Während bei T11 der Anteil der Werte in IDA III geringer als 5% ist und somit noch eine mittlere Raumluftqualität erzielt werden kann, liegt in T12 nur eine mäßige Raumluftqualität vor. Hier müssen 8,0% der Werte IDA III zugeordnet werden. T12 ist die einzige Spielstätte, bei der sogar 2,2% Werte in IDA IV, einer niedrigen Raumluftqualität, zugeordnet werden müssen. Die vorangegangene Analyse zeigt, dass in den Spielstätten überwiegend hohe und mittlere Raumluftqualitäten vorliegen, sodass es im Allgemeinen durch eine zu hohe CO_2-Konzentration in der Raumluft auch bei hohen Auslastungen nur in Einzelfällen, wie in T06 und T12, zu einer Beeinträchtigung der Zuschauer kommen sollte und keine unzureichende Belüftung festzustellen ist.

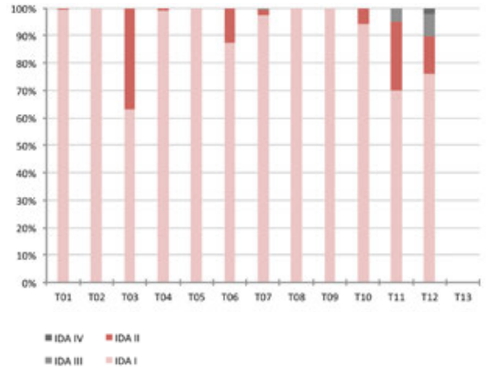

Abb. 130 Einordnung der Messwerte zur CO_2-Konzentration in die Kategorien der Raumluftqualität

5.5.2.2 Lufttemperatur

Zur Bewertung der durch den Messtorso erfassten Komfortparameter im Zuschauersaal werden die in [5.3.1.2] beschriebenen Kriterien zu Grunde gelegt. Erfasst wurden die Parameter Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte sowie die Luftgeschwindigkeit jeweils im Kopf- und Fußbereich.
Zur Beurteilung der thermischen Empfindung wird die Lufttemperatur als maßgebliches Kriterium betrachtet. Während des Messzeitraums wurden im Kopfbereich Minima zwischen 20,71°C in T01 und 22,29°C in T11 erfasst, welche außerhalb der Vorstellungszeiten auftraten. Die geringe Spannweite von 1,58°C zwischen den unterschiedlichen Theaterspielstätten zeigt, dass die Ausgangswerte zur Auslegung der Temperatur ähnlich gewählt werden. Die erfassten Maxima betragen zwischen 24,29°C in T02 und 27,09°C in T03. Im Gegensatz zu den Minima, die außerhalb des Vorstellungszeitraums erfasst wurden, stellen sich die Maxima währenddessen ein. Begründet werden kann dies durch die während der Vorstellung auftretenden hohen internen Lasten durch Zuschauer und Beleuchtung, die einen Anstieg der Lufttemperatur begünstigen. Die Spanne zwischen den Maximaltemperaturen der unterschiedlichen Theaterspielstätten ist im Gegensatz zu den Minimalwerten mit 2,80°C fast doppelt so hoch. Eine Begrenzung der Temperaturen nach oben wird in den Theaterspielstätten also sehr unterschiedlich behandelt. Die durchschnittliche Temperatur variiert in den einzelnen Theaterspielstätten zwischen 22,92°C für T04 und 24,83°C für T09, sodass sich eine Durchschnittstemperatur über alle Theaterspielstätten von 23,86°C ergibt.
Anhand der Minima, Maxima sowie der Mittelwerte können bereits Aussagen zur Erreichung der Komfortbereiche für den gewählten Raumtypen abgeleitet werden. Die unterste Behaglichkeitsgrenze der mittleren Kategorie B beträgt 20°C. Jeder Behaglichkeitskategorie sind PMV-Grenzen zugeordnet durch welche sich die zugehörigen Temperaturgrenzen ermitteln lassen [siehe 5.3.1.2]. Für die Kategorie B liegen diese bei -0,5 und +0,5, was einer Temperaturempfindung von etwas kühl bis etwas warm entspricht. Da der untere Grenzwert von 20°C in keiner der betrachteten Theaterspielstätten unterschritten wird, ist davon auszugehen, dass die Zuschauer das Raumklima tendenziell nicht als zu kalt empfinden. Anhand der Maxima ist zu erkennen, dass die Grenzwerte der Kategorie C in den meisten Theaterspielstätten zumindest zeitweise überschritten werden. Auf Grund dessen sowie der hohen Durchschnittstemperatur, die bereits 1,86°C über dem thermischen Neutralitätspunkt von 22°C liegt, ist eher eine Unzufriedenheit der Zuschauer wegen zu hoher Lufttemperaturen zu erwarten.
Zur Bewertung des thermischen Komforts im Zuschauersaal muss zwischen der Nutzungszeit und den Leerstandszeiten differenziert werden. Während der Nutzungszeiten, die zur Bewertung der Behaglichkeit ausschlaggebend sind, ist die Lufttemperatur gegenüber des Leerstands durchschnittlich um 0,72°C erhöht. Auch hier zeigen sich Unterschiede zwischen den verschiedenen Theaterspielstätten. Während mit 0,02°C in T09 fast keine Temperaturdifferenz besteht, ist diese in T11 mit 1,34°C deutlich zu erkennen.
Zur Bewertung der Komfortbedingungen im Bereich der Lufttemperatur werden alle Messwerte, die während der Nutzungszeit erfasst wurden, den drei in [5.3.1.2] beschriebenen Kategorien zugeordnet. Für neue oder renovierte Gebäude sollte mindestens Kategorie B erreicht werden, während für bestehende Gebäude Kategorie C als Maßstab angelegt werden kann. Trotz ähnlicher Minima und Maxima in den Theaterspielstätten fällt auf, dass die Häufigkeit der gemessenen Lufttemperaturen sehr unterschiedlich ist. Die Einordnung ergab, dass der zeitliche Anteil,

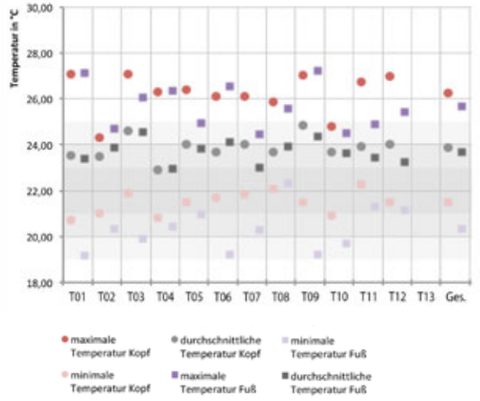

Abb. 131 Minimale, maximale und durchschnittliche Lufttemperaturen in den Theaterspielstätten

Abb. 132 Zuschauersaal des Staatstheaters Freiburg

in dem mindestens Kategorie B erreicht wird, in den Theatern zwischen 1,97% für T03 und 80,53% für T02 variiert. Dies zeigt, dass in keiner Theaterspielstätte ein normales Maß an Erwartungen in Bezug auf die Raumlufttemperaturen erfüllt werden kann. Wird die Einordnung einschließlich Kategorie C betrachtet, so liegen die Werte zwischen 31,82% für T05 und 100,00% für T02 sowie T10. Dies zeigt, dass zumindest einige Theaterspielstätten einem moderaten Maß an Erwartungen gerecht werden können.

Eine tiefergreifende Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Lufttemperaturen ergab mehrere Gruppen. Ein normales Maß an Erwartungen wird mit über 70% in T02 und T10 befriedigt. Alle weiteren Messwerte können in Kategorie B eingeordnet werden, sodass insgesamt Kategorie C als erfüllt betrachtet werden kann. Obwohl auch Werte außerhalb von Kategorie C auftreten, liegt der Erfüllungsgrad dieser Kategorie für T04 bei 96,5%, sodass auch hier ein moderates Maß an Erwartungen erzielt wird. Im Falle von T01 können jeder Kategorie Messwerte zugeordnet werden. Der überwiegende Teil mit 82,3% befindet sich jedoch in Kategorie A bis C, dennoch ist der Anteil von 17,7% außerhalb der Kategorien zu hoch, als dass noch ein moderates Maß an Erwartungen erfüllt werden kann. In T06 und T12 sowie in T07 und T08 liegt der Anteil von Werten, die keiner Kategorie nach [5.5.1.2] zugeordnet werden können, bereits über 30%. Hier wird folglich keine Behaglichkeitskategorie erfüllt. Gleiches gilt für T05, T09 und T11. Jedoch beträgt hier der Anteil von Werten außerhalb der Behaglichkeitskategorien mehr als 60%. Die Auswertungen lassen somit erwarten, dass ein großer Anteil an Personen mit den vorliegenden Temperaturbedingungen unzufrieden ist.

Neben der Lufttemperatur haben auch starke Temperaturänderungen und -schwankungen

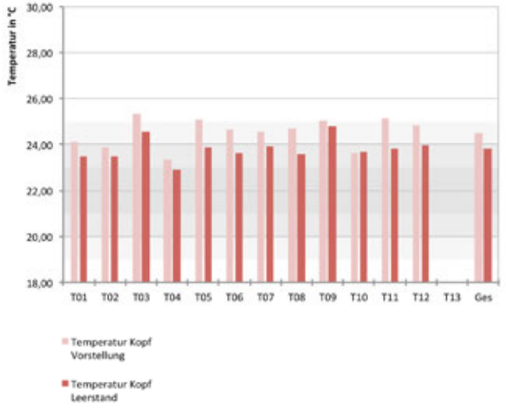

Abb. 133 Vergleich der durchschnittlichen Lufttemperaturen während der Vorstellungen und der Leerstandszeiten

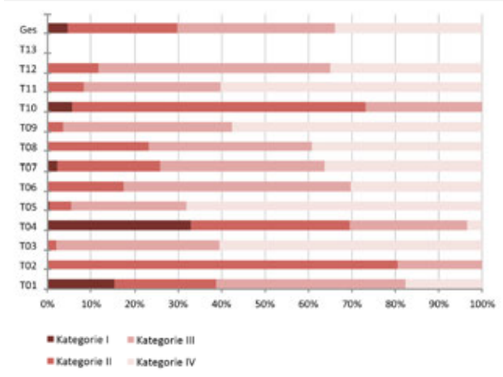

Abb. 134 Kategorisierung der Lufttemperaturen während der Vorstellungszeiten

Einfluss auf die Behaglichkeit. Bei einer Betrachtung der Temperaturänderungen innerhalb eines Messintervalls lässt sich feststellen, dass sie während der Vorstellungen deutlich höher sind als zu Leerstandszeiten. Während den Vorstellungszeiten liegen sie durchschnittlich im Bereich von 0,01 K/l für T10 bis 0,32 K/l für T11. Im Gegensatz hierzu bewegt sich die Temperaturänderung zu Leerstandszeiten nur zwischen 0,01 K/l bei T10 und 0,07 K/l bei T07 und T09. Die stärkere durchschnittliche Änderung der Temperatur zu Vorstellungszeiten ist auf die hohen internen Lasten durch Personen und Beleuchtung zurückzuführen, die durch die Lüftungsanlage nicht vollständig abgeführt werden können.

Zur Beurteilung, ob die Behaglichkeit durch Temperaturdrifts beeinflusst wird, werden diese stündlich betrachtet und sollten 2 K/h nicht überschreiten. Weder bei Temperatursenkungen, die zwischen 0,04 K/h in T04 und 1,29 K/h in T09 liegen, noch bei Temperaturerhöhungen, welche von 0,10 K/h in T10 bis 2,05 in T11 betragen, wird dieser Wert erheblich überschritten. Die einzige Überschreitung wird bei T11 sichtbar. Hier überschreitet die Temperaturerhöhung den Grenzwert zu einem Zeitpunkt um lediglich 0,05 K/h. Somit kann allgemein angenommen werden, dass bei den Theaterspielstätten ein stationärer Temperaturzustand vorliegt.

Wie bereits durch die Analyse der Temperaturänderung zu vermuten war, weist die Lufttemperatur im ungenutzten Zustand meist auch eine größere Konstanz auf. Die Standardabweichungen während der Vorstellungszeiten liegen zwischen 0,17 K für T02 und 1,29 K für T01. Dagegen betragen diese während des Leerstands nur 0,36 K bei T02 bis 1,05 K bei T01. Eine Ausnahme bilden T02, T09 und T10. Für diese drei Spielstätten wurde während des Leerstands eine

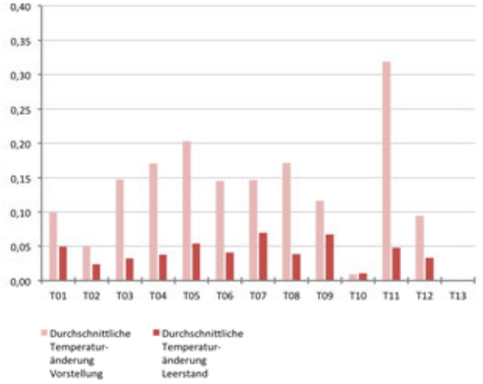

Abb. 135 Vergleich der durchschnittlichen Temperaturänderung während der Vorstellungs- und Leerstandszeiten pro Messintervall

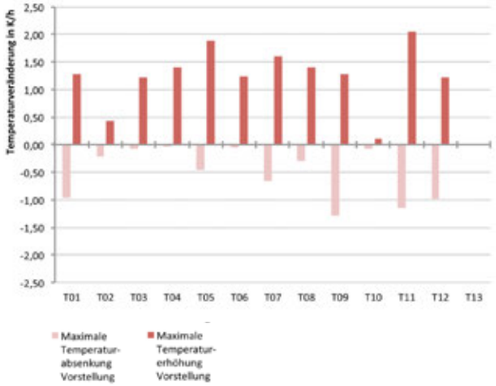

Abb. 136 Maximale Temperaturerhöhung und –absenkung während den Vorstellungszeiten innerhalb einer Stunde

größere Standardabweichung ermittelt. Eine höhere Standardabweichung während der Vorstellungszeiten hat zur Folge, dass zu diesen Zeiten auch eine durchschnittlich größere Temperaturspanne zu erwarten ist.
Als Temperaturzyklus wird die Dauer einer Vorstellung betrachtet. Hier liegt die maximale Spitze-Spitze-Schwankung zwischen 0,16 K in T10 und 2,99 K in T11. Dies zeigt, dass die Anforderung einer Spitze-Spitze-Schwankung von weniger als 1 K zumindest während einer Vorstellung in den meisten Theaterspielstätten überschritten wird. Eine Ausnahme bilden lediglich T02 und T10. Hier ist die Schwankung bei allen betrachteten Vorstellungen geringer als der Anforderungswert. Ob stationäre Bedingungen in Bezug auf die Temperaturschwankungen vorliegen, muss also im Einzelfall insbesondere für die Vorstellungszeiträume geprüft werden.

5.5.2.3 Vertikale Temperaturunterschiede

Neben der Beurteilung des gesamtkörperlichen Wärmeempfindens müssen auch lokale thermische Unbehaglichkeiten berücksichtigt werden. Hierzu zählen vertikale Temperaturunterschiede zwischen Kopf- und Fußbereich, die im Folgenden analysiert werden.
Bei Betrachtung des gesamten Messzeitraums, wie auch für die Leerstandszeiten, lässt sich keine allgemeine Aussage darüber treffen, ob die Lufttemperatur im Kopf- oder im Fußbereich höher ist. Dies variiert in Abhängigkeit der Theaterspielstätte. Während der Nutzungszeiten, die zur Beurteilung des Komfortempfindens maßgeblich sind, ist dagegen überwiegend eine höhere Lufttemperatur im Kopfbereich festzustellen. Eine Ausnahme bilden lediglich T02, T06 und T10, bei denen die Lufttemperatur im Fußbereich höher ist. Zurückzuführen ist dies möglicherweise auf das Lüftungssystem, das bei allen drei Theaterspielstätten über Quellauslässe im Boden verfügt.

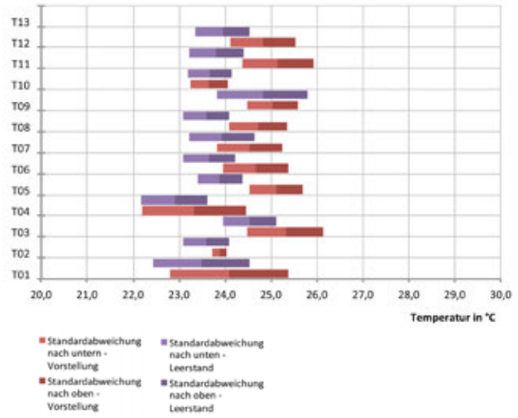

Abb. 137 Vergleich der Standardabweichungen während der Vorstellungs- und Leerstandszeiten

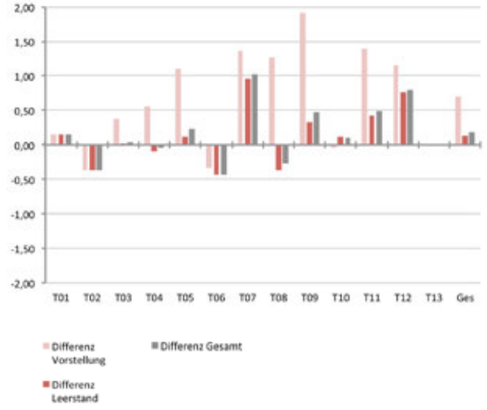

Abb. 138 Temperaturdifferenz zwischen Kopf- und Fußbereich nach Nutzungszustand

Während der Vorstellungszeiten beträgt die durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen Kopf- und Fußbereich für Spielstätten, bei denen die Lufttemperatur im Kopf- gegenüber dem Fußbereich höher ist, zwischen 0,15 K in T01 und 1,91 K in T09. Im Leerstandszustand verringern sich die Temperaturdifferenzen und bewegen sich nur noch zwischen 0,02 K in T03 und 0,96 K in T07. Dieser Unterschied zwischen Leerstands- und Vorstellungszeiten ist damit zu erklären, dass sich die Luft während der Vorstellungen durch die Wärmeemissionen der Nutzer sowie der Beleuchtung stärker erwärmt und nach oben steigt. Eine weitere Betrachtung der Temperaturdifferenzen für die Spielstätten, in denen die Lufttemperatur im Fußbereich höher als im Kopfbereich ist, muss an dieser Stelle nicht erfolgen, da eine höhere Temperatur des Fuß- gegenüber dem Kopfbereich weniger als Beeinträchtigung der Behaglichkeit empfunden wird.
Anhand der maximalen Temperaturdifferenzen lässt sich bereits abschätzen, wie stark die Beeinträchtigung der lokalen thermischen Behaglichkeit durch vertikale Temperaturunterschiede ausfällt. Diese betragen während der Vorstellungen zwischen 0,1 K in T06 und 3,42 K in T09. Da die Differenz in allen Spielstätten geringer als 4 K ist, deutet dies darauf hin, dass bezüglich der Behaglichkeit in allen Theaterspielstätten mindestens ein moderates Maß an Erwartungen erfüllt werden kann [siehe 5.5.1.2].
Die Einordnung der Messwerte in die Komfortkategorien ermöglicht eine genauere Beurteilung des Komforts. Im Falle der untersuchten Theaterspielstätten bilden sich mehrere Gruppen heraus. Die erste Gruppe umfasst Spielstätten, bei denen über 90% der Messwerte eine höhere Lufttemperatur im Fuß- als im Kopfbereich aufweisen. Dies betrifft T02 und T06. Zu den Spielstätten, in denen in Bezug auf den vertikalen Temperaturunterschied tatsächlich überwiegend ein hohes Maß an Erwartungen erfüllt wird, zählen T05,

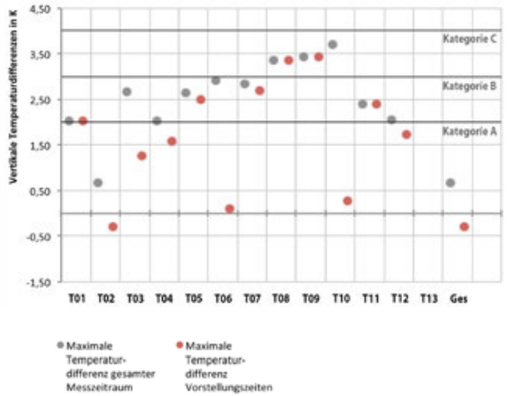

Abb. 139 Vertikale Temperaturdifferenz nach Nutzungszustand

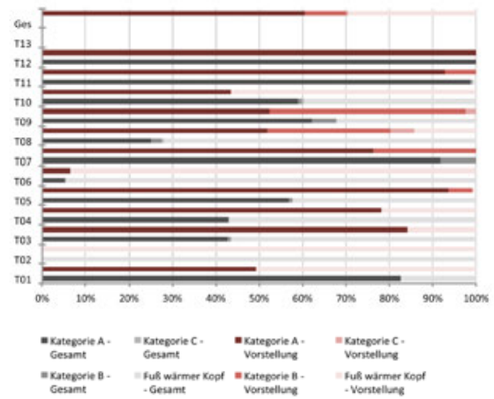

Abb. 140 Kategorisierung der vertikalen Temperaturdifferenz nach Nutzungszustand

T11 und T12. Hier wird Kategorie A zu mindestens 90% der Zeit erreicht. Während der restlichen Nutzungszeit können die Werte Kategorie B zugeordnet werden. In der nächsten Gruppe, die T01 und T10 enthält, ist der Fußbereich zur Hälfte der Zeit wärmer als der Kopfbereich. In der verbleibenden Zeit wird Kategorie A erfüllt. Bei T03 und T04 überwiegt der prozentuale Anteil der Kategorie A mit mindestens 75% gegenüber dem Fall eines wärmeren Fußbereichs im Verhältnis zum Kopfbereich. Die verbleibenden Spielstätten T07, T08 und T09 lassen sich nicht eindeutig gruppieren, verfügen aber über die Gemeinsamkeit, dass zu mindestens 50% der Zeit Kategorie A und zu 20% Kategorie B erfüllt wird. Die Spielstätten T08 und T09 besitzen außerdem einen prozentualen Anteil von über 2% in Kategorie C. Lediglich T08 hat zusätzlich noch einen zeitlichen Anteil von 14,3% währenddessen die Lufttemperatur im Fußbereich höher ist als im Kopfbereich.

Wird der Prozentsatz an Unzufriedenen (PD) aufgrund der Temperaturunterschiede zwischen dem Kopf- und Fußbereich betrachtet, der sich mit der entsprechenden Formel aus der DIN EN 7730 berechnen lässt, so zeigt sich dieser als sehr gering. Der maximale PD während der Vorstellungszeiten liegt zwischen 0,0% in T02, da in dieser Spielstätte die Lufttemperatur im Fußbereich immer höher ist als im Kopfbereich, und 5,6% in T09. Bereits auf Grund dieser Werte ist zu erkennen, dass in den meisten Theaterspielstätten mindestens Kategorie B des Umgebungsklimas erreicht werden kann. Der durchschnittliche PD weist sogar noch eine geringere Spannweite auf. Hier variieren die Werte zwischen 0,0% in T02 sowie T06 und 1,8% in T09.
Im Hinblick auf die lokale thermische Behaglichkeit ist die Temperaturdifferenz zwischen Kopf- und Fußbereich in Theaterspielstätten unter den vorliegenden Bedingungen als unbedenklich einzustufen.

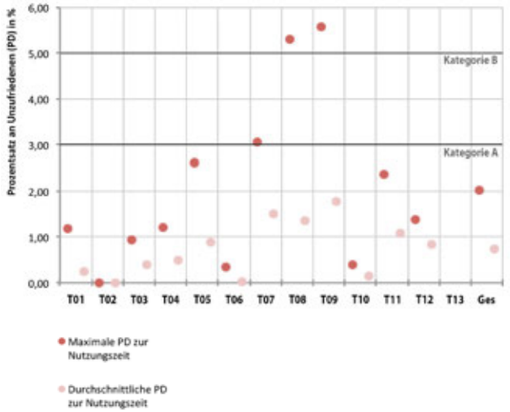

Abb. 141 Vorhergesagter prozentualer Anteil an Unzufriedenen aufgrund der vertikalen Temperaturdifferenz

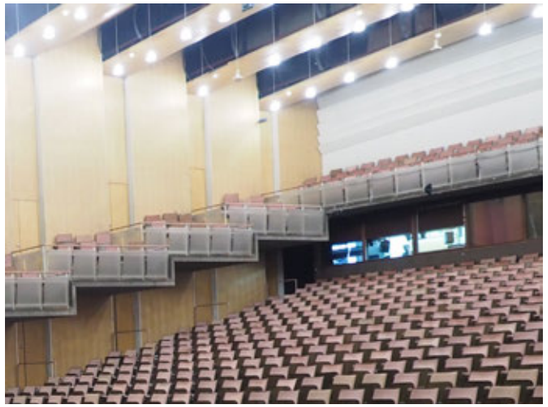

Abb. 142 Zuschauersaal des Opernhauses im Nationaltheater Mannheim

5.5.2.4 Zugluft

Als weiteres Merkmal der lokalen thermischen Unbehaglichkeit wird die Beeinträchtigung der Theaterbesucher durch Zugluft untersucht. Da sie besonders häufig im Nackenbereich auftritt, wird dieser primär betrachtet.
In fast allen untersuchten Spielstätten gab es während des Messzeitraums Phasen ruhender Luftschichten. Hierbei wurden keine Luftgeschwindigkeiten erfasst. Eine Ausnahme bildet nur T02, wo als Minimum 0,04 m/s gemessen wurde. Die maximalen Luftgeschwindigkeiten variieren dagegen und liegen zwischen 0,20 m/s in T10 und 2,55 m/s in T07 sowie T09. Die Durchschnittswerte bewegen sich zwischen 0,02 m/s in T10 und 0,16 m/s in T02.
Bei einer Gegenüberstellung der Messwerte im Kopf- und Fußbereich, die für alle Theaterspielstätten mit Ausnahme von T10 erfolgen kann, da es hier zu einem Ausfall des Sensors im Fußbereich kam, zeigt sich, dass die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit im Fußbereich unabhängig vom Nutzungszustand tendenziell höher ist. Bei allen weiteren Spielstätten mit Ausnahme von T02, T06 und T10, liegen diese im Fußbereich um 0,02 m/s in T05 bis 0,07 m/s in T08 über den Werten des Kopfbereichs. Dies lässt sich durch die einheitliche Einbringung der Zuluft unterhalb der Sitze erklären. Nur im Fall von T02 und T06 ist die Luftgeschwindigkeit im Kopfbereich um 0,05 m/s, bzw. 0,01 m/s höher. Das abweichende Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass die Parkettebene dieser Spielstätten nicht stufenweise ausgeführt ist, sondern als geneigte Ebene. Bezogen auf die Lüftung bedeutet dies, dass die Frischluft in T02 nicht über Stufenauslässe eingebracht wird und die Fußknöchel somit nicht von hinten angeströmt werden, sondern über im Boden angeordnete Lüftungsgitter sehr langsam austritt.
Zusätzlich zu der Unterscheidung zwischen Fuß- und Kopfbereich müssen die Nutzungszeiträume getrennt voneinander betrachtet werden. Hier lässt sich für den

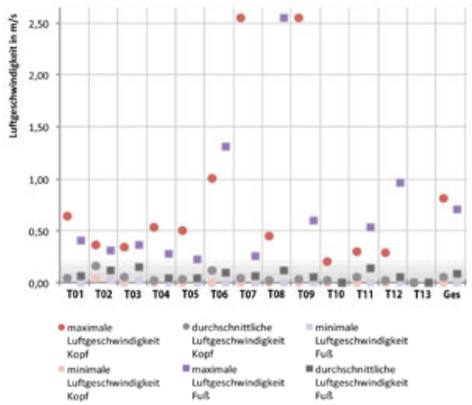

Abb. 143 Minimale, maximale und durchschnittliche Luftgeschwindigkeit im Zuschauersaal nach Fuß- und Kopfbereich

Abb. 144 Differenz von Luftgeschwindigkeit im Kopf- und Fußbereich in Abhängigkeit des Nutzungszustands

Kopfbereich feststellen, dass die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit während der Vorstellung höher ist als im ungenutzten Zustand. Während des Leerstands liegen die durchschnittlichen Luftgeschwindigkeiten zwischen 0,02 m/s in T04, T08, T10 sowie T12 und 0,16 in T02. Zu Vorstellungszeiten bewegen sich diese zwischen 0,02 m/s in T10 und 0,23 m/s in T02. Die Differenz beträgt somit zwischen 0,00 m/s in T10 und 0,08 m/s in T02 sowie T11. Die höheren Luftgeschwindigkeiten während der Vorstellungen liegen sowohl in den durch Bewegungen der Nutzer verursachten Luftbewegungen begründet als auch in den erhöhten Luftwechselraten der mechanischen Lüftungsanlagen, welche die Versorgung des Zuschauersaals mit ausreichend Frischluft gewährleisten und die Abführung der Luftverunreinigungen sowie der Wärmelasten ermöglichen.

Bei einer Einordnung der Messwerte in die Kategorien anhand der Beispiele für Gestaltungskriterien [siehe 5.5.1.2] zeigt sich, dass in vielen Theaterspielstätten ein normales Maß an Erwartungen während der Vorstellungen erfüllt werden kann. In T04 und T10 sind über 95% der Werte in Kategorie I einzuordnen, ein geringer Teil jeweils in Kategorie II und Kategorie III. Diese beiden Theaterspielstätten erfüllen bezüglich der Beeinträchtigung durch Zugluft also hohe Anforderungen. Ein normales Maß an Erwartungen wird in T05 und T08 erreicht. Hier befindet sich der größte Teil der Messwerte mit mehr als 85% immer noch in Kategorie I. Ein Anteil von mehr als 7% muss in Kategorie II einsortiert werden. Nur sehr knapp nicht erfüllt werden kann ein normales Maß an Erwartungen durch T01, T09 und T12. Hier werden zwar über dreiviertel der Messwerte in Kategorie I eingeordnet, jedoch liegt der Anteil der Messwerte, die Kategorie III und Kategorie IV beinhalten, etwas über 5%, sodass insgesamt nur Kategorie III als erreicht anzusehen ist. Ebenfalls ein moderates Maß an Erwartungen wird in T06 und T07 sowie in T03 und T11 erfüllt. Während in T06 und T07 noch weniger als 10% der Zeit die Messwerte Kategorie III zugeordnet werden, liegt dieser Anteil bei T03 und T11 doppelt so hoch. Mit einem Anteil von 63,7% in Kategorie IV liegen bei T02 die meisten Werte außerhalb der Kategorien, die mindestens ein moderates Maß an Erwartungen erfüllen können. In dieser Spielstätte sind also die geringsten Behaglichkeitsbedingungen zu erwarten. Hier ist davon auszugehen, dass durch die erhöhten Luftgeschwindigkeiten ein erhöhtes Beschwerdepotential vorliegt.

Neben der Kategorisierung der Messwerte anhand der Beispiele für Gestaltungskriterien kann auch die Beeinträchtigung durch Zugluft (DR) mit den gemessenen Werten zu Lufttemperatur, mittlerer Luftgeschwindigkeit und lokalem Turbulenzgrad berechnet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die DR durchschnittlich zwischen 0,67% in T10 und 18,11% in T02 beträgt. Die berechneten Mittelwerte deuten darauf hin, dass ein normales Maß an Erwartungen befriedigt werden kann. Durch die Einordnung der berechneten Werte in die Kategorien kann diese Vermutung bestätigt werden und es zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei der vorangegangenen Kategorisierung anhand der Beispiele für Gestaltungskriterien. Für T04, T08 und T10 erfüllt die DR zu mehr als 95% der Zeit Kategorie A, sodass diese Spielstätten ein hohes Maß an Erwartungen bezüglich der Zugluft befriedigen können. Dagegen verfehlen T01, T05, T09 und T12 nur knapp die höchste Kategorie, da mehr als 5% der Werte Kategorie B zuzuordnen sind. Auch die Spielstätten T03 und T11 sowie T06 und T07 werden Kategorie B gerecht. Während bei T06 und T07 aber noch fast 80% der Werte sogar in Kategorie A eingeordnet werden können, sinkt dieser Anteil bei T03 und T11 um etwa 20%. Auch hier ist die einzige Spielstätte, welche die Anforderungswerte von Kategorie B nicht in erfüllt, T02. Anders als bei der Kategorisierung nach den Gestaltungskriterien wird bei Berechnung der DR jedoch noch Kategorie C erreicht.

Im Vergleich der beiden Möglichkeiten zur Beurteilung des Zugluftrisikos zeigt sich, dass die Bewertung mittels Berechnung der DR auf Grundlage der gemessenen Werte eine noch geringere Beeinträchtigung der Theaterbesucher durch Zugluft erwarten lässt. Dies liegt darin begründet, dass die in den Beispielen für Gestaltungskriterien aufgeführten Werte für die maximal zulässigen Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der operativen Temperaturen der einzelnen Kategorien ermittelt wurden. In den Theaterspielstätten ist jedoch nicht immer eine Erfüllung der operativen Temperaturen und der mittleren Luftgeschwindigkeiten der gleichen Kategorie gegeben. Oftmals überschreitet die Lufttemperatur die zulässigen Grenzen der Kategorie, während die mittleren Luftgeschwindigkeiten diese noch erfüllt. Bei einer Empfindung des Umgebungsklimas als eher warm ist die Empfindlichkeit gegenüber Zugluft herabgesetzt, sodass bei steigenden Temperaturen höhere Luftgeschwindigkeiten tolerierbar sind. Anhand beider Beurteilungsmöglichkeiten wird deutlich, dass Zugluft allgemein zu keiner großen Beeinträchtigung der Behaglichkeit in den untersuchten Theaterspielstätten führt.

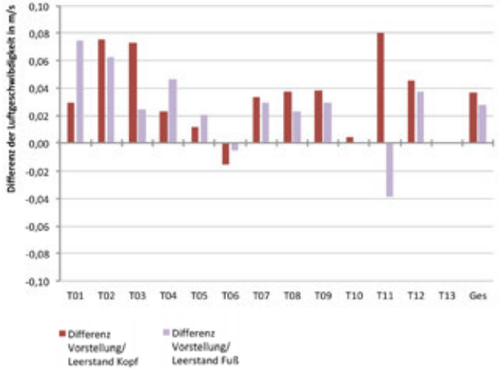

Abb. 145 Differenz der Luftgeschwindigkeit zwischen Leerstands- und Vorstellungszeiten in Abhängigkeit des Kopf- und Fußbereichs

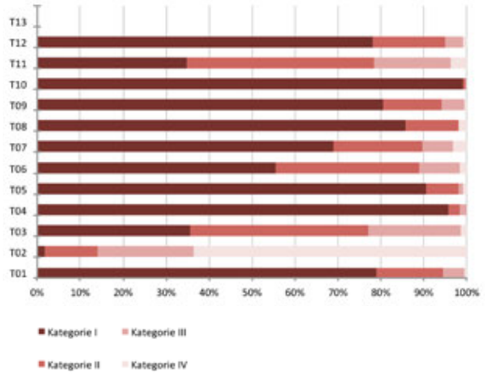

Abb. 146 Kategorisierung der Luftgeschwindigkeiten anhand der Beispiele für Gestaltungskriterien aus DIN EN ISO 7730 für den Raumtyp „Auditorium“

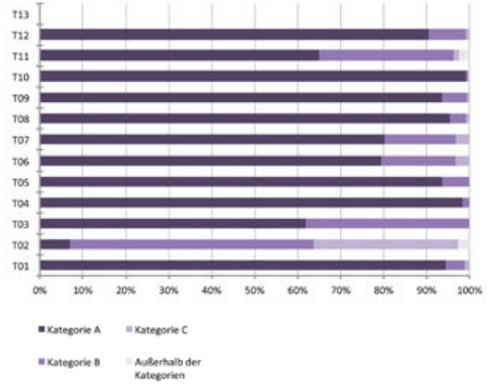

Abb. 147 Kategorisierung der Luftgeschwindigkeiten mithilfe des Draught Rating

5.5.2.5 *Relative Luftfeuchte*

Ein weiteres Kriterium zur Bewertung des thermischen Komforts ist die relative Luftfeuchte.
Während der gesamten Messungen wurden in den Theaterspielstätten Minima an relativer Luftfeuchte zwischen 14,7% in T05 und 27,4% in T10 erfasst. Somit unterschreiten die Minima die untere Grenze der Behaglichkeit, die in DIN EN 15251 mit 30% angegeben ist. Im weiteren Verlauf der Analyse war es somit notwendig zu überprüfen, für welchen Nutzungszustand und für welche Dauer die Grenzen unterschritten werden. Die Maxima, welche zwischen 38,1% in T03 und 50,3% bei T12 betragen, zeigen, dass die obere Grenze von 65% bei weitem nicht erreicht wird. Folglich sind gesundheitliche Beschwerden sowie bauliche Schäden aufgrund zu hoher relativer Luftfeuchten nicht zu erwarten. Dies wird auch durch die Durchschnittswerte bestätigt, die sich zwischen 24,3% bei T05 und 35,3% bei T12 bewegen.
Die Gegenüberstellung der durchschnittlichen relativen Luftfeuchte des Kopf- und Fußbereichs ergab, unabhängig vom Nutzungszustand, einen sehr geringen absoluten Unterschied von durchschnittlich 1,7%. Der maximale durchschnittliche Unterschied wurde bei T03 mit 3,0% während des Leerstands erfasst. Da der Mensch nur über eine eingeschränkte sensorische Fähigkeit verfügt, relative Luftfeuchten wahrzunehmen, sind Unterschiede solcher Größenordnung für die menschliche Behaglichkeit nur bedingt relevant.
Dennoch kann festgehalten werden, dass zwischen der durchschnittlichen Differenz der relativen Luftfeuchte und der Temperaturdifferenz zwischen Kopf- und Fußbereich mit einer Korrelation von -0,62 ein mittlerer linearer Zusammenhang besteht. Tendenziell ist die Differenz der relativen Luftfeuchte also höher, wenn die Lufttemperaturdifferenz geringer ist. Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur bei Betrachtung der einzelnen Spielstätten. T07, T09, T11 und T12 zeigen eine höhere Lufttemperatur im Kopfbereich bei einer überdurchschnittlich hohen Temperaturdifferenz. Gleichzeitig ist die relative Luftfeuchte im Kopfbereich niedriger und zeigt eine ebenfalls überdurchschnittliche Differenz. Anders verhält es sich, wenn zwischen Kopf- und Fußbereich eine sehr geringe Temperaturdifferenz besteht. In diesem Fall, den die Spielstätten T01, T03, T04 und T06 abbilden, ist die relative Luftfeuchte im Kopfbereich höher. Dies lässt sich über den Ausstoß feuchter Atemluft durch die Zuschauer erklären, die aufgrund der geringfügig höheren Temperaturen nicht ohne sichtbare Erhöhung der relativen Luftfeuchte gebunden wird.
Bei Betrachtung der Unterschiede der relativen Luftfeuchte in Abhängigkeit des Nutzungszustands zeigt sich, dass sich diese durchschnittlich im Bereich zwischen 0,1% in T04 und 3,8% in T11 bewegen und somit ebenfalls gering sind. Tendenziell fallen die relativen Luftfeuchten während des Vorstellungszeitraums geringer aus, sofern die Lüftungsanlage über keine Befeuchtungseinheit verfügt. Dies wird an T02, T03, T04, T05, T06 und T12 deutlich. Zurückzuführen sind die geringeren relativen Luftfeuchten auf die hohen Luftwechselraten während der Vorstellungen, durch welche neben den Luftverunreinigungen auch die Feuchteeinträge abgeführt werden. Die kalte Frischluft innerhalb der Heizperiode weist meist eine geringe Feuchtigkeitskonzentration auf. Durch die Erwärmung der Zuluft vor Einbringung in den Zuschauersaal kommt es zu einer geringen relativen Luftfeuchte. Eine Ausnahme bilden T07 und T10. In beiden Spielstätten wird die Zuluft nicht befeuchtet, dennoch haben sie durchschnittlich eine höhere relative Luftfeuchte während der Vorstellungen. Diese ist mit jeweils 0,3% jedoch sehr gering. Ebenso zeigen T01, T08, T09 und T11 eine durchschnittlich höhere relative

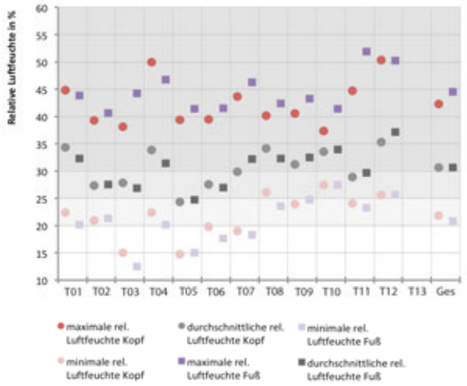

Abb. 148 Minimale, maximalee und durchschnittliche relative Luftfeuchte im Zuschauersaal nach Fuß- und Kopfbereich

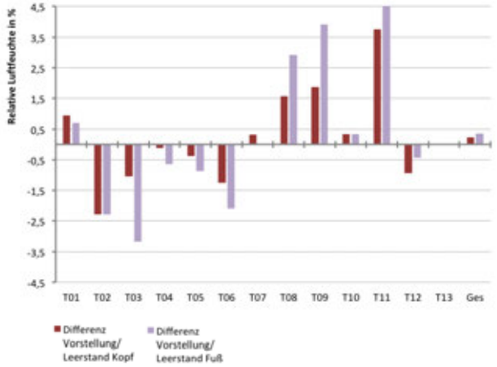

Abb. 149 Unterschied der relativen Luftfeuchte zwischen den Nutzungszuständen nach Kopf- und Fußbereich

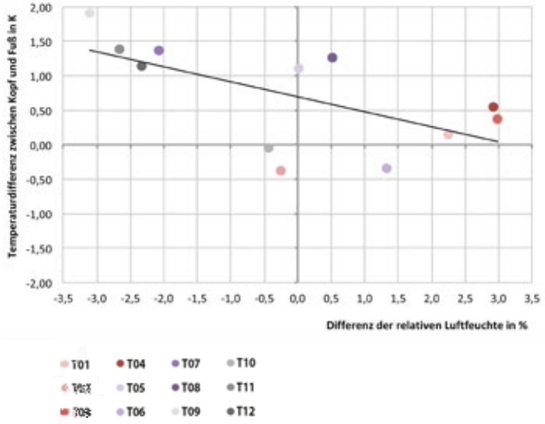

Abb. 150 Korrelation der Differenz zwischen Kopf- und Fußbereich für relative Luftfeuchte und Lufttemperatur

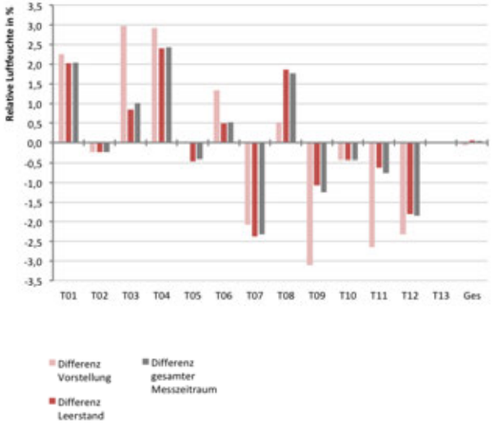

Abb. 151 Differenz der relativen Luftfeuchte zwischen Kopf- und Fußbereich nach Nutzungszustand

Luftfeuchte während den Vorstellungszeiten, da die Lüftungsanlagen dieser Spielstätten alle über eine Befeuchtungsfunktion verfügen.
Wie bereits aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den Nutzungszeiten zu erwarten ist, sind die Änderungen der relativen Luftfeuchte während eines Messintervalls sehr gering. Sie bewegen sich während der Vorstellungszeiten im Rahmen von 0,09%/l bei T02 und 2,41%/l für T11 sowie zu Zeiten des Leerstands zwischen 0,08%/l für T02 und 0,68%/l für T08. Anhand des Vergleichs zwischen Leerstands- und Vorstellungszeiten ist zu erkennen, dass die Änderungsraten während der Nutzung minimal höher ausfallen.
Die geringen Standardabweichungen, die während der Vorstellungszeiten zwischen 1,2% für T09 und 6,1% für T04 betragen, spiegeln den konstanten Verlauf der relativen Luftfeuchte wieder. Eine allgemeine Aussage darüber, ob die Schwankungen im Verlauf der relativen Luftfeuchte während der Vorstellungs- oder der Leerstandszeiten größer sind, kann nicht getroffen werden, da dies von Spielstätte zu Spielstätte variiert.
Zur Bewertung der Komfortbeeinträchtigung durch die relative Luftfeuchte werden die Messwerte in die in [5.3.1.2] definierten Kategorien eingeordnet. Durch die Betrachtung der Maximalwerte lassen sich relative Luftfeuchten an der oberen Grenze bereits ausschließen. Folglich ist nur zu überprüfen, ob und über welchen Zeitraum während der Vorstellungen geringe relative Luftfeuchten vorliegen. Hier lassen sich die Theaterspielstätten in unterschiedliche Gruppen einordnen. In T08 und T09 liegt die relative Luftfeuchte immer über 30% und ist somit Kategorie I zuzuordnen. T01 und T10 verfügen zwar über Messwerte zur relativen Luftfeuchte, die in Kategorie II einzuordnen sind, jedoch betragen diese weniger als 5%, sodass auch hier hohe Anforderungen erfüllt werden. Bei den Spielstätten T04,

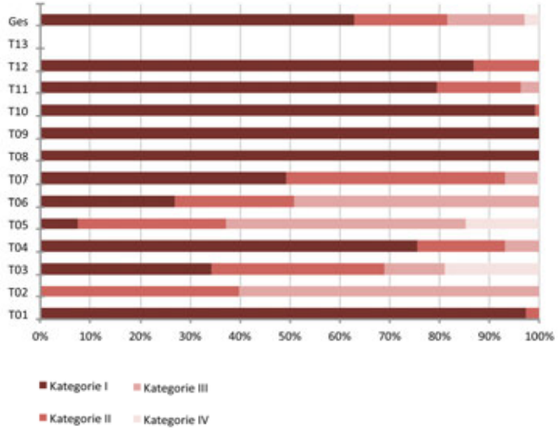

Abb. 152 Einordnung der Messwerte zur relativen Luftfeuchte in die Komfortkategorien

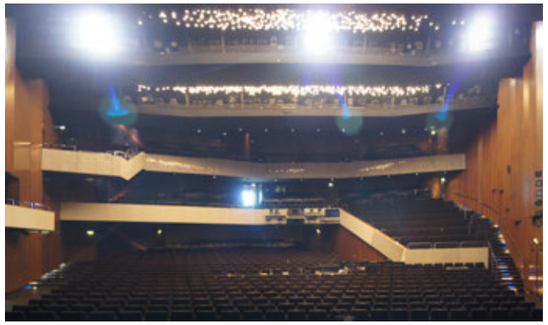

Abb. 153 Zuschauersaal des Opernhauses Bonn

T11 und T12 können über dreiviertel der Messwerte in Kategorie I eingeordnet werden. Obwohl T11 auch Messwerte der Kategorie III beinhaltet, genügen alle drei Spielstätten mittleren Anforderungen. In T07 können die Messwerte dagegen nur noch zur Hälfte der Zeit in Kategorie I einsortiert werden. Die übrige Zeit entfallen die Messwerte großteilig auf Kategorie II, jedoch ist ein weiterer Anteil der Messwerte, welcher mehr als 5% beträgt, auch in Kategorie III einzuordnen. Sowohl bei T02 als auch bei T06 traten etwa während der Hälfte der Zeit nur noch relative Luftfeuchten zwischen 20% und 25% auf. Dennoch sanken diese nie unter 20%, sodass zumindest noch mäßige Anforderungen an die relative Luftfeuchte erfüllt werden. Kritisch zu bewerten sind T03 und T05, da dort während 19,1% bzw. 14,8% der Zeit relative Luftfeuchten unter 20% erfasst wurden. Besonders bei T05 ist auch der Anteil an Messwerte in Kategorie III mit fast 50% sehr hoch. Hier sollten Maßnahmen angedacht werden, um die relative Luftfeuchte zu erhöhen. In Zusammenhang mit der sehr hohen Raumluftqualität [siehe 5.5.2.1] für T05 könnte erwogen werden, den Luftwechsel, welcher nutzungsabhängig gesteuert wird, in der Heizperiode herabzusetzen. Für T03 stellt diese Möglichkeit jedoch keine Option dar, da die Raumluftqualität bereits nur mittlere Anforderungen erfüllt.
Es lässt sich festhalten, dass allgemein in den Theaterspielstätten keine Probleme aufgrund zu hoher relativer Luftfeuchten auftreten. Stattdessen bewegen sich diese, zumindest in der Heizperiode, im unteren Grenzbereich, sodass zur Erhöhung der Behaglichkeit ggf. Maßnahmen zur Befeuchtung ergriffen werden sollten. Anhand der Kategorisierung wird sichtbar, dass alle Spielstätten, die über eine Lüftungsanlage mit Befeuchtung verfügen, mindestens mittleren Anforderungen an die relative Luftfeuchte gerecht werden können, da sie keine oder nur in geringem Maße relativen Luftfeuchten unter 25% zeigen. Bei Theaterspielstätten ohne die Möglichkeit einer Zuluftbefeuchtung sinken die relativen Raumluftfeuchten oftmals unter 25% und können so für Zuschauerbeschwerden verantwortlich sein.

Eine Möglichkeit, die gesamtthermische Empfindung zu kategorisieren, bietet sich über das vorhergesagte mittlere Votum (PMV) und den daraus bestimmten prozentualen Anteil an Personen, die mit dem vorhandenen Umgebungsklima unzufrieden sind (PPD) [siehe 5.3.1.2]. Hierbei wird nicht nur die Umgebungstemperatur berücksichtigt, sondern auch die relative Luftfeuchte und die Luftgeschwindigkeit, welche ebenfalls die Behaglichkeit beeinträchtigen.
Für die vorliegenden Messwerte aus den dreizehn betrachteten Theaterspielstätten wurde das PMV rechnerisch unter Verwendung des BNB-Tools „Thermischer Komfort“ des Fraunhofer Instituts für jedes Messintervall ermittelt. Für den Tätigkeitsgrad wurde eine leichte sitzende Tätigkeit mit 1,2 met Energieumsatz angenommen. Da der Messzeitraum überwiegend in die Heizperiode fällt, wurde für die Bekleidung ein Faktor von 1,0 clo gewählt. Der durchschnittliche PMV während der Vorstellungszeiten bewegt sich zwischen 0,17 in T02 und 0,66 in T09. Tendenziell besteht also die Erwartung, dass die Nutzer die Zuschauersäle nahezu thermisch neutral bis eher etwas warm empfinden. Bestätigt wird dies auch bei Analyse der berechneten Minima. Diese liegen zwischen -0,24 in T01 und 0,36 in T12. Außer in T01 und T04 werden anhand der vorliegenden Messdaten keine Werte berechnet, die eine Empfindung der thermischen Umgebung als eher kühl erwarten lassen. Maximalwerte in den betrachteten Theaterspielstätten treten zwischen 0,36 in T02 und 1,16 in T01 auf. Die Spannweiten der erwarteten Bewertung des gesamtheitlichen Wärmeempfindens sind in Abhängigkeit der Spielstätten verschieden. Das konstanteste vorausgesagte mittlere Votum liegt mit einem Unterschied zwischen Minimum und Maximum von 0,32 in T02 vor. Die größten Schwankungen weist dagegen T01 mit einer Spannweite von 1,40 auf.
Auf Basis der berechneten PMVs kann der prozentuale Anteil derer ermittelt werden, die wahrscheinlich mit dem Umgebungsklima unzufrieden sind. Die

Minimalwerte für den PPD bewegen sich zwischen 5,0% in T01, T02 sowie T04 und 7,7% in T12. Da auch bei einem vorausgesagten mittleren Votum thermischer Neutralität 5% der Personen mit dem vorherrschenden Umgebungsklima unzufrieden sind, wird anhand der Minimalwerte sichtbar, dass es in vielen Theaterspielstätten Zeiträume gibt, in denen eine thermische Neutralität gegeben ist. Die Maxima liegen zwischen 7,7% in T02 und 33,3% in T01 und lassen somit in einigen Spielstätten zeitweise eine hohe Unzufriedenheit mit der thermischen Umgebung vermuten. Bei Betrachtung der Durchschnittswerte zeigt sich, dass in T02 mit 5,7% die geringste Unzufriedenheit auftritt, während diese in T09 mit 14,6% am größten ist. Anhand der durchschnittlichen Unzufriedenheit lassen sich Gruppen definieren, die ähnliche PPD-Werte aufweisen. Neben T02, wo der durchschnittliche PPD sogar Kategorie A erfüllt, ist dieser in T04 und T10 mit 8,4% am geringsten und kann im Mittel in Kategorie B einsortiert werden. In T01 und T06 beträgt dieser knapp über 10%. Bei allen restlichen Spielstätten bewegt sich der vorausgesagte Anteil an Unzufriedenen zwischen 13,0% und 15,0%, sodass durchschnittlich Kategorie C erfüllt wird.

Anhand der berechneten PMVs und den zugeordneten PPD-Werten ist eine genaue Kategorisierung der thermischen Umgebung möglich. Diese zeigt, dass T02 und T10 die einzigen Spielstätten sind, die mindestens Kategorie C erfüllen. Alle restlichen Spielstätten zeigen einen zeitlichen Anteil von über 5% bei den Werten, die keiner Kategorie zugeordnet werden können. Im Fall von T02 ist Kategorie B erreicht, da zwar Zweidrittel der Messwerte auf Kategorie A entfallen, aber die restlichen Werte Kategorie B zugeordnet werden müssen. Ebenso zeigt T10 den größten Anteil der Messwerte in Kategorie B, erfüllt aber dennoch nur Kategorie C. Während T02 und T10 noch mindestens Kategorie C erreichen, liegen die berechneten PMVs der anderen Theaterspielstätten großteilig außerhalb der Grenzen der Kategorien. Mit einem zeitlichen Anteil von 6,1% bei dem keine Kategorie erfüllt werden kann, scheitert T04 nur knapp am Erreichen von Kategorie C. Wesentlich deutlicher fällt die Diskrepanz bei den verbleibenden Spielstätten aus. Bei T01 und T06 treten zu über 10% der Zeit PMVs auf, die keiner Kategorie zuzuordnen sind. Der verbleibende zeitliche Anteil verteilt sich fast gleichwertig auf Kategorie B und C. Die größte Gruppe, die eine ähnliche Verteilung zeigt, besteht aus T05, T07, T08, T11 und T12. Bei allen Spielstätten dieser Gruppe können über 30% der berechneten PMVs nicht den Kategorien zugeordnet werden. Mehr als 40% der Werte entfallen auf Kategorie C und in Kategorie A treten so gut wie keine Werte mehr auf.

Die letzte Gruppe, welche T03 und T09 beinhaltet, zeigt das größte Potential für eine Unzufriedenheit mit der gesamtthermischen Empfindung. Hier sind mehr als 40% der Werte nicht kategorisierbar. Ähnlich hoch ist der Anteil der PMVs die Kategorie C zuzuordnen sind. Alle verbleibenden Werte können Kategorie B zugeordnet werden.

Anhand der Kategorisierung lässt sich nicht bestimmen, ob die thermische Empfindung der Umgebung überwiegend als eher kalt, neutral oder eher warm vorausgesagt wird. Je nach Kategorie sind in beide Richtungen bestimmte Schwankungen um den Neutralitätspunkt zulässig. Um hierzu Aussagen treffen zu können, werden die berechneten Werte nach einem erwarteten mittleren Votum des gesamtheitlichen Wärmeempfindens als „neutral“, „eher warm“ und „eher kühl“ sortiert. In keiner Spielstätte wurden Werte von 0, entsprechend

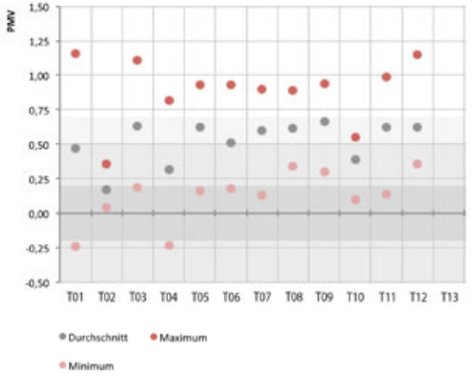

Abb. 154 Minimale, maximale und durchschnittliche PMVs in den Theaterspielstätten

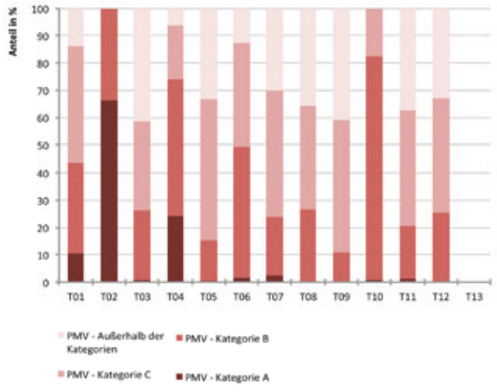

Abb. 155 Kategorisierung nach PMV in den Theaterspielstätten

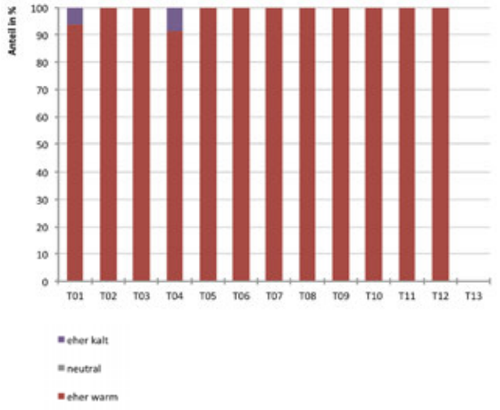

Abb. 156 Tendenz des gesamtheitlichen thermischen Empfindens in den Theaterspielstätten

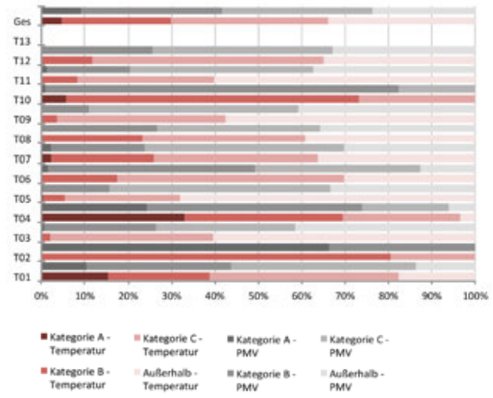

Abb. 157 Vergleich der Kategorisierung nach Temperaturbereichen und anhand der PMV- und PPD-Werte

einer thermischen Neutralitätsempfindung erzielt. Auch Werte unter Null, die eine Tendenz für eine Empfindung der thermischen Umgebung als eher kühl zeigen, wurden mit Ausnahme von T01 und T04 ebenfalls in keiner Spielstätte ermittelt. In diesen beiden Spielstätten wurden hierfür geringe Zeitanteile mit 6,1%, bzw. 8,7% beobachtet. Die restliche Zeit über wird das gesamtheitliche Wärmeempfinden also tendenziell eher als zu hoch empfunden.
Neben der Kategorisierung nach den PMV- und PPD-Werten, darf vereinfachend eine Einordnung der thermischen Umgebung anhand von äquivalenten operativen Temperaturbereichen erfolgen, wie es in [5.5.2.2] vorgenommen worden ist. Ein Vergleich der Anteile in den Kategorien zwischen der Einordnung anhand der Temperaturbereiche und der PMV- sowie PPD-Werte zeigt, dass die Bewertung der thermischen Umgebung bei Ansetzung der letzteren Kriterien positiver ausfällt. Mit Ausnahme von T07 ist der zeitliche Anteil, in dem mindestens Kategorie B und damit ein normales Maß an Erwartungen erreicht wird, gegenüber der Bewertung nach Temperaturbereichen deutlich größer. Bei Ermittlung dieser zur Definition der Kategorien wird von einer relativen Luftfeuchte von 40% ausgegangen. Stellt man diesen Wert der gemessenen durchschnittlichen relativen Luftfeuchte [siehe 5.5.2.6] gegenüber, so zeigen sich für die Theaterspielstätten Werte von unter 40%. Die Luftfeuchte beeinflusst die menschliche Wärmeabgabe durch Verdunstung maßgeblich. Je höher die Luftfeuchte, desto geringer ist die Möglichkeit der Wärmeabgabe. Dies führt dazu, dass eine um 10% höhere relative Luftfeuchte so warm empfunden wird, wie eine um 0,3°C höhere operative Temperatur. So ist es zu erklären, dass die PMV- und PPD-Werte eine bessere Klassifizierung der Umgebungstemperatur bewirken.[32]

Literatur:
[32] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2006)

5.5.3 Zusammenfassung

Nachdem die Anforderungen an den Raumkomfort den Kriterien aus den DIN-Normen gegenübergestellt worden sind, lässt sich zusammenfassend festhalten, dass für die betrachteten Parameter unterschiedliche Kategorien erreicht werden.
Die Raumluftqualität während der Nutzungszeiten erfüllt in allen Theaterspielstätten hohe Anforderungen. Die CO_2-Konzentrationen sind hygienisch unbedenklich. In manchen Spielstätten wäre es daher denkbar, die Lüftungsanlagen in Abhängigkeit der Belegungsdichte oder der CO_2-Konzentration mit einem höheren Umluftanteil zu betreiben. Dies könnte zum einen zu Einsparungen bei der Heizwärme aufgrund eines geringeren zu beheizenden Luftvolumens führen und zum anderen könnten Stromeinsparungen durch geringere Drehzahlen der Ventilatoren generiert werden.
Zur Beurteilung der gesamtthermischen Empfindung wurde primär die Lufttemperatur betrachtet. Im Verhältnis zu den Anforderungen aus der DIN EN 7730 wurden hohe durchschnittliche Lufttemperaturen festgestellt. Diese sind, aufgrund des Wärmeeintrags durch die Besucher, zu den Vorstellungszeiten höher als im ungenutzten Zustand. Da die gemessenen Lufttemperaturen oftmals außerhalb der Grenzen der Kategorien liegen, ist zu erwarten, dass die Besucher diese als zu hoch empfinden. Es wäre daher wünschenswert, diese im Hinblick auf den gesamtthermischen Komfort während der Vorstellungen zu reduzieren.
Auch Temperaturdrifts oder starke Temperaturschwankungen können zur Verminderung der Behaglichkeit beitragen. Die Temperaturdrifts in den Theaterspielstätten sind jedoch gering, sodass sie nicht berücksichtigt werden müssen. Der kontinuierliche Temperaturanstieg während der Vorstellungszeiten führt jedoch zu starken Temperaturunterschieden zwischen dem Vorstellungsbeginn und dem Vorstellungsende. Hierdurch kann in einzelnen Theaterspielstätten die Behaglichkeit beeinträchtigt werden. Es sollte darauf geachtet werden, einem zu starken Temperaturanstieg durch Abführung der Wärmelasten entgegenzuwirken.
Die Überprüfung der lokalen thermischen Unbehaglichkeit durch Zugluft und Temperaturunterschiede ergab, dass sie nur in wenigen Einzelfällen eine Beeinträchtigung darstellen. Tendenziell sind die Luftgeschwindigkeiten aufgrund der Einbringung der Zuluft im Fußbereich höher als im Kopfbereich. Wegen der höheren Luftwechselrate zu Vorstellungszeiten sind die Luftgeschwindigkeiten gegenüber dem ungenutzten Zustand erhöht, erfüllen jedoch in den meisten Fällen ein normales Maß an Erwartungen.
Da ausschließlich zum Kopfbereich hin ansteigende Lufttemperaturen als Beeinträchtigung der thermischen Behaglichkeit bewertet werden und die Lufttemperatur im Fußbereich oftmals höher ist, ist die Beeinträchtigung durch vertikale Temperaturunterschiede ebenfalls geringfügig.
Werte der relativen Luftfeuchte, die außerhalb des menschlichen Behaglichkeitsbereichs liegen, können zu gesundheitlichen Beschwerden führen. In den Theaterspielstätten werden die oberen Grenzen der relativen Luftfeuchte nicht erreicht. Stattdessen bewegen sich die Werte am unteren Bereich der Behaglichkeitsgrenzen und liegen oftmals sogar darunter. Besonders während der Vorstellungen sinkt die relative Luftfeuchte trotz Feuchteeinträgen durch die Besucher nochmals ab. Dies liegt an den großen Mengen an eingebrachter Frischluft, die im Heizfall aufgrund niedriger Außentemperaturen stark erwärmt werden müssen. Die Erwärmung hat zur Folge, dass die relative Luftfeuchte ohne zusätzliche Befeuchtung sinkt. Die Luft in den Theaterspielstätten ist somit tendenziell zu trocken und sollte nach Möglichkeit befeuchtet werden.
Insgesamt kann in den Theaterspielstätten für viele Raumkomfortparameter ein annehmbares, moderates Maß an Erwartungen erfüllt werden, welches bei bestehenden Gebäuden angemessen ist [siehe 5.5.1.2]. Ausgerechnet die Lufttemperaturen, die den größten Einfluss auf die thermische Behaglichkeit ausüben, sind jedoch nach objektiven Bewertungsmaßstäben zu hoch. Hier besteht folglich eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für eine Unzufriedenheit der Nutzer.

	Raumluftqualität		Thermischer Komfort		lokale thermische Unbehaglichkeit		
	CO_2-Konzentration	relative Luftfeuchte	PMV/PPD	Luft-temperatur	Temperatur-differenz	Luft-geschwindigkeit	Draught Rating
T01	I	II	IV	IV	I	III	II
T02	I	III	II	III	I	IV	III
T03	II	IV	IV	IV	I	III	II
T04	I	III	IV	III	I	I	I
T05	I	IV	IV	IV	II	II	II
T06	II	IV	IV	IV	I	III	II
T07	I	III	IV	IV	II	III	II
T08	I	I	IV	IV	III	II	I
T09	I	I	IV	IV	II	III	II
T10	II	I	III	III	I	I	I
T11	II	II	IV	IV	II	III	II
T12	III	II	IV	IV	I	III	II
T13	keine Messwerte vorhanden						

Abb. 158 Gesamtkategorisierung anhand einzelner Raumkomfortparameter

5.6 Auswertung der Nutzerbefragung

5.6.1 Bewertungskriterien

Die Nutzerbefragung zum Raumkomfort im Zuschauersaal gliedert sich in mehrere konsekutive Teile. Der zentrale Bestandteil des Fragebogens ist die Auseinandersetzung mit dem persönlichen thermischen Befinden sowie der thermischen Umgebung. Die Abfrage des persönlichen thermischen Befindens erfolgte in drei Stufen über die Wahrnehmungsbewertung verschiedener Klimaparameter, die affektive Bewertung und Angaben zur thermischen Präferenz. Anschließend wurde die thermische Umgebung mittels Angaben zur Annehmbarkeit und zur persönlichen Toleranz beurteilt.

Um die so erzielten Ergebnisse auswerten zu können, müssen zunächst die zwei angewendeten Skalentypen näher beschrieben werden. Eine Festlegung der Reihenfolge der Merkmalsausprägungen ist bei einer Nominalskalierung nicht möglich. Es kann lediglich festgestellt werden, ob diese übereinstimmen. Bei einer dichotomen Nominalskala, die zur Abfrage des Geschlechts und der Annehmbarkeit der thermischen Umgebung angewendet wurde, können zwei Items nur unabhängig voneinander gewählt werden.

Für alle weiteren Fragen zum Raumklima wurden die Daten ordinalskaliert erhoben. Hierbei lassen sich die Merkmalsausprägungen zwar gemäß ihrer Intensität ordnen, jedoch sind die Abstände zwischen den Merkmalsausprägungen nicht festgelegt. Diese Art der Skalierung fand in zwei Abwandlungen Anwendung. Zum wurde eine symmetrische zweipolige Skala mit zentralen Indifferenzpunkt und Stufen zunehmender Intensität ausgebildet und zum anderen eine einpolige Skala mit Ursprungspunkt, dem keine Wirkung zugeordnet werden kann.

Nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Skalierung können geeignete statistische Verfahren

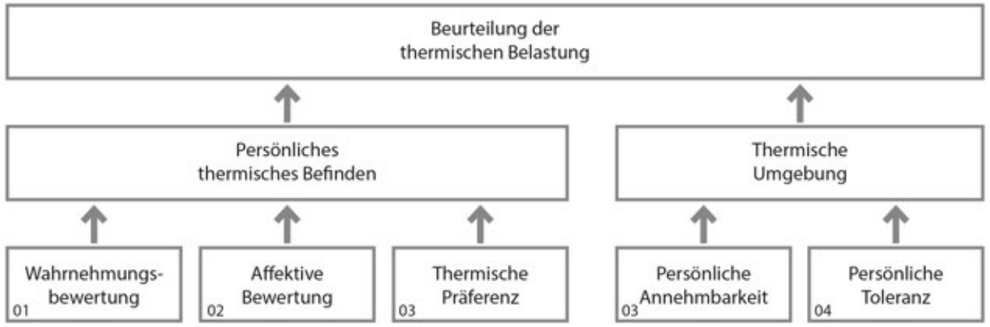

Abb. 159 Schema zum Aufbau des Fragebogens nach DIN EN ISO 10551 [42]

Parameter	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Zufriedenheit mit der Vorstellung	-	sehr schlecht	schlecht	*neutral*	gut	sehr gut	-
Persönliche Stimmung	-	sehr schlecht gestimmt	schlecht gestimmt		gut gestimmt	sehr gut gestimmt	-
Zuschauersaal							
Gestaltung / Akustik / Sichtbeziehung / Beleuchtung / Sitzkomfort im Zuschauersaal	-	sehr schlecht	schlecht	*neutral*	gut	sehr gut	-
Affektive Bewertung	⟷ Unbehaglichkeitsindex						
Behaglichkeit	äußerst unbehaglich	unbehaglich	etwas unbehaglich	*neutral*	etwas behaglich	behaglich	äußerst behaglich
Wahrnehmung							
Temperatur	kalt	kühl	etwas kühl	*neutral*	etwas warm	warm	heiß
Lufdtfeuchtigkeit	sehr feucht	feucht	etwas feucht		etwas trocken	trocken	sehr trocken
Luftbewegung	sehr zugig	zugig	etwas zugig		etwa still	still	sehr still
Luftqualität	sehr stickig	stickig	etwas stickig		etwas frisch	frisch	sehr frisch
Präferenz	⟷ Präferenzindex				⟷ Präferenzindex		
Temperatur	viel kälter	kälter	etwas kälter	*neutral*	etwas wärmer	wärmer	viel wärmer
Luftfeuchtigkeit	viel feuchter	feuchter	etwas feuchter		etwas trockener	trockener	viel trockener
Luftbewegung	viel geringer	geringer	etwas geringer		etwas stärker	stärker	viel stärker
Toleranz		⟷ Schmerzhaftigkeitsindex					
Erträglichkeit	-	völlig unerträglich	unerträglich	*neutral*	erträglich	völlig erträglich	-

Abb. 160 Beschriftung der symmetrischen zweipoligen Skala mit Indifferenzpunkt

zur Auswertung der Befragungsergebnisse ausgewählt werden. Auf Grund der begrenzten Auswahlmöglichkeit bei nominalskalierten Daten ist nur der Modus zur statistischen Auswertung geeignet. Beim Modus handelt es sich um einen statistischen Lageparameter, welcher die am häufigsten in einer Stichprobe vorkommende Merkmalsausprägung bezeichnet. Für ordinalskalierten Daten kann neben dem Modus auch der Median zur statistischen Auswertung angewendet werden. Genauso wie der Modus ist auch der Median ein statistischer Lageparameter. Er ist als der Wert definiert, der die Stichprobe in zwei gleich große Hälften teilt. Sofern eine ungerade Anzahl an Werten vorliegt, entspricht der Median der mittleren Zahl. Beinhaltet die Stichprobe jedoch eine gerade Anzahl an Werten, so wird dieser als arithmetisches Mittel der beiden mittleren Zahlen gebildet. Zusätzlich zum Median wird als Maß der Streuung der mittlere Quartilsabstand berechnet. Er definiert die mittlere Streuung um den Median und ist als Intervall zweier aufeinanderfolgender Stufen angegeben. Im Vergleich unterschiedlicher Daten wird so eine Beurteilung darüber ermöglicht, ob unter den Befragten eher Einigkeit oder Uneinigkeit in Bezug auf den abgefragten Parameter herrscht.
Eine Ausnahme bei der statistischen Auswertung bildet die thermische Wahrnehmung. Für diese haben Studien ergeben, dass die Skalierungsstufen psychologisch einem gleichen Abstand entsprechen. Infolgedessen dürfen die Daten gleichwertig zu einer Intervallskala ausgewertet werden. Dies ermöglicht, neben den oben genannten statistischen Auswertungsparametern, auch die Berechnung des arithmetischen Mittels sowie der Standardabweichung. Beim arithmetischen Mittel handelt es sich um einen Durchschnittswert, der aus der Summe aller Beobachtungen, gemessen an der Gesamtheit der Befragten, gebildet wird. Die Standardabweichung ist genauso wie der mittlere Quartilsabstand ein Maß für die Streuung und wird auf Basis des arithmetischen Mittels berechnet. Des Weiteren kann mithilfe des Einstichproben-t-Tests die Überprüfung erfolgen, ob sich der ermittelte Mittelwert tatsächlich von einem vorgegebenen Sollwert unterscheidet. Wird eine Abweichung des Testergebnisses zu dem vorher definierten Sollwert festgestellt und somit die Nullhypothese abgelehnt, so ist das Ergebnis signifikant unterschiedlich. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Unterschied zwischen Mittelwert und Sollwert nicht zufällig entstanden ist.
Neben der isolierten Beurteilung einzelner Auswertungsparameter können diese auch im Zusammenhang betrachtet werden. Dazu wird zwischen zwei Parametern ein Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman gebildet. Über die Korrelation kann die Stärke der statistischen Beziehung der beiden Parameter bewertet werden. Dem Korrelationskoeffizienten, der sich zwischen -1 und +1 bewegt, kann eine Korrelationsstärke zugeordnet werden. Eine positive Korrelation tritt auf, wenn bei einer Vergrößerung des ersten Parameters tendenziell gleichzeitig eine Vergrößerung des Zweiten eintritt. Im Gegensatz dazu ist bei einer negativen Korrelation der Zusammenhang der untersuchten Parameter gegenläufig. Ist eine Vergrößerung des ersten Parameters festzustellen, findet gleichzeitig eine Verringerung des Zweiten statt. Um eine zufällige Korrelation, die keine sinnvolle Interpretation der Ergebnisse zulässt, auszuschließen, müssen die Ergebnisse im realen Kontext auf ihre Kausalität hin überprüft werden.

Betrag des Korrelationskoeffzienten [k]	Mögliche Interpretation
0,0 = k	keine Korrelation
0,0 < k < 0,2	sehr schwache Korrelation
0,2 ≤ k < 0,4	schwache Korrelation
0,4 ≤ k < 0,6	mittlere Korrelation
0,6 ≤ k < 0,8	starke Korrelation
0,8 ≤ k < 1,0	sehr starke Korrelation
1,0 = k	perfekte Korrelation

Abb. 161 Interpretation der Korrelationskoeffizienten nach Gossauer [50]

5.6.2 Darstellung und Bewertung

5.6.2.1 Zufriedenheit mit dem Theatersaal

Zusätzlich zu den allgemein anwendbaren statistischen Auswertungen werden für die Beurteilung des Umgebungsklimas Indizes berechnet, die zur weiteren Interpretation der Zufriedenheit der Befragten mit dem Umgebungsklima aufschlussreich sind. Zu diesen Indizes gehören der Präferenz-, der Unbehaglichkeits- und der Schmerzhaftigkeitsindex. Der Präferenzindex bezeichnet den prozentualen Anteil der Befragten, die keine Neutralitätsbewertung in Bezug auf den Wunsch nach der Änderung bestimmter Komfortparameter abgaben. Der Unbehaglichkeitsindex fasst prozentual alle Personen zusammen, die unter der affektiven Bewertung des persönlichen thermischen Befindens angaben, dieses als mindestens „etwas unbehaglich“ zu empfinden. Der prozentuale Anteil an Personen, deren persönliche Toleranz gegenüber der thermischen Umgebung nicht gegeben ist und die dieses deshalb mindestens als „unerträglich“ einstufen, fällt unter den Schmerzhaftigkeitsindex.[42],[50],[103]

Literatur:
[42] Europäisches Komitee für Normung (2001)
[50] Grossauer, E. (2008)
[103] Toutenburg, H. et al. (2006)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Nutzerbefragung in den verschiedenen Theaterspielstätten miteinander verglichen. Diese wurde nur in 12 von 13 an der Querschnittserhebung teilnehmenden Theaterspielstätten durchgeführt, da T01 eine Beeinträchtigung der Besucher befürchtete und daher keine Befragung durchführte.
Der gesamte Rücklauf umfasst 524 Fragebögen, sodass dieser im Schnitt eine Anzahl von 44 Stück pro Spielstätte betrug. In Abhängigkeit der Spielstätten variierte der Rücklauf jedoch stark, sodass tatsächlich zwischen 4 in T04 und 130 Fragebögen in T11 ausgefüllt wurden. Die geringen Rückläufe, vor allem in T04, T07 und T10, müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.
Bei einer Betrachtung der Befragungsteilnehmer ist auffällig, dass diese mit einem Anteil von 64,1% überwiegend weiblich sind. Dies ist auch bei den meisten Einzelauswertungen zu beobachten. Eine Ausnahme bilden T03, T04 und T10, bei denen jeweils mehr Männer als Frauen an der Befragung teilnahmen. In T07 ist der Anteil von männlichen und weiblichen Teilnehmern ausgeglichen. Bei allen Theaterspielstätten, die dieser Ausnahme unterliegen, fällt ein geringer Rücklauf auf, welcher unter 10, bzw. für T03 unter 15, Fragebögen liegt. Eine Erklärung für dieses Phänomen kann an dieser Stelle nicht gegeben werden.
Neben dem Geschlecht wurde auch das Alter der Teilnehmer abgefragt. Der Altersdurchschnitt der Befragten lag zwischen 41,7 Jahren in T13 und 64,3 Jahren in T04. Zwar liegt die Altersspanne der Teilnehmer zwischen 9 und 87 Jahren, aber der zwischen 39,5 Jahren in T13 und 63,5 in T04 liegende Median bestätigt, dass der größere Anteil der Befragten sich im mittleren Erwachsenenalter befindet. Bei einer Betrachtung der Altersstruktur über alle Theaterspielstätten hinweg zeigt sich, dass die am häufigsten vertretene Altersgruppe die der 50 bis 59 Jährigen ist.

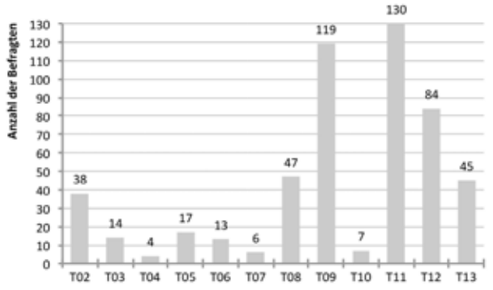

Abb. 162 Rücklauf der Nutzerfragebögen nach Theaterspielstätten

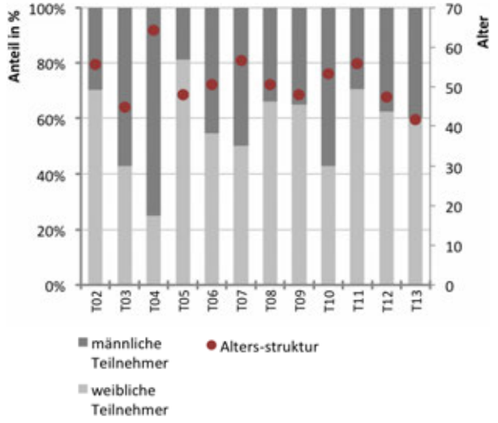

Abb. 163 Geschlecht und Altersstruktur der Befragten nach Theaterspielstätten

In Folge gesunkener Besucherzahlen wurden Studien von Jobst und Boerner, Kliement und dem Cognos Institut zur Ergründung der Ursachen und zur Ergreifung gezielter Marketingstrategien an Theaterspielstätten durchgeführt. Hierbei wurde auch die Zusammensetzung des Theaterpublikums in Bezug auf Geschlecht und Alter untersucht. Diese Studien zeigen, wie die vorliegende Nutzerbefragung auch, dass zwei Drittel der Besucher Frauen und nur ein Drittel Männer sind. Des Weiteren wurde auch dort ein Altersdurchschnitt zwischen 50 und 60 Jahren ermittelt. Diese Übereinstimmungen lassen darauf schließen, dass die Zusammensetzung der Befragungsteilnehmer das Theaterpublikum repräsentativ abbildet.

Anhand der Befragungsergebnisse zeigt sich ein hoher Zufriedenheitsgrad der Teilnehmer mit der besuchten Vorstellung. Die mittlere Bewertung liegt zwischen 1,0, dies zeigt, dass die Vorstellung „gut gefallen“ hat und 2,0, sodass diese sogar als „sehr gut“ bewertet wird. Ein Zusammenhang scheint zwischen der Zufriedenheit mit der Vorstellung und der persönlichen Stimmung zu bestehen. Die persönliche Stimmung liegt durchschnittlich zwischen 0,5 und wird somit als „neutral bis gut“ eingeschätzt und 2,0, was einer Bewertung als „sehr gut“ entspricht. Der Zusammenhang zwischen Stimmung und Zufriedenheit mit der Vorstellung kann rechnerisch überprüft werden. Die Korrelation der Befragungsergebnisse liegt zwischen 0,33 in T10, was einem mittleren linearen Zusammenhang entspricht und mit 1,00 einem perfekten starken linearen Zusammenhang in T02. Somit ist ein Zusammenhang nicht in allen Spielstätten nachweisbar. Stellt man jedoch die mittleren Bewertungen zur Zufriedenheit mit der Vorstellung und der Stimmung gegenüber, so zeigt sich mit einer Korrelation von 1,0 ein perfekt linearer Zusammenhang. Tendenziell gilt also, je besser den Befragungsteilnehmern die Vorstellung gefallen hat, desto besser ist auch ihre Stimmung.

Bei einer Betrachtung der abgefragten Parameter Gestaltung, Akustik, Sichtbeziehung, Beleuchtung und Sitzkomfort im Zuschauersaal zeigt sich allgemein eine positive Wahrnehmung. Die mittlere Bewertung der einzelnen Parameter liegt nur in wenigen Fällen unter 1,0 und somit der Einstufung „gut“. Eine Ausnahme bilden die Akustik und der Sitzkomfort. Besonders ungünstig wird ersteres in T04 eingeschätzt. Hier liegt die mittlere Bewertung lediglich bei „neutral“. Da der Rücklauf in dieser Theaterspielstätte jedoch sehr gering war, kann die Repräsentativität dieses Ergebnisses nicht unzweifelhaft bestätigt werden. Im Verhältnis zu den anderen Parametern findet der Sitzkomfort die geringste Zustimmung und wird durchschnittlich am schlechtesten eingeschätzt.

Unter Berücksichtigung der abgefragten Parameter wurde der Zuschauersaal in Bezug auf die Gesamtbehaglichkeit als „neutral“ bis „behaglich“ bewertet. Die geringste Zustimmung finden dabei durchschnittlich T03, T04 und T11 mit einer Bewertung von 0,0, welche einer „neutralen“ Bewertung entspricht. Unter Berücksichtigung aller Parameter zur Zufriedenheit mit dem Raumkomfort sollten die Befragten ihre Gesamtzufriedenheit mit dem Zuschauersaal bewerten. Diese ergab, wie bereits aufgrund der Einschätzung der Einzelparameter zu erwarten, eine hohe Zufriedenheit. Mit Ausnahme von T04 bewegen sich die Bewertungen im Rahmen von „etwas behaglich“ bis zu „behaglich“.[18],[68],[72]

Literatur:
[18] Cognos Institut (2010)
[68] Jobst, J., Boerner, S. (NN)
[72] Kliment, T. (2016)

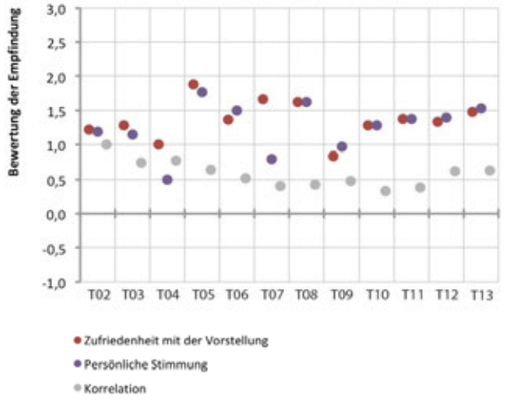

Abb. 164 Zusammenhang zwischen Zufriedenheit und persönlicher Stimmung der Befragten

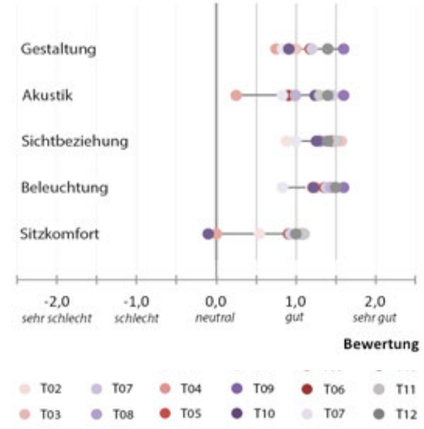

Abb. 165 Durchschnittliche Bewertung des Theatersaals in den unterschiedlichen Spielstätten

5.6.2.2 Wahrnehmungsbewertung des persönlichen thermischen Befindens

Nachdem in [5.6.2.1] die Zusammensetzung der Befragungsteilnehmer sowie die allgemeine Zufriedenheit mit dem Theatersaal analysiert worden ist, werden im Folgenden die Befragungsergebnisse zum thermischen Raumkomfort sowie der Luftqualität dargestellt.
Hinweise zur Raumluftqualität können aus Aussagen zu Schwierigkeiten mit Müdigkeit und Konzentration der Befragten abgeleitet werden. Über alle Theaterspielstätten hinweg betrachtet, gibt es nur einen sehr geringen Anteil an Theaterbesuchern, die durch Müdigkeit beeinträchtigt waren. Der Anteil der Beeinträchtigten liegt in den meisten Theaterspielstätten unter 20%. Eine Ausnahme bilden T02 und T07. Hier gaben 32,4%, bzw. 66,7% an, Müdigkeit verspürt zu haben.
Auch mit der Konzentration bestehen tendenziell keine Probleme, da der prozentuale Anteil derer, die sich beeinträchtigt fühlten, zwischen 0,0% in T05, T06 sowie T10 und 25% in T04 liegt. Nur bei T07 war der Anteil mit 60% erheblich größer.
Unter Berücksichtigung der Faktoren Müdigkeit und Konzentration fühlten sich nur die Besucher von T07 beeinträchtigt. Deutet man die Befragungsergebnisse zu Müdigkeit und Konzentration als Anzeichen zu hoher CO_2-Konzentration in der Raumluft, so sollten besonders die Messwerte von T07 hierauf überprüft werden.
Anschließend wurde die Empfindung der Befragten zu unterschiedlichen Parametern, den Raumkomfort betreffend, abgefragt. Das Temperaturempfinden wird im Mittel mit 0,0 zwischen „neutral“ in T05, T06, T08, T09, T11, T12 sowie T13 und 2,0, entsprechend „warm“, in T03 angegeben. Aufgrund der Mediane wird die Temperatur also in mehr als der Hälfte der Theaterspielstätten als neutral eingeschätzt. Die Befragten der restlichen Häuser bewerteten diese als eher etwas zu hoch.
Neben der Betrachtung der Mediane darf für die thermische Wahrnehmungsbewertung auch das arithmetische Mittel berechnet werden [siehe 5.6.1]. Die Durchschnittswerte liegen zwischen 0,0 in T05 sowie T09 und 1,5 in T03. Ebenso wie bei Betrachtung der Mediane zeigt sich hier, dass die Temperatur zwischen einer neutralen Einschätzung bis hin zu einer Empfindung der Temperatur als „etwas warm“ bis „warm“ variiert. Die Standardabweichung beträgt zwischen 0,38 in T10 und 1,43 in T11 und unterscheidet sich somit stark in Abhängigkeit der Spielstätte. Bei einer statistischen Überprüfung der Nullhypothese für die berechneten Mittelwerte bilden sich zwei Gruppen heraus. In T02, T03, T10 und T13 ist das Ergebnis signifikant unterschiedlich. Dies ist nicht überraschend, da die Mittelwerte mit Ausnahme von T13 alle größer als 1,0, entsprechend einer Empfindung der Temperatur als „etwas warm“, sind. Es kann also davon ausgegangen werden, dass dies auch die tatsächliche Empfindung der Befragten wiederspiegelt. Obwohl der Mittelwert in T13 lediglich 0,4 beträgt und ist somit als eine neutrale Empfindung mit Tendenz „etwas warm“ zu bewerten ist, wurde ein signifikant unterschiedliches Testergebnis festgestellt.

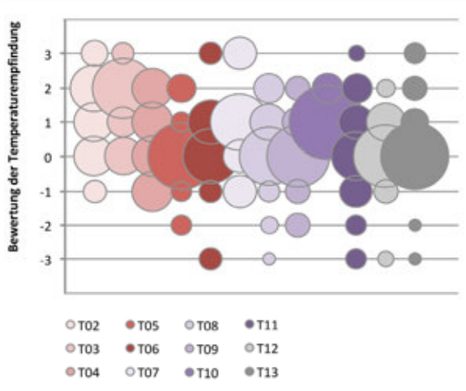

Abb. 166 Verteilung der Befragungsergebnisse zum Temperaturempfinden

Signifikant waren die Testergebnisse bei T04, T05, T06, T07, T08, T09, T11 und T12. Allen Spielstätten ist gemein, dass ihre Mittelwerte nahe am Neutralitätspunkt liegen. Aufgrund des Testergebnisses ist davon auszugehen, dass hier ein Neutralitätsempfinden der Temperatur vorliegt.
Deutlich wird dieses Ergebnis auch, wenn man die Verteilung der Befragungsergebnisse betrachtet. Der größte Anteil der Befragten empfindet die Temperatur als neutral oder eher warm. Dies zeigt sich durch die Verteilung der Befragungsergebnisse, bei der zwischen 18,8% in T05 und 100% in T10 angaben, die Umgebung als eher warm zu empfinden. Ein Kältegefühl stellte sich nur zwischen 0,0% in T03 sowie T10 und 28,3% in T11 ein. Betrachtet man den gesamten Rücklauf, so geben mit 34,9% gegenüber 16,5% etwa doppelt so viele Personen an, die Temperatur als eher warm wahrgenommen zu haben.
Einhergehend mit dem Empfinden der Umgebung als „neutral“ bis eher „warm“ wird die Luft als „neutral“ bis eher „trocken“ wahrgenommen. Beurteilt wurde dieser Parameter durchschnittlich zwischen 0,0, entsprechend einer „neutralen“ Bewertung, in denselben Spielstätten, in denen die Temperatur ebenfalls im Mittel eine Neutralitätsbewertung erhielt, und 2,0, was als „trocken“ interpretiert werden kann, in T10. In sieben Theaterspielstätten ist eine Streuung von 0,5 Intervallen zwischen zwei nebeneinanderliegenden Stufen vorhanden. Maximal beträgt diese 1,0 in T09 und T11. Deutlich wird dieses Ergebnis auch daran, dass die Luft zwar, mit Ausnahme von T02, T03, T07 und T10, in den meisten Theaterspielstätten überwiegend als neutral bezeichnet wird, aber dennoch zwischen 25% in T04 und 55,3% in T02 diese als trocken bewerteten. Dagegen wird die Luft nur von 0,0% in T05, T06 sowie T09 bis 25% der Befragten in T04 als eher feucht empfunden.
Die Luftbewegung im Zuschauersaal, die zur lokalen thermische Unbehaglichkeit führen kann, wird allgemein

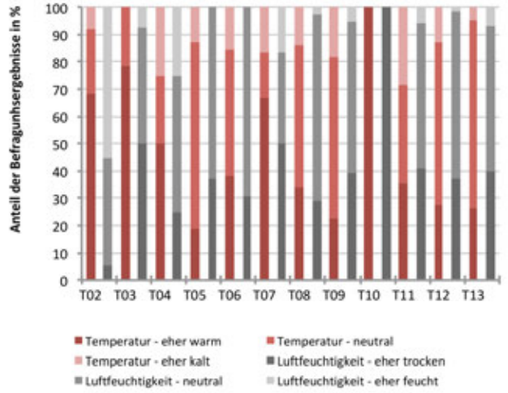

Abb. 167 Prozentuale Verteilung der Befragungsergebnisse zum Temperatur- und Feuchtigkeitsempfinden

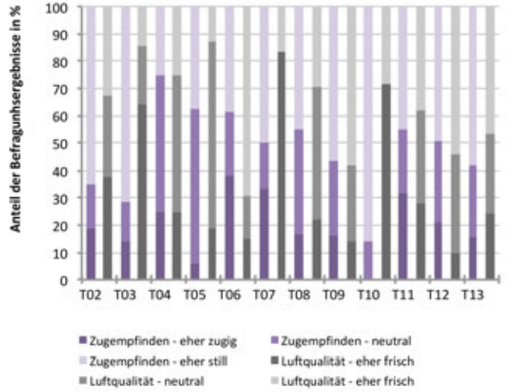

Abb. 168 Prozentuale Verteilung der Befragungsergebnisse zum Empfinden der Luftbewegung und der Luftqualität

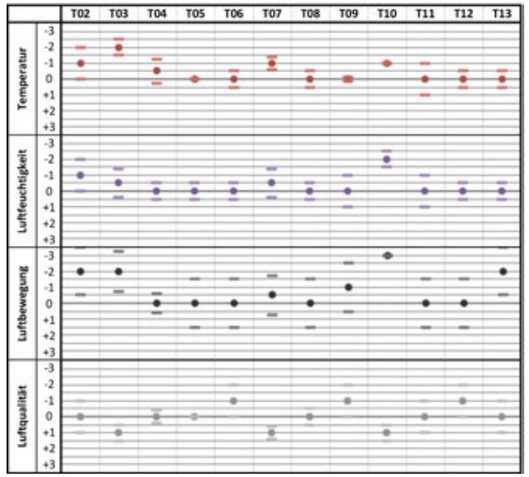

Abb. 169 Median mit Streuungsbereich je Raumkomfortparameter und Theaterspielstätte

als eher gering empfunden. Die durchschnittlichen Bewertungen liegen hier zwischen 0,0, entsprechend „neutral“, und 3,0 in T10, was als „sehr still“ einzustufen ist. Die Betrachtung der Verteilung der Befragungsergebnisse zeigt, dass in neun von zwölf Theaterspielstätten die Luft überwiegend als still bewertet wurde. In den restlichen Spielstätten liegt ein nahezu ausgeglichener Anteil der Bewertung als „eher still“ und „eher zugig“ vor. Die Streuung bewegt sich zwischen 0,0 Intervallen zwischen zwei nebeneinanderliegenden Stufen und 1,5, was in acht Theaterspielstätten der Fall ist. Anhand der Streuung wird sichtbar, dass bei Beurteilung der Luftbewegung von allen betrachteten Komfortparametern die größte Uneinigkeit unter den Befragten herrscht. Dies ist vermutlich auf die für diese Betrachtung ungünstige Wahl der Skala für diese Fragestellung zurückzuführen. An dieser Stelle wäre die Nutzung einer unipolen Skala mit einem Ursprungspunkt, der dem Empfinden keiner Luftbewegung entsprochen hätte, anstelle einer zweipoligen Skala mit Neutralitätspunkt folgerichtig gewesen.

Anders als bei den restlichen Parametern lässt sich bei Beurteilung der Luftqualität keine einheitliche Tendenz in den Theaterspielstätten feststellen. Die mittlere Einschätzung dieses Parameters liegt zwischen -1,0 in T03, T07 sowie T10 und 1,1 in T06, T09 sowie T12 und zeigt somit die größte Diskrepanz. Die Aussagen variieren also zwischen einer Empfindung der Luft als „etwas stickig“ und „etwas frisch“. Auch die Streuung ist hier gegenüber der Abfrage der Wahrnehmung der Temperatur sowie der Luftfeuchtigkeit im Mittel ein wenig größer. Sie variiert zwischen 0,0 Intervallen zwischen aneinandergrenzenden Stufen in T05 und 1,0. Eine Streuung von 1,0 liegt in der Hälfte der Spielstätten vor.

Die Prozentuale Aufgliederung der Befragungsergebnisse in Personengruppen, welche die Luft als „eher stickig“, „neutral“ und „eher frisch“ bewerten, zeigt drei Gruppen. In der ersten Gruppe, die T06, T09, T12 und T13 umfasst, wird die Luft als „eher frisch“ empfunden. Der prozentuale Anteil überwiegt gegenüber denen, welche die Luft als stickig empfinden. Andersherum verhält es sich in der zweiten Gruppe, zu der T03, T07 und T10 zählen. Hier wird die Luft als eher stickig empfunden. Bei einer Gegenüberstellung der subjektiven Befragungsergebnisse mit den objektiven Messwerten sollte für diese Gruppe besonders die CO_2-Konzentration in der Raumluft geprüft werden. Die dritte Gruppe, in der T02, T04, T05, T08 und T11 einzusortieren sind, sind die prozentualen Anteile derer, welche die Luft als „eher stickig“ und „eher frisch“ empfinden etwa ähnlich verteilt. In den meisten Fällen überwiegen die Personen in dieser Gruppe, welche die Luft als „neutral“ einschätzen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die einheitlichste Bewertung aller Parameter in T10 erfolgte. Sichtbar wird dies an der geringen Streuung der Ergebnisse. Die größte Streuung zeigt sich dagegen in T11 und T02.

5.6.2.3 Affektive Bewertung und thermische Präferenz

Nachdem die Darstellung der Wahrnehmungsbewertung des persönlichen thermischen Befindens in [5.6.2.2] erfolgt ist, wird daran anknüpfend die affektive Bewertung sowie die thermische Präferenz erörtert.

Die Affektive Bewertung erfolgt über die Abfrage der Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung. Diese wird, unter Berücksichtigung aller Parameter zum Raumkomfort, in den verschiedenen Theaterspielstätten sehr unterschiedlich gesehen. Zur Abfrage der Behaglichkeit wurden sieben Stufen formuliert, die eine Bewertung von äußerst behaglich bis äußerst unbehaglich zulassen. Der Median in den betrachteten Theaterspielstätten liegt zwischen -1,0 in T04 und 2,0 in T05, T12 und T13. Die Streuung der Verteilung liegt zwischen 0,4 Intervallen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen in T04 und 1,5 in T11. Der am häufigsten auftretende Median in den Theaterspielstätten liegt bei 1,0 und spiegelt damit eine mittlere Bewertung der thermischen Umgebung von „etwas behaglich“ wieder. Die Streuung, ermittelt durch den halben Quartilsabstand, der Befragungsergebnisse dieser Theaterspielstätten und damit die Multidimensionalität des Meinungsbilds betragen in T03 und T06 0,5 Intervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen. Im Gegensatz dazu zeigen T02, T08 und T09 mit 1,0 eine doppelt so hohe Streuung, während diese in T10 mit 0,8 zwischen diesen beiden Werten liegt. Mit Ausnahme von T10 zeigen Theaterspielstätten mit einer größeren Streuung auch eine größere Anzahl von Befragungsteilnehmern. Mit einer steigender Anzahl an befragten Personen scheint sich das Meinungsbild über die thermische Umgebung also breiter zu fächern. Bei einer genaueren Betrachtung der einzelnen Theaterspielstätten wird deutlich, dass die affektive Bewertung überwiegend positiv ausfällt. Der Anteil an Personen, die dieses positiv sahen, betrug in den meisten Fällen mehr als 50%. In T05, T12 und T13 wurde das Raumklima im Mittel als „behaglich“

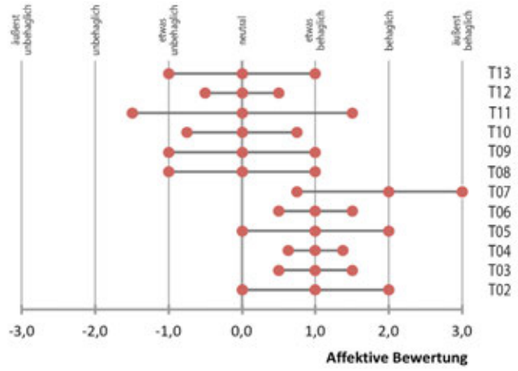

Abb. 170 Mittlere Bewertung sowie Streuung der affektiven Bewertung des persönlichen thermischen Befindens

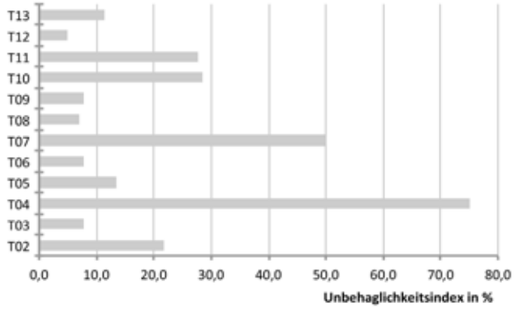

Abb. 171 Unbehaglichkeitsindex in den einzelnen Theaterspielstätten

eingestuft, während in T02, T03, T06, T08, T09 und T10 dieses immer noch als „etwas behaglich“ empfunden wurde. Bei T11 lag die Tendenz zur Mitte bei einer neutralen Einschätzung. Sowohl in T04 und T07 fiel die Zufriedenheit mit dem Raumklima geringer aus, da hier der Median bei „etwas unbehaglich“ liegt.

Die überwiegend positive Wahrnehmung der Behaglichkeit spiegelt sich auch in dem niedrigen Unbehaglichkeitsindex wieder. Dieser beinhaltet den Anteil der Personen, die angaben, das Raumklima mindestens „etwas unbehaglich“ zu finden und bewegt sich zwischen 4,9% in T12 und 28,6% in T10 für alle Spielstätten mit positiven Median. Der Unbehaglichkeitsindex für T04 und T07 beträgt dagegen 75,0%, bzw. 50,0%.

In Anschluss an die affektive Bewertung der vorhandenen thermischen Umgebung erfolgt die Analyse der Aussagen zu künftigen Präferenzen. Durch die Abfrage der Wahrnehmungsbewertung in [5.6.2.1] ist deutlich geworden, dass die Temperatur in den Theaterspielstätten überwiegend als neutral bis eher warm eingeschätzt wurde. Bei Angaben der Präferenzen ist also zu erwarten, dass die Befragungsteilnehmer im Falle des Wunsches nach einer Veränderung eine geringere Temperatur bevorzugen würden. In T05, T06, T08, T09, T11, T12 und T13, bei denen die thermische Wahrnehmung im Mittel als neutral bewertet wurde, wurde keine Veränderung präferiert. Bei allen weiteren Theaterspielstätten, in denen die eine erhöhte thermische Wahrnehmung angegeben wurde, wird mit einer Ausnahme im gleichen Maße eine Verringerung der Temperatur gewünscht. Sichtbar wird dies auch an der Korrelation zwischen dem Median der thermischen Wahrnehmung und der thermischen Präferenz. Dieser zeigt mit -0,54 einen mittleren linearen Zusammenhang. Je höher das mittlere Temperaturempfinden ist, desto stärker ist also auch der Wunsch nach einer Temperaturabsenkung. Der Präferenzindex, also der

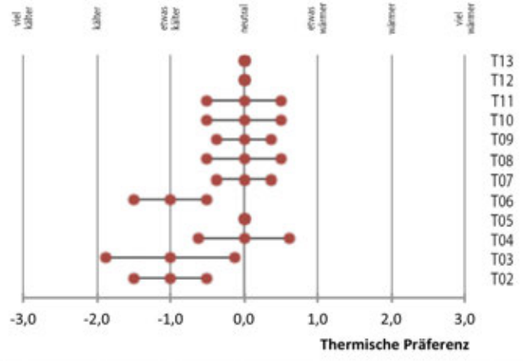

Abb. 172 Mittlere Bewertung sowie Streuung der thermischen Präferenz

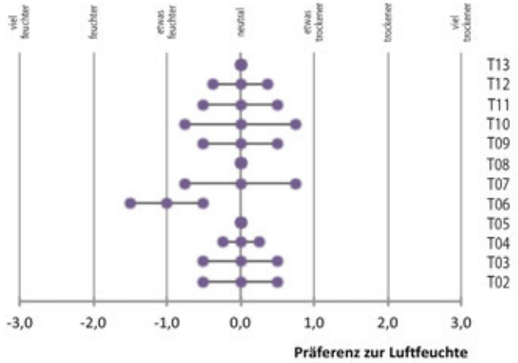

Abb. 173 Mittlere Bewertung sowie Streuung der Präferenz zur Luftfeuchtigkeit

Anteil an Personen die eine Änderung des derzeitigen Zustands wünschen, variiert stark in den einzelnen Theaterspielstätten und liegt zwischen 13,3% in T05 und 100% in T10. Deutlich wird dies auch anhand der Streuung. Diese bewegt sich zwischen 0,0 Intervallen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen in T05, T12 und T13 in diesem Falle herrscht eine große Einigkeit der Befragten über ihre Präferenz, keine Änderung der Temperatur zu favorisieren und 0,9 in T03.

Die Einschätzung der Feuchtigkeit der Luft, die aufgrund der fehlenden sensorischen Ausstattung des Menschen nur bedingt erfolgen kann, ergab in den meisten Theaterspielstätten eine mittlere neutrale Bewertung. Dementsprechend ist auch in den meisten Fällen durchschnittlich keine Änderung des Zustands gewünscht. Eine Ausnahme bilden T04 und T10. Hier wird im Mittel eine etwas feuchtere Luft präferiert. Über alle Theaterspielstätten hinweg ist eine geringe Streuung bis maximal 0,8 Intervallen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen zu beobachten. Betrachtet man nun den Anteil an Personen, die angaben eine Veränderung zu wünschen, so liegt dieser zwischen 20% in T05 und 85,7% in T07. Die rechnerische Überprüfung des Zusammenhangs zwischen Wahrnehmung und Präferenz ergibt eine Korrelation von 0,29, was einem schwachen linearen Zusammenhang entspricht. Entgegen der so intendierten Aussage, dass bei geringen relativen Luftfeuchtigkeit eine weitere Verringerung dieser gewünscht ist, zeigen die Ergebnisse aus den einzelnen Theaterspielstätten auf der einen Seite bei mittlerer neutraler Wahrnehmungsbewertung eine Präferenz zur Steigerung der Luftfeuchtigkeit, auf der anderen Seite jedoch bei einer Wahrnehmungsbewertung als „etwas trocken“ keinen Wunsch nach einer Veränderung. Der laut Korrelation bestehende Zusammenhang ergibt sich folglich nur aus den Übereinstimmungen, die in einigen Theaterspielstätten zwischen der neutralen

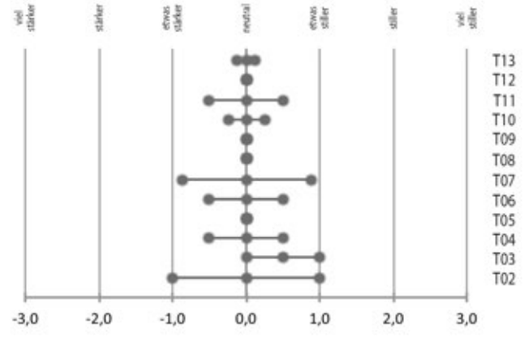

Abb. 174 Mittleren Bewertung sowie Streuung zur Präferenz der Luftbewegung

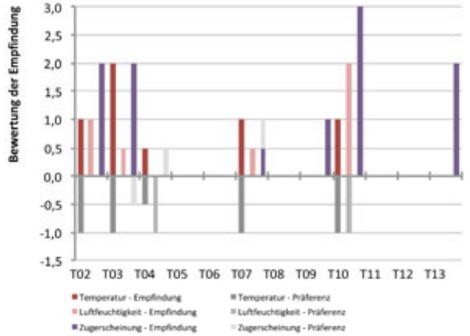

Abb. 175 Wahrnehmungsbewertung und Präferenz des persönlichen thermischen Empfindens

5.6.2.4 Persönliche Annehmbarkeit und Toleranz

Wahrnehmung und den neutralen Präferenzangaben bestehen.
In der Hälfte aller betrachteten Spielstätten tendiert die Einschätzung zu einer geringen Luftbewegung, während diese in der anderen Hälfte als neutral bewertet wurde. Entgegen der Vermutung, dass die Luftbewegung entweder erhöht werden oder gleich bleiben sollte, zeigen die Befragungsergebnisse hier nur im Fall von T07 eine Übereinstimmung. Bei den restlichen Theaterspielstätten wird mit Ausnahme von T03 und T04 keine Änderung des Zustands präferiert. In T03 zeigt die Gegenüberstellung der Wahrnehmungsbewertung mit der Präferenz besonders widersprüchliche Ergebnisse. Obwohl die Ergebnisse der Wahrnehmungsbewertung bereits eine geringe Luftbewegung vermitteln, zeigt die Auswertung der Präferenzen im Mittel eine Tendenz dazu diese zu erhöhen. Bei T04 liegt im Mittel eine neutrale Wahrnehmung vor, der jedoch eine geringe mittlere Tendenz zur der Erhöhung der Luftbewegung entgegen steht. Auch anhand der Korrelation von 0,50, die als mittlerer linearer Zusammenhang ausgelegt werden kann, wird sichtbar, dass die Präferenzaussagen der Befragten nicht einer eindeutigen logischen Argumentation folgen, wie es vor allem bei dem Parameter Temperatur der Fall war. Der Korrelationskoeffizient ist so zu interpretieren, dass bei einer bereits als gering wahrgenommenen Luftbewegung eine noch geringere Luftbewegung bevorzugt wird. Möglicherweise wird eine geringe Luftbewegung als ein positives Merkmal wahrgenommen, da in diesem Fall keine Zugerscheinungen auftreten. Folglich wird vor diesem Hintergrund keine Steigerung der Luftbewegung gewünscht. Dennoch bestehen für dieses Komfortmerkmal Präferenzindizes von 28,6% in T10 bis 66,7% in T07. Sowohl die eher geringe Streuung von maximal 1,0 Intervallen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen als auch die im Verhältnis zu den anderen beobachteten Präferenzindizes geringe Spanne zwischen diesen zeigt die Zustimmung zu den vorliegenden Raumklimaverhältnissen.

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die Befragungsergebnisse zum persönlichen thermischen Befinden über die Schritte Wahrnehmungsbewertung, affektive Bewertung und die thermische Präferenz dargestellt worden sind, werden im Folgenden die persönliche Annehmbarkeit sowie die persönliche Toleranz gegenüber der thermischen Umgebung erörtert.
In Bezug auf die persönliche Annehmbarkeit bestand für die Befragten die Möglichkeit, die thermische Umgebung entweder als annehmbar oder nicht annehmbar einzustufen. In allen Theaterspielstätten, mit Ausnahme von T07, liegt der Modus bei „eher annehmbar als nicht annehmbar“. Wird darüber hinaus die Verteilung der Befragungsergebnisse auf die beiden Antwortmöglichkeiten betrachtet, so bewegt sich der Unannehmbarkeitsindex zwischen 0,0% in T05 und 25,0% in T04. Im Falle von T07 waren die Befragungsergebnisse gleichwertig auf die beiden Antwortmöglichkeiten verteilt, sodass der Unannehmbarkeitsindex 50% beträgt. In dieser Spielstätte liegt somit die geringste Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung vor. Im Gegensatz hierzu ergab sich in T05 mit 100% der Befragten, die eine persönliche Annehmbarkeit gegenüber der thermischen Umgebung äußerten, die positivste Bewertung. Zwischen diesen beiden Extremen bilden sich drei Gruppen heraus. In T03, T06, T08, T09 und T12 betrug der Unannehmbarkeitsindex weniger als 10%. Mit maximal 20% lag dieser in T10, T11 und T13 ein wenig höher. Die dritte Gruppe, zu der T02 und T04 gehören, zeigt einen Unannehmbarkeitsindex von ca. 15%.
Die Toleranz gegenüber der thermischen Umgebung zeigt sich in allen Theaterspielstätten recht positiv. Im Mittel wird die thermische Umgebung als „neutral“ in T07 bis „völlig erträglich“ in T05 sowie T12 eingestuft. Über das mittlere Ergebnis herrscht in den einzelnen Theaterspielstätten große Einigkeit wie sich an der Streuung der Befragungsergebnisse ablesen lässt. Diese beträgt zwischen 0,1 Intervallen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen in T09 und 0,8 in T07 sowie in T10. Die positive Bewertung hinsichtlich der Toleranz gegenüber der thermischen Umgebung lässt sich auch anhand der Verteilung der Befragungsergebnisse ablesen. In nahezu allen Theaterspielstätten wird das Raumklima von den meisten Befragten als eher erträglich eingestuft. Der Schmerzhaftigkeitsindex liegt nur zwischen 0,0% in T04 sowie T05 und 33,3% in T07.
Insgesamt wird das thermische Befinden in den Zuschauersälen von den Befragten eher positiv bewertet. Dies lässt sich daraus schließen, dass die Wahrnehmungsbewertung einzelner Raumkomfortparameter überwiegend neutral ausfiel. In Konsequenz wurden bei den Präferenzen bezüglich der einzelnen Raumkomfortparameter im Mittel auch nur moderate Änderungswünsche festgestellt. Ebenfalls folgerichtig wurde das thermische Befinden in den Zuschauersälen auch eher als behaglich eingestuft, was sich neben dem Median auch an den geringen Unbehaglichkeitsindizes festmachen lässt. In Bezug auf die thermische Umgebung sehen die meisten Befragten, mit wenigen Ausnahmen, diese als annehmbar an. So ist auch die Toleranz gegenüber dem Raumklima im Allgemeinen hoch, sodass der Schmerzhaftigkeitsindex gering ausfällt. Eine besonders positive Bewertung durch die Befragten erfuhr auf nahezu allen Ebenen T05. Optimierungspotential, insbesondere in Bezug auf die Raumluftqualität, scheint bei T07 zu bestehen.

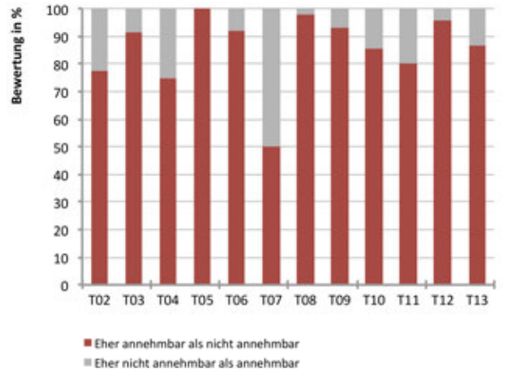

Abb. 176 Verteilung der Befragungsergebnisse zur persönlichen Annehmbarkeit der thermischen Umgebung

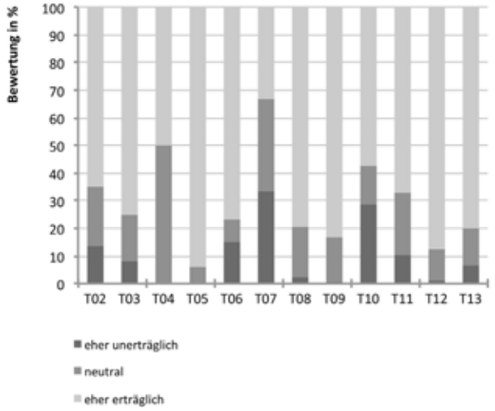

Abb. 177 Verteilung der Befragungsergebnisse zur Toleranz gegenüber der thermischen Umgebung

5.7 Gegenüberstellung der Nutzerbefragung mit den Messwerten

5.7.1 Temperatur

Zur Überprüfung der Übereinstimmungen zwischen den subjektiven Befragungsergebnissen zum Temperaturempfinden und den objektiven Messwerten zur Raumtemperatur findet im Folgenden eine Gegenüberstellung statt.

Anhand der Befragungsergebnisse bilden sich zwei Gruppen heraus. Die erste Gruppe umfasst T02, T03 und T10. Bei allen Theaterspielstätten wurde die Empfindung der Temperatur durch die Befragten mit einem Mittelwert größer als 1,0 angegeben, was einer Empfindung als mindestens etwas warm entspricht.

Die zweite Gruppe beinhaltet mit T04, T05, T06, T07, T08, T09, T11 und T12 die meisten Spielstätten. Nach Überprüfung der berechneten Mittelwerte mittels t-Tests beträgt die mittlere Bewertung 0,0, was einer neutralen Empfindung entspricht.

Stellt man die Ergebnisse dieser beiden Gruppen mit den durchschnittlich gemessen Lufttemperaturen gegenüber, so lässt sich das Befragungsergebnis nicht erklären, da die mittleren Lufttemperaturen der ersten Gruppe nicht über denen der zweiten liegen.

Auch die Kategorisierung der Messwerte [siehe 5.5.2.2] kann mit Ausnahme von T03 keine Erklärung liefern. In T03 wurde das Temperaturempfinden mit einem Mittelwert von 1,5, also einer Bewertung zwischen etwas warm bis warm, am höchsten eingeschätzt. Bei einer Betrachtung der Kategorisierung wird sichtbar, dass nur 2,0% der Messwerte mindestens in Kategorie II einsortiert werden können. Dagegen liegen 60,5% der Messwerte sogar außerhalb der Kategorien. Bei anderen Spielstätten, wie T05, T09 und T11, die eine ähnliche Verteilung der Messwerte auf die Kategorien aufweisen, liegt jedoch eine Neutralitätsbewertung der Temperatur durch die befragten Zuschauer vor.

Da nur die Einbeziehung der Temperatur nicht ausreichend ist, um die Befragungsergebnisse zu erklären, erfolgte eine Überprüfung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Temperaturempfindung und dem aus der Luftgeschwindigkeit, der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte berechneten PMVs.

Ebenso wie bei der Gegenüberstellung von gemessenen durchschnittlichen Lufttemperaturen mit den Befragungsergebnissen zeigt sich kein eindeutiger Zusammenhang. Besonders bei T02 liegt trotz Bewertung der Temperatur durch die Zuschauer als mindestens etwas warm ein geringer berechneter PMV vor, welcher eher eine Neutralitätsbewertung erwarten lässt.

Betrachtet man die Angaben zum Unbehaglichkeitsempfinden gegenüber den berechneten PPD-Werten, so bilden sich vier Gruppen heraus. In der ersten Gruppe, die T03, T06, T08, T09 und T12 umfasst, liegen Unbehaglichkeitsbewertungen unter 8% vor. Mit Ausnahme von T03 wurde, übereinstimmend mit den niedrigen Unbehaglichkeitsbewertungen, durchschnittlich angegeben, die Temperatur als neutral zu empfinden. Auf Grund dieser Bewertungen könnten die jeweiligen

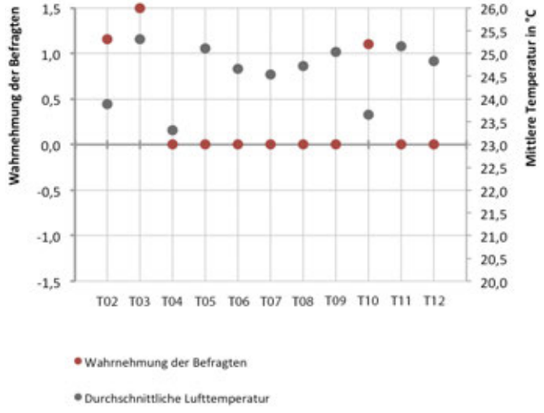

Abb. 178 Mittlere Wahrnehmung der Befragten gegenüber der gemessenen durchschnittlichen Lufttemperatur

Spielstätten in Kategorie B einsortiert werden, da sich die Unbehaglichkeitsbewertungen unter dem Grenzwert von 10% befinden. Die berechneten PPD-Werte liegen dagegen zwischen 10% und 20% und erfüllen demnach nur Kategorie C. In der ersten Gruppe zeigen die Befragten also eine größere Zufriedenheit mit den vorliegenden Temperaturen als auf Grund der berechneten Werte zu erwarten ist.

Die zweite Gruppe beinhaltet lediglich T05. Der Unbehaglichkeitsindex von 13,3% stimmt mit dem berechneten PPD von 13,6% so gut wie überein, sodass eine Einsortierung der Theaterspielstätte in Kategorie C vorgenommen werden muss. Trotz der Unbehaglichkeitsbewertungen, die eine Bewertung der Temperatur von neutral bis etwas warm erwarten lassen, wurde von den Befragten durchschnittlich ein Neutralitätsempfinden angegeben.

In die dritte Gruppe werden T02, T10 und T11

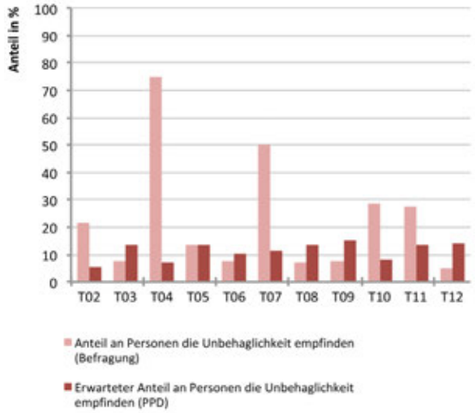

Abb. 179 Unbehaglichkeitsindex gegenüber dem vorausgesagten Anteil Unzufriedener

einsortiert. Hier liegt ein Unbehaglichkeitsindex aus den Zuschauerbefragungen zwischen 20% und 30% vor. Bei T02 und T10 zeigen sich, einhergehend mit dem hohen Unbehaglichkeitsindex, durchschnittliche Bewertungen des Temperaturempfindens über 1,0, sodass die Werte keiner Kategorie mehr zuzuordnen sind. Anhand der berechneten PPD-Werte wird deutlich, dass hier eine Diskrepanz zwischen der subjektiven Empfindung und der aus den Berechnungsergebnissen abgeleiteten Erwartungshaltung besteht. Diese lassen einen geringeren Anteil an Unzufriedenen unter 15% erwarten.

Bei der letzten Gruppe, zu der T04 und T07 gehören, zeigen bereits die Befragungsergebnisse Unstimmigkeiten. Obwohl im Mittel eine Neutralitätsbewertung der Temperatur vorliegt, besteht ein großer Anteil an Unzufriedenen von über 50%. Dieser ist auch durch die berechneten PPD-Werte nicht zu erklären, da diese die Grenzen von Kategorie C deutlich unterschreiten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine Differenz zwischen der subjektiven Temperaturempfindung und der aus den Messwerten abgeleiteten Erwartungshaltung besteht. Die mittleren Lufttemperaturen überschreiten den berechneten Neutralitätspunkt um 1°C bis 2°C und die berechneten mittleren PMVs bewegen sich überwiegend im Bereich von Kategorie C. Dennoch wird die Temperatur durch die Zuschauer großteilig als neutral bewertet. Auch der Unbehaglichkeitsindex ist in vielen Fällen geringer als der objektiv berechnete PPD aus den Messergebnissen.

Zur Berechnung und Einordnung des PPDs werden Annahmen zu den Zuschauern getroffen. Diese beinhalten auch den Tätigkeitsgrad, welcher für Hör-, bzw. Zuschauersäle mit einer „sitzenden Tätigkeit“ definiert ist. Auf Zuschauersäle in Theaterspielstätten trifft möglicherweise der geringere Tätigkeitsgrad „Sitzend, entspannt“ zu. Dies würde dazu führen, dass die berechneten PMVs geringer ausfallen und sich den Befragungsergebnissen annähern.

5.7.2 Luftfeuchte

Im Folgenden wird eine Gegenüberstellung der Befragungsergebnisse zur Luftfeuchtigkeit und der Messwerte zur relativen Luftfeuchte vorgenommen. Die Einschätzung der Luftfeuchtigkeit durch die Befragten muss vor dem Hintergrund bewertet werden, dass der Mensch über keine Sensoren verfügt, über welche er diese direkt abschätzen kann. Stattdessen kann er die Luftfeuchtigkeit nur über sekundäre Faktoren einschätzen. Die Messungen haben gezeigt, dass während des gesamten Messzeitraums keine zu hohen relativen Luftfeuchten aufgetreten sind. Tendenziell sind diese eher zu gering und bewegen sich am unteren Rand der Behaglichkeitsgrenzen. Folglich besteht die Erwartung, dass die Luft auch von den Befragten eher als trocken beurteilt wurde.
Bei der mittleren Beurteilung durch die Befragten sind in den Theaterspielstätten zwei Tendenzen zu beobachten. Eine Gruppe empfindet die Luft als neutral während die zweite Gruppe diese eher als trocken bewertet. Eine mittlere Beurteilung der Luft als eher feucht wurde in keiner Theaterspielstätte abgegeben. Dieser Aspekt deckt sich mit der Erwartung, die aus der Analyse der Messergebnisse entstanden ist.
Überwiegend wird die Luftfeuchte in den Theaterspielstätten mit einem Median von 0,0 als neutral empfunden. Dies gilt für T04, T05, T06, T08, T09, T11 und T12. Mit Ausnahme von T05 und T06 liegen die durchschnittlichen relativen Luftfeuchten über 30%, sodass mehr als 75% der Messwerte Kategorie I zugeordnet werden können. Dennoch besteht keine einheitliche Klassifizierung, da die Aufteilung der restlichen Messwerte in Höhe von 25% sehr unterschiedlich ausfällt. Auf Grund der durchschnittlichen relativen Luftfeuchte sowie der überwiegend über 30% liegenden relativen Luftfeuchte ist auch die Einstufung dieser Spielstätten als „neutral“ nachvollziehbar. In T05 und T06, die ebenso als neutral empfunden wurden, ist die durchschnittliche relative Luftfeuchte jedoch sehr gering, da diese lediglich 24,0%, bzw. 26,3% beträgt. Demnach wäre eine Bewertung der Luft als eher trocken zu erwarten gewesen. Für diese abweichende Beurteilung durch die Befragten lässt sich aus den Messwerten keine Erklärung ableiten.
Als eher trocken wird die Luft in T02, T03, T07 und T10 empfunden. Hier gibt es jedoch noch eine Abstufung zwischen den Spielstätten. In T03 und T07 liegt ein Median von 0,5 vor, was einer Bewertung zwischen „neutral“ bis „etwas trocken“ entspricht. Die durchschnittlich erfasste relative Luftfeuchte beträgt 26,9% für T03 und 30,2% für T07. Sichtbar ist, dass die relative Luftfeuchte objektiv beurteilt, eher gering ist und unter der solcher Spielstätten liegt, bei denen die relative Luftfeuchte als neutral bewertet wurde.
Durch die weitere Klassifizierung der Messwerte können die Spielstätten Kategorie IV, bzw. III zugeordnet werden. Große Anteile der Messwerte liegen über 25% relativer Luftfeuchte. Für T03 werden aber auch sehr geringe Luftfeuchten unter 20% erfasst, was die geringere Einordnung in Kategorie IV erklärt. Im Vergleich zwischen T03 und T07 wird sichtbar, dass in T07 der Anteil an Personen, welche die Luft als eher feucht bewerten, mit 16,7% gegenüber 7,1% höher ist. Diese Aussage stimmt mit den durchschnittlichen relativen Luftfeuchten überein.
In T02 liegt die mittlere Bewertung mit einem Median von 1,0 bei „etwas trocken“. Diese Einschätzung der Luftfeuchtigkeit deckt sich mit den Messergebnissen. Dies ist daran zu erkennen, dass die durchschnittliche relative Luftfeuchte in dieser Spielstätte lediglich 25,3% beträgt. Gegenüber T03 und T07, deren Median bei 0,5 liegt, ist dieser Durchschnittswert ein wenig geringer und die Luft folglich trockener. Auch bei der Kategorisierung erzielt die Spielstätte schlechtere Werte. Während in T03 und T07 noch ein Großteil der Messwerte über 30% liegt, tritt dieser Fall in T02 nie ein. Stattdessen bewegt sich die relative Luftfeuchte zu 60,2% der Zeit zwischen 20% und 25% und ist Kategorie III zuzuordnen. Somit entspricht die Abstufung der Ergebnisse aus der Nutzerbefragung auch den Messwerten.
Die schlechteste Bewertung durch die Befragten erhielt T10. Hier liegt die mittlere Bewertung bei 2,0. Die Luft wird hier von allen Befragungsteilnehmern als eher „trocken“ empfunden. Diese Wahrnehmung steht im Gegensatz zu den Messwerten. Im Mittel lag die relative Luftfeuchte in dieser Spielstätte bei 33,8% und zählt somit zu den höheren erfassten durchschnittlichen relativen Luftfeuchten. Mit einem Anteil von 99,1% wurde fast die gesamte Zeit eine relative Luftfeuchte über 30% erreicht. Von allen Spielstätten, die Kategorie I zugeordnet werden können, ist dies der konstanteste Wert. Auch hier kann anhand der erfassten Daten keine zufriedenstellende Erklärung für die Diskrepanz zwischen den Befragungs- und Messergebnissen gefunden werden. Möglicherweise werden jedoch die Ergebnisse durch den geringen Rücklauf der Nutzerfragebögen in dieser Spielstätte verfälscht.
In vielen Fällen stimmt die Wahrnehmung der Luftfeuchtigkeit und der gemessenen relativen Luftfeuchte in der Tendenz überein. Die Spielstätten, die ähnlich bewertet wurden, zeigen einige sich wiederholende Merkmale. Auch in der vergleichenden Betrachtung der Spielstätten erscheinen die meisten Befragungsergebnisse schlüssig. Dennoch kann kein rechnerischer Zusammenhang zwischen der Empfindung und den Messergebnissen nachgewiesen werden. Hierfür sind die Differenzen zwischen der Bewertung durch die Nutzer und den Messergebnissen in T05 und T06 sowie in T10, für die sich auch nur bedingt schlüssige Erklärungen finden lassen, zu groß.

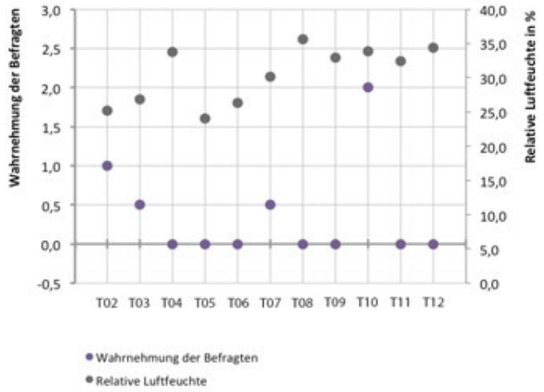

Abb. 180 Mittlere Wahrnehmung der Befragten gegenüber der gemessenen durchschnittlichen relativen Luftfeuchte während der Vorstellungszeiten

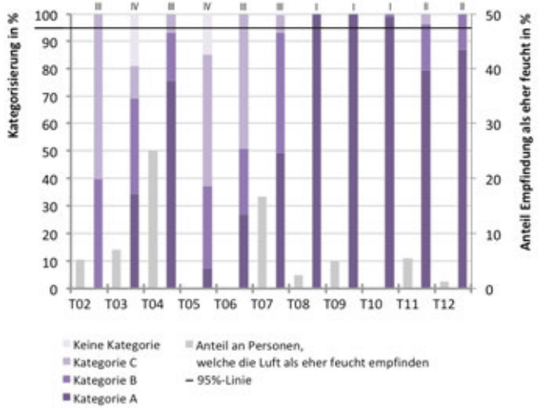

Abb. 181 Kategorisierung der Messwerte gegenüber dem Anteil an Personen, die angegeben haben, die Luft als eher feucht zu empfinden

5.7.3 Luftbewegung

Nachfolgend werden die Befragungsergebnisse zur Luftbewegung mit den Messergebnissen zur Luftgeschwindigkeit gegenübergestellt. Unabhängig weiterer Unterscheidungen wurde in nahezu allen Theaterspielstätten, mit Ausnahme von T04, T07 und T10 mit 1,5 Intervallen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen eine, im Verhältnis zu anderen Raumkomfortparametern, große Streuung festgestellt. In Bezug auf die Stärke der Luftbewegung gehen die Meinungen folglich recht weit auseinander. Des Weiteren lassen sich die Theaterspielstätten anhand der Befragungsergebnisse in zwei Gruppen zusammenfassen, welche die Luftbewegung im Mittel als „neutral“ oder als „eher still“ wahrgenommen haben. Als neutral, weil im Mittel ein Median von 0,0 vorliegt, werden T04, T05, T06, T08, T11 und T12 bewertet. Eine geringere Luftbewegung wurde in den restlichen fünf Spielstätten wahrgenommen. Die Messwerte der durchschnittlichen Luftbewegung in diesen Theaterspielstätten zeigen jedoch keine geringeren Werte gegenüber der ersten Gruppe, in der die Luftbewegung als neutral bewertet wurde. Besonders in T02 und T03 liegen mit durchschnittlichen Luftgeschwindigkeiten von 0,23 m/s, bzw. 0,12 m/s die höchsten Werte vor, obwohl die Luftbewegung hier im Mittel als besonders gering wahrgenommen wurde.
Auch bei Betrachtung der Kategorisierung der Luftgeschwindigkeiten können keine Merkmale festgestellt werden, anhand derer die Unterscheidung zwischen den beiden Gruppen und auch zwischen den mittleren Aussagen der Befragten gerechtfertigt werden kann. Eine Ausnahme bildet T10. Hier wurde die Luftbewegung als „sehr gering“ wahrgenommen, was auch an den Messwerten abzulesen ist. Die Luftgeschwindigkeit liegt im Mittel bei 0,02 m/s und zeigt den von allen Theaterspielstätten geringsten Wert. Außerdem können die Messwerte zu 99,1% in Kategorie I eingeordnet werden, sodass hier die höchsten Komfortbedingungen vorliegen.
Zwar ist kein Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Luftgeschwindigkeit und der mittleren Wahrnehmung zu erkennen, jedoch besteht ein schwach linearer Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Luftgeschwindigkeit und dem prozentualen Anteil an Personen, welche die Luftbewegung als eher zugig empfanden. Hieraus leitet sich die Aussage ab, dass je mehr Personen die Luftbewegung als zugig wahrnehmen, desto höher sind auch die mittleren Luftgeschwindigkeiten. In T06, T07 und T11 liegt der Anteil an Personen, welche die Umgebung als eher zugig empfanden, bei über 30%. Diese Spielstätten haben gemeinsam, dass mindestens 10% der Messwerte in Kategorie III und IV eingeordnet werden müssen. Deutlicher werden die Gemeinsamkeiten dieser drei Spielstätten noch, wenn die Kategorisierung nach Draught Rating (DR) vorgenommen wird.

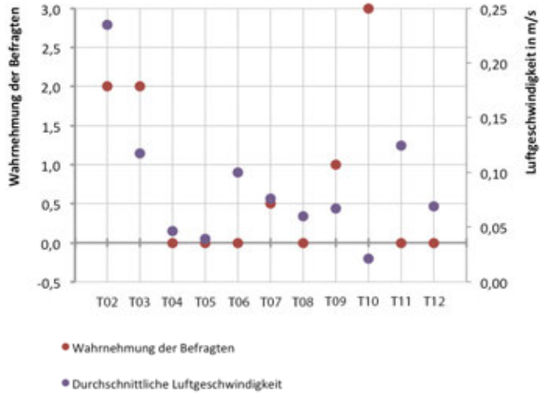

Abb. 182 Mittlere Wahrnehmung der Befragten gegenüber der gemessenen durchschnittlichen Luftgeschwindigkeit während der Vorstellungszeiten

Das Empfinden von Zugerscheinungen ist neben der Luftgeschwindigkeit auch abhängig von der Raumtemperatur. Je höher diese ausfällt, desto geringer ist die Anfälligkeit gegenüber Zugerscheinungen. Da die Lufttemperaturen in den Theaterspielstätten oft sehr hoch sind, werden die Luftgeschwindigkeiten bei Bewertung über die Kategorien nach DIN EN ISO 7730 eher zu schlecht bewertet. Ein besseres Maß ist daher das Draught Rating (DR), das diesen Zusammenhang berücksichtigt. T06, T07 und T11, sind mit Ausnahme von T02, die einzigen Spielstätten, bei der mehr als 3% der Messwerte Kategorie C oder schlechter zugeordnet werden müssen.
Findet nun eine weitere Auseinandersetzung mit der Kategorisierung nach DR statt und stellt man den vorausgesagten Prozentsatz an Menschen, die sich durch Zugluft beeinträchtigt fühlen, dem Anteil an Personen gegenüber, welche die Luftbewegung eher als zugig wahrgenommen haben, so lassen sich zwischen Messwerten und Befragungsergebnissen Parallelen ziehen. In Abhängigkeit der Kategorien ist ein maximaler prozentualer Anteil an Personen, der Beeinträchtigung durch Zugluft empfindet, definiert. Für Kategorie A beträgt dieser Anteil 10%, für B 20% und für C 30%. T10 ist auf Basis der Messwerte in Kategorie A einsortiert und T05 scheitert nur knapp an Kategorie A. Bei beiden Spielstätten ist der Personenanteil, der die Umgebung als eher zugig einordnet, geringer als 10%. Für T03 erfolgte eine Einsortierung in Kategorie B, genauso wie für T12. Während T03 auch bei den Befragungsergebnissen nur einen Anteil an Zugerscheinungen wahrnehmenden Personen unter 20% zeigt, liegt dieser bei T12 mit 21,0% nur knapp über der Grenze dieser Kategorie. T08 und T09 erfüllen zwar noch Kategorie A, liegen aber an der Grenze zu Kategorie B. So ist es zu erklären, dass auch der prozentuale Anteil der Befragten Kategorie B entspricht. T06, T07 und T11 befinden sich im Grenzbereich von Kategorie B zu C. Auch hier ist sichtbar, dass die Befragungsergebnisse 30% knapp überschreiten und somit eher Kategorie C entsprechen. In den Grenzbereichen der Kategorien stimmen die Befragungsergebnisse mit der, auf Basis der Messergebnisse ermittelten, Kategorisierung nicht immer überein, jedoch sind Tendenzen ablesbar.
Aber auch hier bestehen mit T02 und T04 Ausnahmen. Obwohl T02 aus messtechnischer Sicht von allen Spielstätten die schlechtesten Werte aufweist und in Kategorie C einsortiert werden muss, nehmen nur 18,9% der Befragten die Luftbewegung als eher zugig wahr. Zu erwarten wären an dieser Stelle Werte bis zu 30%. In T04 übersteigt der Anteil an Personen, die Zugerscheinungen wahrnehmen, mit 25% die Anforderungen von Kategorie A, welche die objektiven Messergebnisse erfüllen, deutlich. Diese Diskrepanz

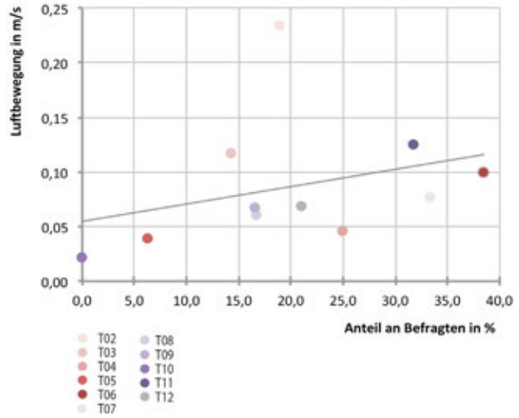

Abb. 183 Durchschnittliche gemessene Luftgeschwindigkeit während der Vorstellungszeiten gegenüber dem Anteil an Befragten, die angegeben haben, Zugerscheinungen wahrzunehmen

zwischen den Mess- und Befragungsergebnissen kann durch den sehr geringen Rücklauf erklärt werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass über alle Spielstätten hinweg keine Wahrnehmung großer Luftbewegungen vorhanden ist. Diese Wahrnehmung wird durch die Gegenüberstellung mit den Messergebnissen bestätigt, da die Theaterspielstätten nach der Berechnung der DR überwiegend in Kategorien A und B eingeordnet werden können.
Eine weitere Differenzierung der Befragung unter einer neutralen Empfindung der Luftbewegung hat sich als nicht zielführend herausgestellt. Hier geben die Befragungsergebnisse im Verhältnis mit den Messwerten keinen weiteren Aufschluss über die Situation. Möglich wäre eine unipolare Skala mit Neutralitätspunkt und eine Abfrage des Maßes des Zugempfindens zur Gewinnung noch spezifischerer Erkenntnisse.

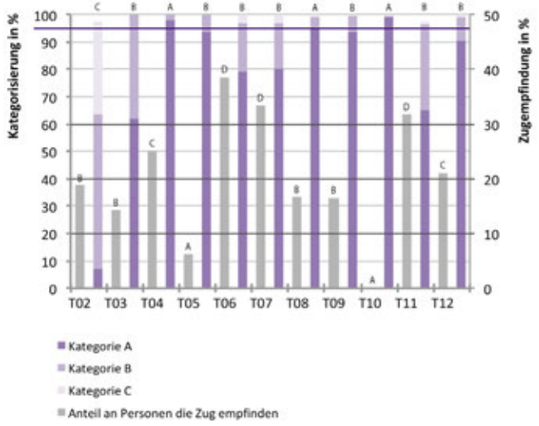

Abb. 184 Kategorisierung der Messwerte gegenüber dem Anteil an Personen, die angegeben haben, Zug zu empfinden

5.7.4 Raumluftqualität

Um die subjektive Wahrnehmung der Raumluftqualität mit den objektiven Messwerten abzugleichen, erfolgte eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Nutzerbefragung mit den Raumkomfortmessungen.
Anhand der Befragungsergebnisse lassen sich die betrachteten Theaterspielstätten in drei Gruppen einteilen. Diese umfassen Theaterspielstätten, in denen die Luft als eher frisch, als neutral und eher als stickig wahrgenommen wurde.
Bei einer Betrachtung der Messergebnisse zeigt sich, dass in Bezug auf die Raumluftqualität in nahezu allen Theaterspielstätten, mit Ausnahme von T11, mindestens Kategorie IDA II (Indoor-Air) erfüllt werden kann. Dennoch sind Abstufungen der Raumluftqualität, beispielsweise über die Schwankungen der CO_2-Konzentration während der Nutzungszeiten sowie der Zuordnung der Messwerte zu den IDA-Kategorien, in den Theaterspielstätten zu beobachten.
Mit einem Median von 1,0 wurde die Luft in T06, T09 und T12 als „eher frisch“ wahrgenommen. Ein Grund für die scheinbar besonders zufriedenstellende Luftqualität könnte die bedarfsabhängige Steuerung der Lüftungsanlage darstellen, sofern die Wahrnehmung und die Messwerte übereinstimmen. Die Streuung der Befragungsergebnisse beträgt für alle drei Spielstätten 1,0 Intervalle zwischen zwei auseinanderliegenden Stufen und ist damit im Vergleich zu den anderen Gruppen eher groß. Folglich herrscht bezüglich der Bewertung der Luftqualität unter den Befragten also durchaus keine einheitliche Meinung, sodass ein geringer Anteil an Personen, der in den drei Häusern maximal 15% beträgt, die Luft eher als stickig empfindet.
Im Falle von T09 sind Wahrnehmung und Messwerte kongruent. Mit einer durchschnittlichen CO_2-Konzentration von 441 ppm während der Vorstellungen weist T09 von allen Spielstätten den geringsten Durchschnittswert auf. Während des Messzeitraums betrug der erfasste Maximalwert lediglich 643 ppm und liegt somit immer noch deutlich unter dem oberen Grenzwert von IDA I. In dieser Theaterspielstätte wird IDA also zu jedem Zeitpunkt eingehalten. Zu Recht wurde die Raumluft durch die Befragten also als frisch wahrgenommen.
Für T06 und T12 lassen sich die guten Bewertungen durch die Nutzer jedoch weder durch die Messwerte noch im Vergleich mit den anderen Spielstätten erklären. T06 liegt mit einer durchschnittlichen CO_2-Konzentration von 645 ppm im Mittelfeld aller betrachteten Spielstätten. Während der Vorstellungen sind 12,7% der Messwerte in IDA II einzuordnen, da diese 800 ppm überschreiten. Im Vergleich erfüllen hier andere Spielstätten höhere Standards. Bei Betrachtung der einzelnen Vorstellungen zeigt sich jedoch, dass gerade bei geringer Auslastung niedrige durchschnittliche CO_2-Konzentrationen in der Raumluft auftreten. Da die Auswertung der Nutzerbefragung nicht nach Vorstellungen getrennt erfolgte, sondern über den gesamten Messzeitraum, ist es möglich, dass die Befragten an einer der gering ausgelasteten Vorstellungen teilnahmen und daher die positiven Befragungsergebnisse zustande kommen. So ließe sich auch die im Verhältnis große Streuung der Befragungsergebnisse erklären. Am stärksten differieren die Messwerte und Ergebnisse der Nutzerbefragung bei T12. Mit 771 ppm wurde in dieser Spielstätte die höchste durchschnittliche und mit 1719 ppm auch die höchste maximale CO_2-Konzentration erfasst. Die Betrachtung der durchschnittlichen CO_2-Konzentration der einzelnen Vorstellungen zeigt bei mittlerer Auslastung ebenfalls Werte, die nur knapp unter der oberen Grenze von IDA I liegen und diese in einigen Fällen auch überschreiten. Wird die Zuordnung der Messwerte zu den Raumluftkategorien betrachtet, zeigt sich, dass 8,0% aller Messwerte 1000 ppm überschreiten und somit nur in IDA III einsortiert werden können. Insgesamt handelt es sich somit um die Spielstätte, in der die geringste Raumluftqualität festgestellt wurde. Hier unterscheiden sich die Messwerte stark von der subjektiven Wahrnehmung der Befragten.

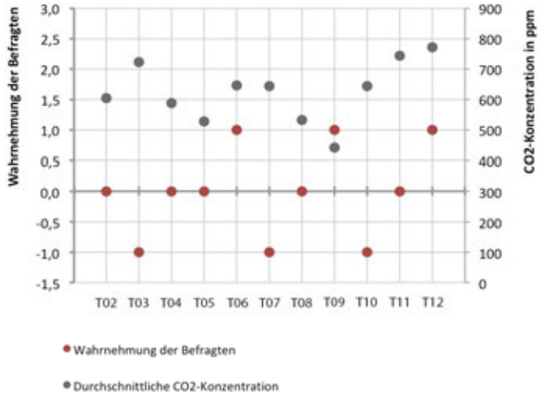

Abb. 185 Mittlere Wahrnehmung der Befragten gegenüber der gemessenen durchschnittlichen CO_2-Konzentration

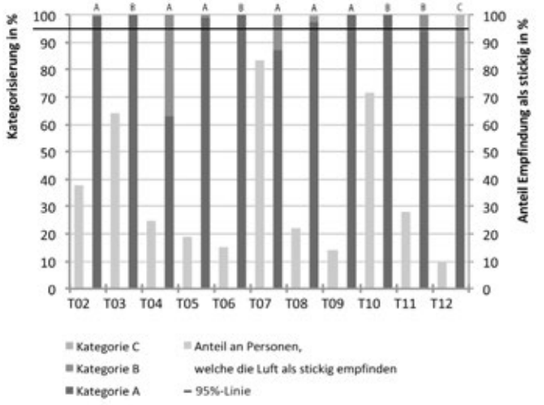

Abb. 186 Kategorisierung der Messwerte gegenüber dem Anteil an Personen, welche die Luft als eher stickig empfanden

In T03, T07 und T10 bewerteten die Besucher die Raumluft mit einem Median von -1,0 als eher stickig, was sich auch in dem hohen Anteil von über 60% der Befragten wiederspiegelt, die diese Empfindung ausdrückten. Diese recht eindeutige Bewertung zeigt sich auch in der Streuung der Befragungsergebnisse. Mit maximal 0,5 Intervallen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen fällt diese deutlich einheitlicher aus als im Fall von T06, T09 und T12, wo die Luft als eher frisch bewertet wurde.
In der Gesamtheit der Befragung gab nur ein geringer Anteil an Personen an, Schwierigkeiten mit Müdigkeit und Konzentration gehabt zu haben und dies als störend zu empfinden. Diese Frage zielte darauf ab, subtil herauszufinden, ob etwaige Schwierigkeiten mit der Raumluftqualität bestehen [siehe Punkt 5.1.1.1]. Auffällig sind hier nur die Ergebnisse der Befragung aus T07, wo über 60% der Befragten mitteilten, in diesem Bereich Schwierigkeiten gehabt zu haben. In dieser Spielstätte sind also möglicherweise hohe CO_2-Konzentrationen zu erwarten.
T07 und T10 zeigen mit 643 ppm die gleiche durchschnittliche CO_2-Konzentration. In beiden Fällen kann ein sehr hoher Anteil an Messwerten in Kategorie I einsortiert werden. Bei T07 beträgt dieser Anteil 97,6%, sodass IDA I erfüllt wird. Bei T10 liegt dieser immer noch bei 94,3%, sodass IDA I nur knapp nicht erfüllt werden kann. In T10 befand sich der Messtorso, im Gegensatz zur Platzierung in den restlichen Spielstätten, in der letzten Reihe des Zuschauersaals. Diese Positionierung bewirkt, dass der Messtorso nicht vollständig von anderen Besuchern umringt ist, was die Messwerte positiv beeinflusst haben könnte. Eine andere mögliche Erklärung besteht darin, dass die mittlere CO_2-Konzentration in T10 vorstellungsabhängig sehr stark variierte, sodass die Durchschnittswerte zwischen 495 ppm bei einer sehr geringen und 835 ppm bei einer vollständigen Auslastung

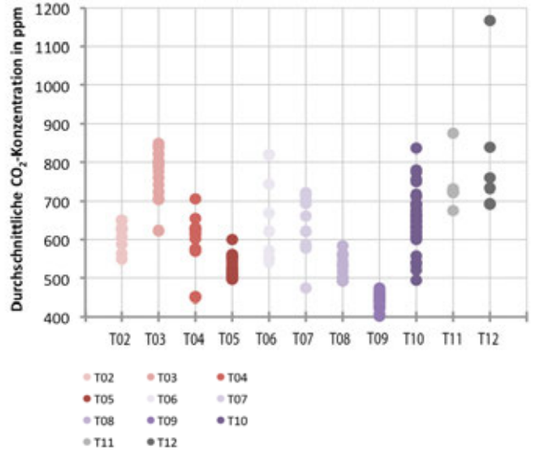

Abb. 187 Durchschnittliche CO_2-Konzentration während einzelner Vorstellungen nach Theaterspielstätten

Abb. 188 Zuschauersaal des Staatstheaters Schwerin

erfasst wurden. Mit einer Korrelation von 0,66 besteht in dieser Spielstätte ein stark linearer Zusammenhang zwischen Auslastung und durchschnittlicher CO_2-Konzentration. Ebenso wie in T10 wurden auch in T07 stark unterschiedliche durchschnittliche CO_2-Konzentrationen während der verschiedenen Vorstellungen festgestellt, die sich zwischen 475 ppm und 720 ppm bewegen. Aufgrund der Ähnlichkeit zwischen den beiden Spielstätten ist zu vermuten, dass die Befragungsergebnisse großteilig aus stark ausgelasteten Vorstellungen stammen.
In T03 ist die Bewertung der Luft als „eher stickig“ durch die Befragten besser nachvollziehbar. Hier werden mit 721 ppm durchschnittlich eher CO_2-Konzentrationen am oberen Grenzbereich von IDA I erfasst. Auch bei Betrachtung der Durchschnittswerte in den einzelnen Vorstellungen zeigen sich im Vergleich zu anderen Spielstätten eher konstant hohe Werte zwischen 624 ppm und 847 ppm. Mit Ausnahme des geringsten Durchschnittswerts von 624 ppm überschreiten alle übrigen Durchschnittswerte 700 ppm deutlich. Im Vergleich zu den anderen Theaterspielstätten sind die Durchschnittswerte somit eher hoch. Dies wird auch bei der Einordnung der Messwerte in die Kategorien sichtbar. Ein großer Anteil mit 37,1% der Messwerte befindet sich in IDA II. Hier weisen die meisten Spielstätten, mit Ausnahme von T11 und T12 höhere Raumluftqualitäten auf.
Mit einem Median von 0,0 wurde die Luftqualität in T02, T04, T05, T08 und T11 als neutral empfunden. Das neutrale Empfinden der Luftqualität ist in Bezug auf die CO_2-Konzentration mit Ausnahme von T11 auch in Gegenüberstellung mit den Messwerten nachvollziehbar. Die Mittelwerte der CO_2-Konzentration variieren hier zwischen 527 ppm in T05 und 743 ppm in T11, wobei die durchschnittliche CO_2-Konzentration von T11, die sich bereits an der oberen Grenze von IDA I bewegt, herausstich und den nächstkleineren Durchschnittswert um mehr als 100 ppm übersteigt. Auch das in dieser Spielstätte gemessene Maximum überschreitet als Einziges die Grenze von 1000 ppm, ab welcher die CO_2-Konzentration als hygienisch auffällig gilt. Hier wäre im Gegensatz zu den anderen Theaterspielstätten eine weniger positive Rückmeldung durch die Nutzer zu erwarten gewesen.
In den verbleibenden vier Spielstätten betrug der Anteil an Personen, welche die Luft als eher stickig wahrgenommen haben, zwischen 18,8% in T05 und 37,8% in T02. Die geringsten Anteile von 18,8% in T05 sowie von 22,0% in T08 spiegeln sich auch in den Messwerten wieder. In beiden Theaterspielstätten ist die Luftqualität besonders hoch und sehr konstant. Während allen Vorstellungen im Messzeitraum liegt die durchschnittliche CO_2-Konzentration unter 600 ppm. Nochmals bestätigt werden die positiven Messergebnisse durch die geringe Streuung. Diese beträgt für T05 nur 0,0 und für T08 0,5 Intervalle zwischen zwei aneinandergrenzenden Bewertungsstufen.
In allen Theaterspielstätten, deren Raumluft als „neutral“ bewertet wurde, wird, wiederum mit Ausnahme von T11, IDA I erfüllt, da die CO_2-Konzentration mindestens zu 95% der Nutzungszeit 800 ppm unterschreitet. In T11, bei der neben T12 die geringste Raumluftqualität festgestellt wurde, wird sogar IDA II nur knapp erreicht.
Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass anhand der Messwerte in nahezu allen Theaterspielstätten eine gute bis sehr gute Raumluftqualität vorliegt. Ebenso waren die Befragungsergebnisse diesbezüglich überwiegend positiv. Nur in drei von elf betrachteten Theaterspielstätten wurde die Raumluft als eher stickig empfunden. Dennoch lässt sich kein objektiver Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung der Raumluftqualität und der durchschnittlichen CO_2-Konzentration ermitteln. Sowohl die Korrelation der mittleren Befragungsergebnisse mit der durchschnittlichen CO_2-Konzentration als auch die Gegenüberstellung der mittleren Befragungsergebnisse mit der Kategorisierung nach IDA zeigte nur einen sehr schwachen linearen Zusammenhang. Da die Raumluftqualität überwiegend hoch bewertet wurde, sind die Unterschiede zwischen den Theaterspielstätten zu gering, um sich durch die Skala des Nutzerfragebogens tatsächlich abbilden zu lassen.

5.8 Herleitung des Raumtyps „Theatersaal“

5.8.1 Notwendigkeit der Kategorisierung eines Raumtyps für Theatersäle

Die Gegenüberstellung der Messergebnisse mit den Befragungsergebnissen hat gezeigt, dass eine Diskrepanz zwischen der Bewertung der Lufttemperaturen nach den genormten Raumtypen und den geäußerten Empfindungen der Zuschauer besteht. Die Bewertung der gemessen mittleren Lufttemperaturen lässt eine Empfindung der thermischen Umgebung als eher „etwas warm“ erwarten, da sie sich während der Vorstellungen im Rahmen von 23,32°C in T04 und 25,31°C in T03 bewegen und den für diesen Raumtypen definierten thermischen Neutralitätspunkt von 22°C um 1,32K bis 2,31K überschreiten. Erfolgt eine Berechnung der PMVs auf Basis der in [5.5.1.2] beschriebenen Kriterien sowie der Durchschnittstemperaturen, so liegen diese zwischen 0,32 in T04 und 0,75 in T03.

Darüber hinaus wurden die gemessenen Temperaturen in vielen Theaterspielstätten in Kategorie III, welche nur mäßige Erwartungen erfüllen kann und sogar in Kategorie IV, die gar keine Erwartungen zufriedenstellt, eingeordnet. Entgegen dieser Erwartung zeigen die Befragungsergebnisse jedoch tendenziell eine geringere Empfindung der thermischen Umgebung. In den meisten Theaterspielstätten, insbesondere bei Vorliegen eines hohen Rücklaufs der Fragebögen, liegt der Median bei 0. Dies zeigt, dass die meisten Zuschauer das Raumklima trotz hoher Durchschnittstemperaturen eher als thermisch neutral bewerten. Ebenfalls sichtbar wird dies anhand der prozentualen Zuordnung der Befragungsergebnisse aus allen Theaterspielstätten nach der 7-stufigen Bewertungsskala [siehe 5.6.1]. Mit 46,7% bewerteten die meisten Zuschauer die Umgebung als thermisch neutral, während 35,7% diese tendenziell als „eher warm“ und nur 17,6% diese als „eher kalt“ empfanden.

Diese Verteilung entspricht einem durchschnittlichen

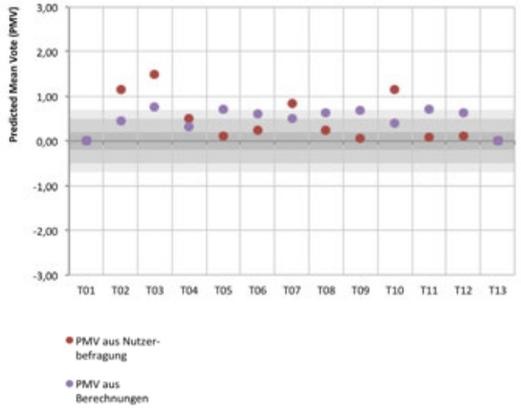

Abb. 189 PMVs aus Berechnungen auf Basis der Durchschnittstemperaturen während der Vorstellungen und der Nutzerbefragung

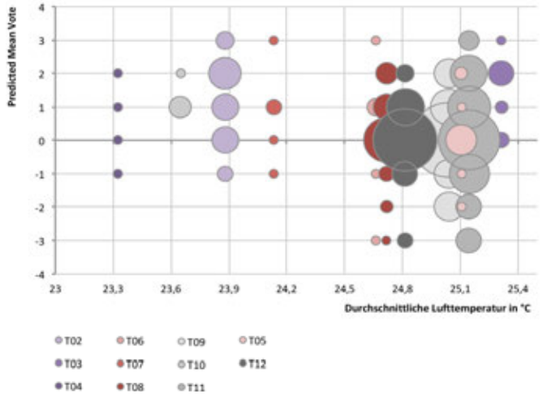

Abb. 190 Befragungsergebnisse zur empfundenen Lufttemperatur über den PMV in Abhängigkeit der durchschnittlichen Lufttemperaturen während der Vorstellungen

PMV von 0,26. Betrachtet man nun die gemessene Durchschnittstemperatur über alle Theatersäle, so beträgt diese 24,86°C, was einem berechneten PMV von 0,64 entspricht. Während die Tendenz der subjektiven Befragung also eher auf ein neutrales thermisches Empfinden hindeutet, lässt die objektive Berechnung dieses eher als „etwas warm“ erwarten. Die Diskrepanz zwischen den subjektiven Befragungsergebnissen gegenüber den objektiven Messergebnissen wirft die Frage auf, ob die Parameter des Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersäle“ für die Bewertung des Raumklimas von Zuschauersälen in Theaterspielstätten anwendbar ist oder ob eine Anpassung erfolgen sollte.[32],[36]

Literatur:
[32] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2006)
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012b)

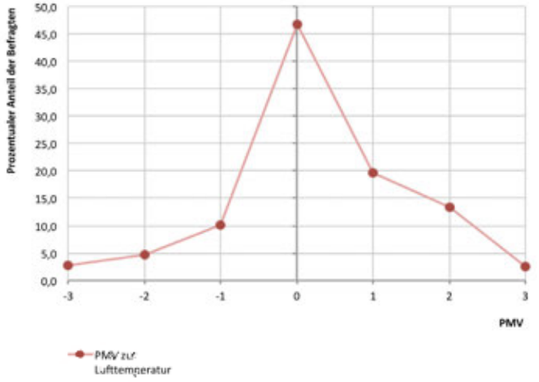

Abb. 191 Prozentuale Verteilung der Befragungsergebnisse zur thermischen Umgebung

5.8.2 Definition

Bei dem vorhandenen Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersäle“ wird ein Aktivitätsgrad von 1,2 met angesetzt, was mit einer sitzenden Tätigkeit übereinstimmt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein Theaterbesuch körperlich weniger anstrengend ist, sodass ein verminderter Energieumsatz von 1,0 met angesetzt werden kann, welcher einer sitzenden, entspannten Tätigkeit entspricht. Hinweise hierzu finden sich auch in der Schweizer Normung SIA 382/1 „Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen“, welche für eine ruhig sitzende Tätigkeit als typischen Anwendungsbereich unter anderem das Theater nennt. Geringere Energieumsätze führen zu einer verminderten Wärmeproduktion des Menschen, sodass zur Herstellung der thermischen Neutralität eine höhere Wärmezufuhr durch die Umgebung notwendig ist. Folglich müssen neue Temperaturgrenzen zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit definiert werden.

Das „BNB-Tool Thermischer Komfort“, das vom Fraunhofer IBP entwickelt wurde, beinhaltet ein PMV Werkzeug. Dieses ermöglicht sowohl die Berechnung des PMVs bei Vorliegen aller Eingangsparameter zum Umgebungsklima als auch die Bestimmung einer operativen Temperatur aus einem vorgegebenen PMV.

Zunächst wurden mithilfe des Tools die Kategorien aus der Norm nachvollzogen. Hierbei wurde deutlich, dass die operativen Temperatur, die dem Neutralitätspunkt zugeordnet ist, sowie die zulässigen Abweichungen in Abhängigkeit der Komfortstandards jeweils gerundet wurden, um ein gut anwendbares Schema zu generieren.

Anschließend wurden die Temperaturgrenzen für einen von 1,2 met auf 1,0 met verringerten Aktivitätsgrad ermittelt. Die Berechnungen mit dem „BNB-Tool Thermischer Komfort“ ergaben einen Neutralitätspunkt von 23,6°C. Die Temperaturbereiche bewegen sich für Kategorie I 0,7 K, für Kategorie II

Gebäude-/ Raumtyp	Kategorie	PPD %	PMV	Operative Temperatur °C Winter (Heizperiode)
Zuschauersäle in Theaterspiel-stätten	I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2	23,5 ± 0,5
	II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5	23,5 ± 1,0
	III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7	23,5 ± 2,5
	IV	≥ 15	PMV < -0,7 / PMV > +0,7	< 21 / > 26

Abb. 192 Ermittelte Kategorien zur Auslegung der thermischen Gesamtbehaglichkeit für den Raumtypen „Zuschauersäle in Theaterspielstätten“ nach DIN EN ISO 7730 [32]

1,9 K und für Kategorie III 2,6 K um den thermischen Neutralitätspunkt.
Um auch hier ein gut anwendbares Schema zu erstellen, erfolgte in Anlehnung an die DIN eine Rundung der Zahlen. Dadurch wurde der thermische Neutralitätspunkt mit 23,5°C definiert. Die Temperaturbereiche gruppieren sich für Kategorie I mit 0,5 K, für Kategorie II mit 2,0 K und für Kategorie III mit 2,5 K um den thermischen Neutralitätspunkt.
Stellt man den neuen Raumtypen „Zuschauersäle in Theaterspielstätten“ dem Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersäle“ gegenüber, wird deutlich, dass höhere operative Temperaturen, bedingt durch die verringerte Aktivität, eher toleriert werden. Der thermische Neutralitätspunkt, welcher vorher mit 22°C definiert war, liegt nun bei 23,5°C und zeigt somit eine Verschiebung um 1,5 K nach oben. Auch die oberste Temperaturgrenze von Kategorie III wurde von 25°C auf 26°C erweitert.
Um einen Hinweis darauf zu erhalten, ob die neue Kategorisierung der Theaterspielstätten die Erwartungen der Zuschauer an den Raumkomfort abbilden kann, erfolgt eine erneute Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der Nutzerbefragung. Die Nutzerbefragung ergab einen durchschnittlichen PMV von 0,26 bei einer mittleren Lufttemperatur von 24,86°C. Legt man die durchschnittliche Lufttemperatur zu Grunde und berechnet für die Parameter des neuen Raumtypen „Theatersaal“ den PMV, so liegt dieser bei 0,34. Während der PMV aus der Nutzerbefragung gegenüber dem Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersäle“ um 60,0% geringer ist, liegt dieser im Verhältnis zum PMV des neuen Raumtypen „Theatersaal“ lediglich 23,5% darunter. Da der PMV den Ergebnissen der Nutzerbefragungen eher entspricht, kann geschlussfolgert werden, dass der neue Raumtyp dem thermischen Empfinden der Zuschauer eher entspricht.
Die Diskrepanz zwischen der subjektiven Bewertung des thermischen Komforts durch die Nutzerbefragung

5.8.3 Einordnung der Messergebnisse

und den objektiven Messergebnissen kann folglich durch die Anwendung eines zu hohen Aktivitätsgrads für den Gebäudetypus „Theaterspielstätte“ erklärt werden: Die Anwendung des Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersäle“ führt zu einer Überbewertung zu hoher Temperaturen im Zuschauersaal.
Zur weiteren Verifizierung des Raumtypus „Theatersäle“ wäre eine Gegenüberstellung von Messwerten mit einer Nutzerbefragung in einem größeren Stichprobenumfang wünschenswert.[32],[36],[44],[117]

Literatur:
[32] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2006)
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012b)
[44] Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP (2013)
[117] Zürcher, C., Frank, T. (2010)

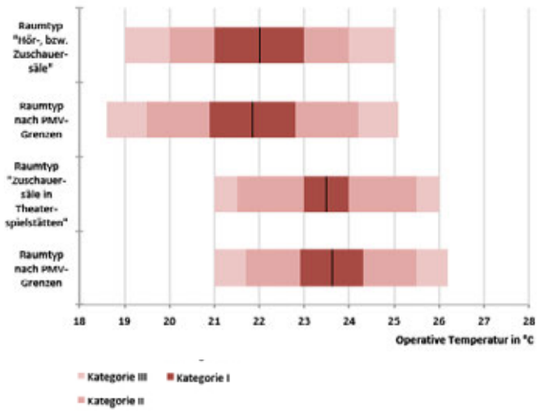

Abb. 193 Komfortbereiche und Lage der thermischen Neutralitätspunkte der Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersaal“ und „Zuschauersäle in Theaterspielstätten“

Die Bewertung der Messwerte zur Lufttemperatur anhand des Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersäle“ hat gezeigt, dass diese zu einem großen zeitlichen Anteil keiner Kategorie zugeordnet werden konnten. Aufgrund der hohen Lufttemperaturen in den Zuschauersälen übersteigen diese oftmals die oberen Temperaturgrenzen der jeweiligen Kategorien. Durch die Anpassung der Temperaturgrenzen durch Annahme eines niedrigeren Tätigkeitsgrads ist zu erwarten, dass bei Kategorisierung der Messwerte mithilfe des Raumtypens „Theatersaal“ nun ein deutlich höherer Anteil innerhalb der Behaglichkeitsgrenzen der Kategorien liegt.
Die Neubewertung der Messwerte führt dazu, dass während der Vorstellungszeiten zwischen 56,6% für T03 und 100% in T02 sowie T10 mindestens Kategorie II erreicht und somit ein normales Maß an Erwartungen bezüglich des Raumkomforts erfüllt werden kann. Kategorie III, welche ein annehmbares, moderates Maß an Erwartungen beschreibt, wird dann im Messzeitraum zwischen 73,7% der Zeit in T03 und 100% in T02, T08 und T10 erreicht.
Im Gegensatz dazu zeigte die Bewertung anhand des Raumtyps „Hör-, bzw. Zuschauersäle“ nur eine Erfüllung von mindestens Kategorie II zwischen 2,0% in T03 und 80,5% in T02. Immerhin in Kategorie III einordnen ließ sich dagegen ein zeitlicher Anteil zwischen 31,8% in T05 und 100% in T02 sowie T10. Die Gegenüberstellung der beiden Raumtypen zeigt wie vermutet, dass bei Kategorisierung nach dem Raumtyp „Theatersaal“ ein höherer Erfüllungsgrad gegeben ist.
Betrachtet man die prozentuale Verteilung der Messwerte auf die vier Kategorien, so bilden sich auch bei der Einordnung in den neuen Raumtypen mehrere Gruppen heraus. Die erste Gruppe enthält T02 und T10. Beide Spielstätten zeigen überwiegend die Erfüllung eines hohen Maßes an Erwartungen, da mindestens zwei Drittel der Messwerte im Temperaturbereich von Kategorie I liegen. Die restlichen Messwerte lassen sich Kategorie II zuordnen. In der zweiten Gruppe werden

mit T04, T07 und T08 Spielstätten zusammengefasst, bei denen der größte Anteil der Messwerte mit etwa zwei Drittel im Bereich von Kategorie II liegt. Nur ein geringer Anteil der Werte von ca. 10% ist Kategorie III zuzuordnen. Die dritte Gruppe umfasst T01 und T12. Hier liegen über 80% der Messwerte im Bereich von Kategorie I und II. Die restlichen Messwerte verteilen sich auf Kategorie III oder liegen außerhalb der Kategorien. Spielstätten in der vierten Gruppe, zu denen T05 und T09 zählen, weisen eine ähnliche Verteilung auf wie bei der vorangegangenen Gruppe, nur sind in diesem Fall lediglich ein Viertel der Messwerte den Kategorien I und II zuzuordnen. Ein sehr geringer Anteil der Messwerte erfüllt keine Kategorie. In T03 und T11, welche der letzten Gruppe zuzuordnen sind, zeigt sich der geringste Komfort. Nur knapp über die Hälfte der Zeit erfüllen die Messwerte mindestens Kategorie II und werden damit einem normalen Maß an Erwartungen [siehe 5.5.1.2] gerecht. Über 10% der Messwerte sind jeweils in Kategorie III einzuordnen oder liegen außerhalb der Grenzbereiche der Kategorien.

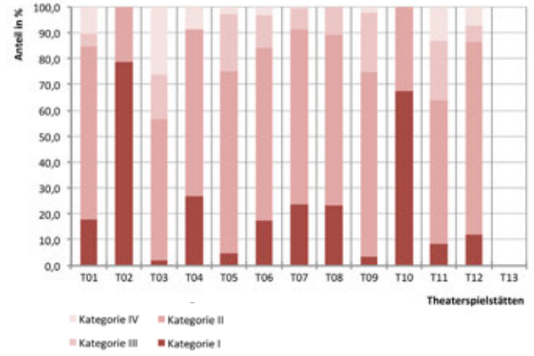

Abb. 194 Prozentuale Einordnung der Messwerte in die Behaglichkeitskategorien nach Raumtyp „Theatersaal“

6. Nutzungsprofil der Theaterspielstätten

6.1 Nutzungsprofile nach DIN V 18599

Zum Vergleich der energetischen Qualität von Gebäuden werden für diese gemäß der geltenden EnEV Energieausweise erstellt. Ein Verfahren zur Berechnung des Energiebedarfs für Nichtwohngebäude ist in der DIN V 18599 ausführlich beschrieben. Da die Nutzung eines Gebäudes dessen Nutz- und Endenergieverbrauch maßgeblich beeinflusst, werden zur Berechnung unterschiedliche Nutzungsprofile angesetzt, die in der DIN V 18599 für 41 typische Nutzungen beschrieben sind. Lässt sich ein in der DIN enthaltenes Nutzungsprofil auf die Nutzung des Gebäudes, bzw. eines Gebäudebereichs, anwenden, so muss dieses für Berechnungen, die mit Ziel der Erstellung eines öffentlich-rechtlichen Nachweises ausgeführt werden, angesetzt werden. Sollte eine sichtbare Abweichung der tatsächlich beobachteten Nutzung zum Nutzungsprofil bestehen, beispielsweise in Bezug auf die Nutzungszeiten, so muss dennoch im Sinne der Vergleichbarkeit das standardisierte Profil angewendet werden. Sofern die Energieberechnung im Rahmen einer Energieberatung mit dem Ziel erfolgt, eine Reduzierung des Energieverbrauchs herbeizuführen, so darf eine Anpassung an den individuellen Fall vorgenommen werden, wie es beispielsweise das Werkzeug TEK-Tool vorsieht. Besteht in der DIN V 18599 für eine Nutzung kein Nutzungsprofil, so wird entweder die Nutzung „Nr. 17 Sonstige Aufenthaltsräume“ verwendet oder auf Basis einer Analyse der Nutzung ein neues individuelles Nutzungsprofil bestimmt.

Die Kernbereiche einer Theaterspielstätte bilden der Zuschauersaal, die Bühne und das Foyer. Für diese Nutzungsbereiche sind in der Norm die Nutzungsprofile „Nr. 23 Zuschauerbereich – Theater und Veranstaltungsbauten“, „Nr. 24 Theater-Foyer“ und „Nr. 25 Bühne – Theater und Veranstaltungsbauten“ vorgesehen. Um Unterschiede zwischen den Nutzungsprofilen aus der Norm und den im Rahmen des Forschungsprojekts erhobenen Daten für die Berechnungen mit TEK-Tool feststellen zu können, erfolgt in einem späteren Schritt eine Gegenüberstellung. Sollten durchgängig charakteristische Unterschiede für die untersuchten Theaterspielstätten auftreten, so deutet dies gegebenenfalls auf einen Anpassungsbedarf der

Nutzung:

Nutzungszeiten		von	bis
tägliche Nutzungszeit	Uhr		
jährliche Nutzungstage $d_{nutz,a}$	d/a		
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit t_{Tag}	h/a		
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit t_{Nacht}	h/a		
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung	Uhr		
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung $d_{op,a}$	d/a		
tägliche Betriebszeit Heizung	Uhr		
Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)			
Raum-Solltemperatur Heizung $\theta_{i,h,soll}$	°C		
Raum-Solltemperatur Kühlung $\theta_{i,c,soll}$	°C		
Minimaltemperatur Auslegung Heizung $\theta_{i,h,min}$	°C		
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung $\theta_{i,c,max}$	°C		
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb $\Delta\theta_{i,NA}$	K		
Feuchteanforderung	–		
Mindestaußenluftvolumenstrom $\dot{V}_A$			
flächenbezogen	$m^3/(h \cdot m^2)$		
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude $\dot{V}_{A,Geb}$	$m^3/(h \cdot m^2)$		
relative Abwesenheit RLT c_{RLT}	–		
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit F_{RLT}	–		
Beleuchtung			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke $\bar{E}_m$	lx		
Höhe der Nutzebene h_{Ne}	m		
Minderungsfaktor k_A	–		
relative Abwesenheit C_A	–		
Raumindex k	–		
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit F_t	–		
Anpassungsfaktor Beleuchtung vertikaler Flächen k_{VB}	–		
Personenbelegung			
maximale Belegungsdichte	m^2 je Person		
Interne Wärmequellen			
Personen q_{Lp}	$Wh/(m^2 \cdot d)$		
Arbeitshilfen $q_{l,fac}$	$Wh/(m^2 \cdot d)$		
Wärmezufuhr je Tag $(q_{Lp} + q_{l,fac})$	$Wh/(m^2 \cdot d)$		
Automationsgrad			
Summand Automation $\Delta\theta_{EMS}$	K		
Faktor für adaptive Temperaturführung f_{adapt}	–		
Erläuterungen:			

Abb. 195 Formblatt zur Dokumentation von Nutzungsradbedingungen nach DIN V 18599-10 [34]

Nutzungsprofile hin.
Die Nutzungsrandbedingungen in der Norm enthalten für die einzelnen Nutzungen Angaben zu den Nutzungszeiten, den Raumkonditionen, der Lüftung über den Mindestaußenluftvolumenstrom sowie dem Luftwechsel, der Beleuchtung und den internen Wärmequellen.
Unter dem Punkt Nutzungszeiten sind tägliche Nutzungszeiten aufgeführt, die über die Anwesenheit von Personen oder den Betrieb der Einrichtung abgeleitet werden können. Anhand derer lassen sich auch über Sonnenauf- und -untergangszeiten die jährlichen Nutzungsstunden zur Tages- und Nachtzeit berechnen, die einen Einfluss auf den Energiebedarf für künstliche Beleuchtung ausüben. Weiterhin relevant sind die Nutzungstage im Jahr, die hauptsächlich über die Unterscheidung zwischen einer 5-, 6- oder 7-Tage Woche definiert werden. Sofern feste Ferienzeiten bestehen, wie es bei Theaterspielstätten durch die sechswöchige Spielpause im Sommer der Fall ist, können diese berücksichtigt werden. Ebenfalls beschrieben werden unter diesem Punkt die Betriebszeiten der technischen Anlagen wie der RLT, der Heizung und der Kühlung. Liegen keine anderen Angaben vor, so werden diese mit einem Vorlauf von zwei Stunden gegenüber der täglichen Nutzungszeit betrieben.
Als Anhaltspunkte für ein behagliches Raumklima in dem jeweiligen Nutzungsbereich sind unter dem Punkt Raumkonditionen Raum-Solltemperaturen sowie Auslegungstemperaturen für den Heiz- und Kühlfall angegeben. Die Auslegungstemperaturen stimmen für den jeweiligen Nutzungstypen mit den unteren Behaglichkeitsgrenzen der Kategorie II, also einem normalen Maß an Erwartungen an das Raumklima, für den Heizfall und der oberen Grenze für den Kühlfall aus der DIN EN 15251 überein. Die Sollwerte, die als anzustrebende Monatsmitteltemperaturen im Raum zu verstehen sind, orientieren sich am unteren Bereich der Kategorie I des Innenraumklimas.Als Eingangsparameter für die Lüftung und damit für die Höhe der Lüftungswärmeverluste relevant, werden personen- und flächenbezogene Mindestaußenluftvolumenströme angegeben. Die in der Norm zugrunde gelegten Luftvolumina beruhen auf einem hygienisch notwendigen Luftwechsel, der zur Erreichung einer mittleren Raumluftqualität erforderlich ist. Die angegebenen Außenluftvolumenströme pro Person werden üblicherweise in Abhängigkeit des Tätigkeitsgrads auf 40 bis 60 m^3 festgesetzt. Hierbei gilt, je geringer der Tätigkeitsgrad, desto geringer die biologischen Ausdünstungen durch den Nutzer, welche mittels Lüftung abgeführt werden müssen.
Für die Beleuchtung wird vor allem der Wartungswert der Beleuchtungsstärke angegeben sowie weitere Faktoren die zur Ermittlung der erforderlichen Leuchtenanzahl benötigt werden. Über die Anzahl der Leuchten und deren Anschlussleistung kann in Kombination mit der Nutzungszeit der Endenergiebedarf für die Beleuchtung berechnet werden.
Der Punkt interne Wärmequellen beinhaltet Angaben zur Wärmeabgabe durch Personen und Arbeitshilfen. Die Wärmeabgabe durch Personen wird durch den menschlichen Stoffwechsel beeinflusst und wird daher in Abhängigkeit des Tätigkeitsgrads angesetzt. Üblicherweise beträgt diese in der Norm 70W und entspricht somit einer sitzenden Tätigkeit. Da die Angabe der Wärmeabgabe durch Personen pro Tag und Fläche erfolgt, müssen sowohl die Vollnutzungsstunden während der täglichen Nutzungszeit als auch die pro Person zur Verfügung stehende Fläche, aufgeführt unter dem Punkt Personenbelegung, berücksichtigt werden.
In Abhängigkeit der Nutzungsart steht pro Person eine bestimmte Fläche zur Verfügung. Je geringer die maximale Belegungsdichte, desto mehr Fläche pro Person ist vorhanden und desto geringer ist der Wärmeeintrag durch Personen pro Quadratmeter. Während die Wärmeabgabe durch Personen in Theaterspielstätten eine große Rolle spielt, kann diese für Arbeitshilfen bei den drei relevanten Nutzungsprofilen vernachlässigt werden.[35],[36],[80],[91],[93],[116]

Literatur:
[35] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012a)
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012b)
[80] Maas, A. (2013)
[91] Schild, K., Brück, H. (2010)
[93] Schmidt Reuter (2009)
[116] Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (2009)

6.2. Gegenüberstellung des Nutzungsprofils nach DIN mit den erhobenen Daten

6.2.1. Nr. 23 Zuschauerbereich – Theater und Veranstaltungsbauten

Die Angaben zur Nutzung der betrachteten Theaterspielstätten, die im Folgenden den Nutzungsrandbedingungen „Nr. 23 Zuschauerbereich – Theater und Veranstaltungsbauten“ gegenübergestellt werden, wurden über die „Fragebögen zur Haustechnik“ [siehe 4.2.2.] ermittelt und während den Begehungen zur Aufnahme der TEK-Tool-Daten ergänzt. Da bei der Datenabfrage eine Beschränkung auf die zur TEK-Tool-Eingabe relevanten Informationen erfolgte, kann nicht für alle in den Nutzungsrandbedingungen nach DIN V 18599-10 aufgeführten Daten ein Abgleich vorgenommen werden.
Zunächst wurden die Nutzungszeiten der Zuschauersäle betrachtet. Am häufigsten wurde die Nutzungszeit mit 19.00 bis 23.00 Uhr in sechs Spielstätten angegeben. Dies entspricht einer Dauer von 4h an Nutzungstagen und stimmt mit den Angaben aus den Nutzungsrandbedingungen überein. Abweichend wurde in drei Theaterspielstätten mit Nutzungszeiten von 19.00 bis 22.00 Uhr eine kleinere und in zwei Theaterspielstätten von 18.00 bis 23.00 Uhr eine größere Zeitspanne festgestellt. Besonders hoch war die Nutzungszeitspanne mit 6h in T01 und T04. Hier wurde ein Nutzungszeitraum von 17.00 bis 23.00 Uhr ermittelt.
Eine Ermittlung der jährlichen Nutzungstage erfolgte über die Multiplikation der wöchentlichen Nutzungstage mit den jährlichen Nutzungswochen. Die Aufnahme der Nutzungstage pro Woche zeigt Werte zwischen 3 Tagen in T02 und 7 Tagen in T04, T11 und T13. Es ergibt sich ein Mittelwert von 5 Nutzungstagen pro Woche. Um an dieser Stelle nicht auf die Angaben der Theaterspielstätten angewiesen zu sein, wäre eine weiterführende Analyse der Spielpläne möglich, die jedoch im Rahmen des Projekts nicht durchgeführt werden konnte. Die Nutzungswochen betragen zwischen 37 in T04 und 48 in T05. Die unterschiedlichen Angaben sind hier auf verschiedene Nutzungssituationen zurückzuführen. Bei T05 handelt es sich um eine Theaterspielstätte im EnSuite-

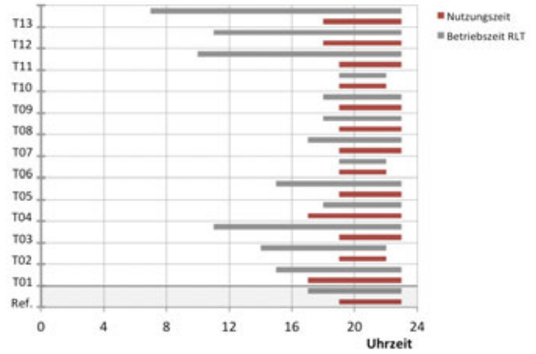

Abb. 196 Nutzungs- und Betriebszeiten der RLT-Anlagen für den Zuschauerbereich

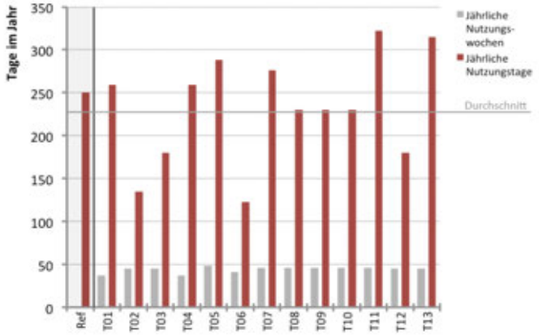

Abb. 197 Jährlichen Nutzungswochen und -tage für den Zuschauerbereich

Spielbetrieb. Da nur während eines Stückwechsels eine Unterbrechung des Spielbetriebs stattfindet, beträgt die spielfreie Zeit im Jahr nur etwa vier Wochen. Betrachtet man den Modus, so liegt dieser bei 46 Nutzungswochen. Dies zeigt den Einbezug der Theaterferien, die sich an der Dauer der sommerlichen Schulferien orientieren und somit sechs Wochen betragen. Aufgrund der variierenden Angaben bei Nutzungstagen und –Wochen ergeben sich zwischen 123 in T06 und 322 Nutzungstage jährlich in T11. Der berechnete Mittelwert von 234 Nutzungstagen liegt 17 Tage unter der Annahme von 250 Nutzungstagen aus den Nutzungsrandbedingungen. In diesen wird von einer 5-tägigen Nutzung pro Woche über 50 Wochen im Jahr ausgegangen. Die festen Theaterferien in öffentlich geförderten Theaterspielstätten über die Dauer von 6 Wochen, wurden bisher nicht berücksichtigt. Es wird daher empfohlen, zwar weiterhin von 5 Nutzungstagen pro Woche auszugehen, die jährlichen Nutzungswochen aber auf 46 zu reduzieren, sodass sich insgesamt 230 jährliche Nutzungstage ergeben.

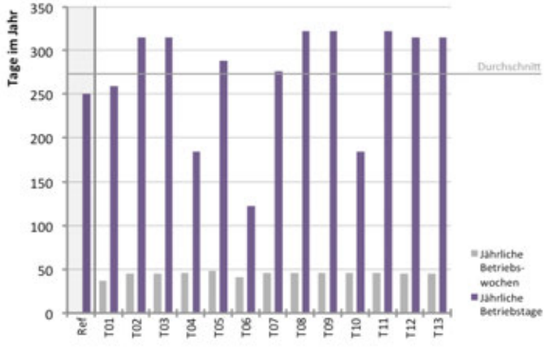

Abb. 198 Jährlichen Betriebswochen und –Tage der RLT-Anlage für den Zuschauerbereich

Eine Unterscheidung zwischen Nutzungsstunden in der Tag- und Nachtzeit ist für Zuschauersäle nicht von großer Bedeutung, da es sich bei diesen meist um fensterlose Räume handelt und somit eine tageszeitunabhängige Kunstlichtnutzung erfolgt. Eine weitere Betrachtung erfolgt daher nicht.

Neben den Nutzungszeiten wurden auch die Betriebszeiten der RLT betrachtet. Die Analyse der täglichen Betriebsstunden zeigt, dass sich diese entweder an den Nutzungszeiten orientieren oder diese deutlich überschreiten und die Lüftungsanlage während des gesamten Arbeitstags aktiv ist. Theaterspielstätten, bei denen sich die Laufzeiten der RLT an den Nutzungszeiten orientieren, haben eine maximale Vorlaufzeit von 2h. Während des gesamten Arbeitstags betriebene RLT Anlagen zeigen dagegen Laufzeiten von mindestens 8h. Ein ähnliches Bild wird bei Betrachtung der Betriebstage pro Woche sichtbar. Auch hier lassen sich Spielstätten unterscheiden, die zum einen einen regelmäßigen Betrieb in Abhängigkeit zur Nutzung zeigen und zum anderen eine durchgängige wöchentliche Nutzung aufweisen. Sofern ein Betrieb in Abhängigkeit zu den Nutzungszeiten bereits in Bezug auf die täglichen Betriebsstunden festgestellt wurde, so stimmt dieser in den meisten Fällen auch bei den wöchentlichen Nutzungstagen überein. Eine vollständige Deckungsgleichheit besteht dagegen bei den jährlichen Betriebswochen der RLT und den jährlichen Nutzungswochen. Insgesamt liegen die jährlichen Betriebstage zwischen 123 Tagen in T06 und 322 in T11. Der Durchschnitt in Höhe von 271 Betriebstagen liegt über den in den Nutzungsrandbedingungen angesetzten Betriebstagen von 250. Aufgrund der stark unterschiedlichen Betriebszeiten der RLT kann keine Anpassungsempfehlung gegeben werden.

Die in die Nutzungsrandbedingungen aufgenommenen Raumkonditionen orientieren sich an den Raumtypen aus der DIN EN 15251. Die Raum-Solltemperatur von 21°C im Heizfall ergibt sich aus dem Mindestwert für die

Zuschauerbereich **Theater und Veranstaltungsbauten**				**Nr. 23**
Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit		Uhr	19:00	23:00
jährliche Nutzungstage $d_{nutz,a}$		d/a	250	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit t_{Tag}		h/a	59	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit t_{Nacht}		h/a	941	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung		Uhr	17:00	23:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung $d_{op,a}$		d/a	250	
tägliche Betriebszeit Heizung		Uhr	17:00	23:00
Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)				
Raum-Solltemperatur Heizung $\theta_{i,h,soll}$		°C	21	
Raum-Solltemperatur Kühlung $\theta_{i,c,soll}$		°C	24	
Minimaltemperatur Auslegung Heizung $\theta_{i,h,min}$		°C	20	
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung $\theta_{i,c,max}$		°C	26	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb $\Delta\theta_{i,NA}$		K	4	
Feuchteanforderung		-	mit Toleranz	
Mindestaußenluftvolumenstrom $\dot{V}_A$				
personenbezogen		m^3 je Stunde und Person	30	
flächenbezogen		$m^3/(h \cdot m^2)$	40	
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude $\dot{V}_{AGeb}$		$m^3/(h \cdot m^2)$	5	
relative Abwesenheit RLT c_{RLT}		-	0,7	
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit F_{RLT}		-	1	
mech. Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel (Praxis)			von	bis
Luftwechsel		h^{-1}	4	4,5
Beleuchtung				
Wartungswert der Beleuchtungsstärke $\bar{E}_m$		lx	200	
Höhe der Nutzebene h_{Ne}		m	0,8	
Minderungsfaktor k_A		-	0,97	
relative Abwesenheit C_A		-	0	
Raumindex k		-	4	
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit F_t		-	1	
Anpassungsfaktor Beleuchtung vertikaler Flächen k_{VB}		-	1	
Personenbelegung			gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte		m^2 je Person	1,5	0,75	0,5
Interne Wärmequellen		Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m^2) tief	mittel	hoch
Personen (70 W je Person)		2	47	93	140
Arbeitshilfen		-	-	-	-
Wärmezufuhr je Tag ($q_{l,p} + q_{l,fac}$)		$Wh/(m^2 \cdot d)$	93	187	280
Automationsgrad		D	C	B	A
Summand Automation $\Delta\theta_{EMS}$	K	0	0	−0,5	−1
Faktor für adaptive Temperaturführung f_{adapt}	-	1	1	1,35	1,35

Abb. 199 Nutzungsrandbedingungen für das Nutzungsprofil Nr.23 Zuschauerbereich nach DIN V 18599-10 [34]

Operative Temperatur für Kategorie I. Im Vergleich hierzu wurde festgestellt, dass in den meisten Spielstätten abweichend eine Regelung auf 22°C erfolgt, welche an den Neutralitätspunkt für diesen Raumtypus angelehnt ist. Durch diese Abweichung zwischen der Annahme aus der Norm und der tatsächlichen Auslegung kann eine Abweichung zwischen berechnetem Energiebedarf für die Beheizung und dem tatsächlichen Energieverbrauch entstehen.

Im Zuge der TEK-Tool Erhebungen wurden keine Angaben zum Luftwechsel gemacht. Diese können nur über die Eigenschaften der jeweiligen Lüftungsanlagen abgeleitet werden. Zunächst erfolgte eine Überprüfung, ob die vorhandenen Lüftungsanlagen dazu geeignet sind, die nach Norm definierten Luftvolumina zu fördern. Die maximalen Förderleistungen der Lüftungsanlagen liegen zwischen 8500 m^3/h in T13 und 80.000 m^3/h in T05. Im Verhältnis zur maximalen Zuschauerkapazität ergeben sich personenbezogene Werte zwischen 14 m^3/h in T02 und 59 m^3/h in T01. Nach Norm sollte der Mindestaußenluftvolumenstrom 30 m^3 je Stunde und Person betragen. Gegenüber diesem Wert kann in T02 nur 46,3% des Volumenstroms gedeckt werden, wohingegen in T01 195,3% gefördert werden können. Neben T02 sind auch T08, T10 und T13 im Verhältnis zum Vergleichswert bezüglich des Außenluftvolumens limitiert.

Zusätzlich zu personenbezogenen Werten werden in der Norm auch flächenbezogene Werte angegeben, sodass die Förderleistungen der Anlagen auch auf die Fläche des Zuschauersaals bezogen werden. So ergeben sich Werte zwischen 22 $m^3/(h*m^2)$ in T02 und 95 $m^3/(h*m^2)$ in T04. Im Vergleich zum Referenzwert aus der Norm in Höhe von 40 $m^3/(h*m^2)$ betragen die Förderleistungen zwischen 54,2% und 238,7%.

Die Personenbelegung wurde für die betrachteten Theaterspielstätten aus der Fläche des Theatersaals in Bezug auf die Sitzplatzkapazität ermittelt. Die maximale Personenbelegungsdichte liegt zwischen 0,54 m^2 in T12 und 0,92 m^2 in T10 und kann somit gemäß den Angaben aus den Nutzungsrandbedingungen überwiegend als

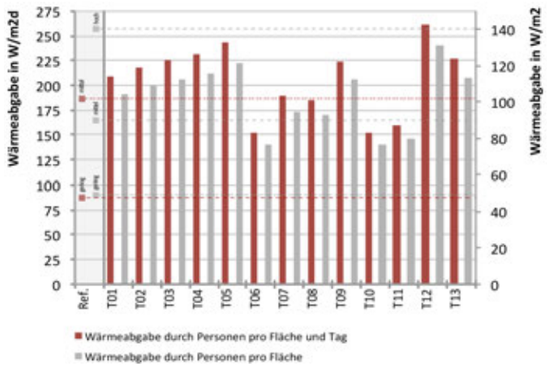

Abb. 200 Maximale Außenluftvolumenströme personen- und flächenbezogen für den Zuschauerbereich

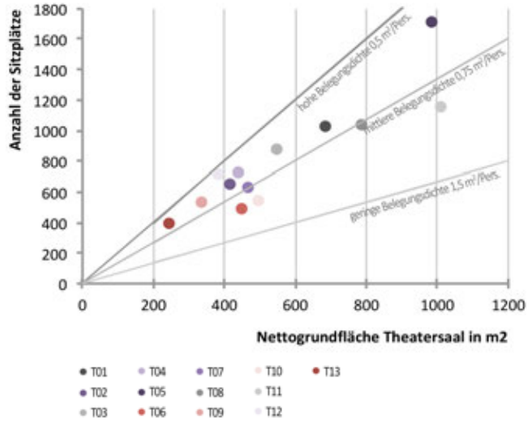

Abb. 201 Belegungsdichte in den Theaterspielstätten für den Zuschauerbereich

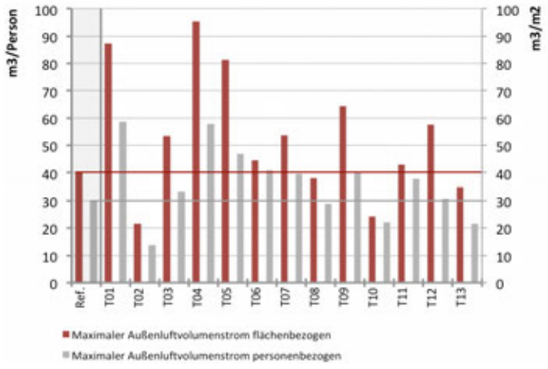

Abb. 202 Wärmeeintrag durch Personen für den Zuschauerbereich

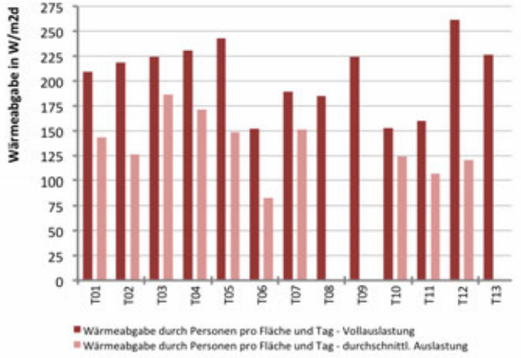

Abb. 203 Täglicher Wärmeeintrag durch Personen bei Voll- und Durchschnittsauslastung für den Zuschauerbereich

mittel bis hoch eingestuft werden.

Unter internen Wärmequellen müssen in Zuschauersälen nur Personen, nicht jedoch Arbeitshilfen, berücksichtigt werden. Die Wärmeabgabe durch Beleuchtung wird bereits bei Ermittlung des Energiebedarfs einbezogen. Nach DIN EN 15251 wird für den Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersäle“ eine sitzende Aktivität angenommen, was zu einer Wärmeabgabe von 70 W je Person führt. Unter Berücksichtigung der jeweiligen maximalen Belegungsdichte liegt die Wärmeabgabe im Bereich von 76 W/m^2 in T10 bis 131 W/m^2 in T12 und deckt somit alle drei Stufen von niedrig bis hoch ab. Durchschnittlich wurde für die betrachteten Theaterspielstätten eine spezifische Wärmeabgabe von 103 W/m^2 ermittelt. Es ist somit empfehlenswert, in den meisten Fällen den mittleren Bereich mit einer Wärmeabgabe von 93 W/m^2 bei Berechnungen anzusetzen. Die angesetzte Wärmeangabe von Personen bezieht sich auf eine volle Auslastung des Theatersaals, was jedoch selten der Fall ist. Während des Messzeitraums zeigen sich in den Theaterspielstätten Auslastungen zwischen 46,1% in T12 und 83,1% in T03. Der daraus berechnete Mittelwert beträgt 67,3%. Eine geringere Auslastung führt zu einem geringeren Wärmeeintrag und reduziert somit auf der einen Seite den Energiebedarf für die Kühlung und erhöht zum anderen den Bedarf für die Beheizung.

Die Vollnutzungsstunden wurden im Rahmen des Forschungsprojekts nicht überprüft und werden daher weiterhin mit 2h angenommen. Im Falle des Theatersaals sind die Vollnutzungsstunden von der durchschnittlichen Dauer einer Vorstellung abhängig. Über eine ergänzende Analyse der Spielpläne von Theaterspielstätten könnte diese ermittelt werden.

Aus der Wärmeabgabe durch Personen, bezogen auf die Fläche, kann durch die Multiplikation mit den Vollnutzungsstunden die tägliche Wärmezufuhr berechnet werden. Diese liegt zwischen 152 W/m^2d in T06 und 262 W/m^2d in T12. Somit ist der Durchschnittswert von 206 W/m^2d ebenfalls eher im mittleren Bereich anzusetzen.

Bezieht man bei der Berechnung der täglichen

Wärmeabgabe ein, dass nur selten eine vollständige Auslastung des Theatersaals vorhanden ist, so reduziert sich die tägliche Wärmezufuhr auf 83 W/m²d in T06 bis 187 W/m²d in T03. Durchschnittlich findet somit durch eine geringere Auslastung eine Reduktion der täglichen Wärmezufuhr um 32,7% statt. Bei einer Betrachtung des Mittelwerts der täglichen Wärmezufuhr, welcher 136 W/m²d beträgt, zeigt sich, dass dieser gegenüber den Werten in der DIN V 18599-10 nahezu genau zwischen einer tiefen und einer mittleren Wärmeabgabe einzuordnen ist.

In [5.7.2] wurde festgestellt, dass der Tätigkeitsgrad entsprechend einer „sitzenden Tätigkeit“ mit einem Gesamtenergieumsatz von 70 Wm-2 für Theatersäle diesen zu hoch bewertet und stattdessen ein niedriger Tätigkeitsgrad angesetzt werden sollte. Dies bewirkt eine Verringerung des Gesamtenergieumsatzes auf 58 Wm-2. Da sich der Gesamtenergieumsatz jedoch in einen Anteil für sensible und latente Wärmeabgabe unterteilt und diese sich in Abhängigkeit der Lufttemperatur sowie des Tätigkeitsgrads prozentual verschieben, reduziert sich die sensible Wärmeabgabe bei der Auslegungstemperatur von 24°C lediglich um 2W/Pers. Dies entspricht einer Senkung der täglichen Wärmezufuhr um lediglich 2,9% und zeigt somit nur geringe Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse.

Die Gegenüberstellung des Nutzungsprofils „Nr. 23 Zuschauerbereich – Theater und Veranstaltungsbauten“ mit den aufgenommenen Nutzungsdaten hat nur im Bereich der Nutzungstage starke Abweichungen gezeigt. Darüber hinaus wäre eine Berücksichtigung der Auslastung des Theatersaals empfehlenswert, da ansonsten mit einer Überbewertung des Wärmeeintrags durch Personen zu rechnen ist.[35],[36],[80]

Literatur:

[35] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012a)
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012b)
[80] Maas, A. (2013)

6.2.2 Nr. 24 Theater-Foyer

Im Folgenden werden die Randbedingungen zum Nutzungsprofil Nr. 24 Theater-Foyer aus der DIN V 18599-10 den im Rahmen der Querschnittserhebung ermittelten Nutzungsbedingungen gegenübergestellt. Diese wurden, wie in [6.2.1] beschrieben, erhoben. Bei den Nutzungsrandprofilen „Nr. 23 Zuschauerbereich – Theater und Veranstaltungsbauten“ und „Nr. 24 Theater-Foyer“ bestehen in den Punkten Nutzungszeiten und Raumkonditionen keine Unterschiede.

Im Gegensatz zu [6.2.1], wo die erhobenen Nutzungszeiten mit denen des Nutzungsrandprofils übereinstimmten, zeigt sich hier bei 5 von 13 betrachteten Theaterspielstätten eine Abweichung. Diese äußert sich in einem mindestens eine Stunde früheren Nutzungsbeginn. In Theaterspielstätten erfüllen die Foyers vor und nach den Vorstellungen sowie in den Pausen eine gesellschaftliche Funktion

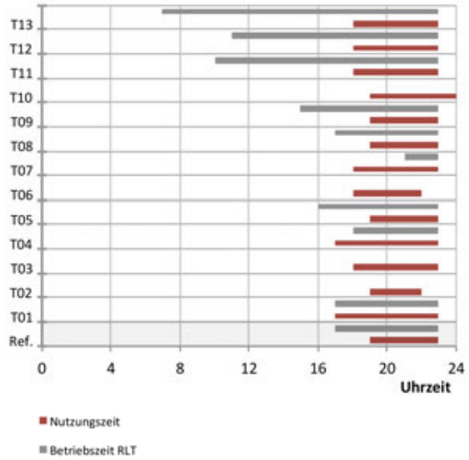

Abb. 204 Nutzungs- und Betriebszeiten der RLT-Anlagen für das Theater-Foyer

Theater – Foyer				**Nr. 24**
Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit		Uhr	19:00	23:00
jährliche Nutzungstage $d_{nutz,a}$		d/a	250	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit t_{Tag}		h/a	59	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit t_{Nacht}		h/a	941	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung		Uhr	17:00	23:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung $d_{op,a}$		d/a	250	
tägliche Betriebszeit Heizung		Uhr	17:00	23:00
Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)				
Raum-Solltemperatur Heizung $\theta_{i,h,soll}$ [a]		°C	21	
Raum-Solltemperatur Kühlung $\theta_{i,C,soll}$		°C	24	
Minimaltemperatur Auslegung Heizung $\theta_{i,h,min}$		°C	20	
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung $\theta_{i,C,max}$		°C	26	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb $\Delta\theta_{i,NA}$		K	4	
Feuchteanforderung		–	mit Toleranz	
Mindestaußenluftvolumenstrom $\dot{V}_A$				
personenbezogen		m^3 je Stunde und Person	20	
flächenbezogen		$m^3/(h \cdot m^2)$	25	
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude $\dot{V}_{AGeb}$		$m^3/(h \cdot m^2)$	5	
relative Abwesenheit RLT c_{RLT}		–	0,5	
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit F_{RLT}		–	1	
mech. Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel (Praxis)			von	bis
Luftwechsel		h^{-1}	2	2,5
Beleuchtung				
Wartungswert der Beleuchtungsstärke $\bar{E}_m$		lx	300	
Höhe der Nutzebene h_{Ne}		m	0	
Minderungsfaktor k_A		–	1	
relative Abwesenheit C_A		–	0,5	
Raumindex k		–	4	
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit F_t		–	1	
Anpassungsfaktor Beleuchtung vertikaler Flächen k_{VB}		–	1	
Personenbelegung			gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte		m^2 je Person	1,5	0,8	0,5
Interne Wärmequellen		Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m^2) tief	mittel	hoch
Personen (70 W je Person)		1	46,7	87,5	140
Arbeitshilfen		0	0	0	0
Wärmezufuhr je Tag ($q_{i,p} + q_{i,fac}$)		$Wh/(m^2 \cdot d)$	47	88	140
Automationsgrad		D	C	B	A
Summand Automation $\Delta\theta_{EMS}$	K	0	0	−0,5	−1
Faktor für adaptive Temperaturführung f_{adapt}	–	1	1	1,35	1,35

a Beträgt die Raum-Solltemperatur im Heizfall weniger als 19 °C (Nutzungen mit niedrigen Innentemperaturen), ist $\theta_{i,h,soll} = \theta_{i,h,min}$ = 17 °C anzusetzen.

Abb. 205 Nutzungsrandbedingungen für das Nutzungsprofil Nr.24 Theater-Foyer DIN V 18599-10 [34]

und agieren als Treffpunkt, weshalb die Einlasszeiten der Foyers meist deutlich vor denen der Zuschauersäle sowie dem Vorstellungsbeginn liegen.
Da die Nutzung des Foyers an die Vorstellungen und somit an die Nutzung der Zuschauersäle gekoppelt ist, können die jährlichen Nutzungstage mit denen gleichgesetzt werden, die in [6.2.1] ermittelt wurden.
Erfolgt in einem nächsten Schritt die Betrachtung der Betriebszeiten der RLT-Anlagen, wird sichtbar, dass trotz der hohen Frequentierung durch die Theaterbesucher nicht alle Foyers der betrachteten Theaterspielstätten durch RLT-Anlagen belüftet werden. Bei T02, T03, T06 und T10 werden zumindest Teilbereiche der Foyers natürlich belüftet. Diese Theaterspielstätten haben gemeinsam, dass sie alle unter die erste Baujahresgruppe fallen und über große Fensterflächen verfügen. In den verbleibenden Theaterspielstätten findet eine tägliche Frischluftförderung durch die RLT-Anlagen statt. Ausnahmen bilden lediglich T04 und T05, bei denen sich die Frischluftzufuhr nach den Vorstellungstagen richtet.
Die täglichen Laufzeiten der RLT-Anlagen betragen zwischen 2 und 16 Stunden, sodass aufgrund der starken Variation aus der Praxis keine veränderte Regel für die Nutzungsrandprofile abgeleitet werden kann. Aus der Anzahl der wöchentlichen Nutzungstage ergibt sich jedoch eine zu den Nutzungsprofilen abweichende Anzahl der jährlichen Betriebstage. Unter Berücksichtigung der 6-wöchigen Theaterferien liegen die Betriebstage der RLT-Anlagen in den betrachteten Theaterspielstätten bei 322 Tagen.
Ein weiterer Punkt, der mithilfe der aufgenommenen Daten betrachtet werden kann, sind die Raumkonditionen für die Beheizung. Hier zeigt sich, dass die Raum-Solltemperaturen in der Praxis oft niedriger angesetzt sind als im Nutzungsrandprofil. Während dieses von einer Raum-Solltemperatur von 21°C ausgeht, wurden die Raum-Solltemperaturen in den betrachteten Theaterspielstätten mit 18°C bis 22°C angegeben. In acht von dreizehn Theaterspielstätten liegt die Solltemperatur unter 21°C, während sie in vier Fällen darüber liegt. Durch die Unterschiede zwischen den Soll-Temperaturen kann es zu Differenzen zwischen dem berechneten Energiebedarf und dem tatsächlichen Energieverbrauch kommen.
Betrachtet man die Personenbelegung der Foyerbereiche, so zeigen sich Werte zwischen 0,6 in T13 und 3,5 m² pro Person in T10, während der Mittelwert bei 1,7 m² pro Person liegt. Somit ist die Personenbelegung in den betrachteten Theaterspielstätten tendenziell eher gering. Die Personenbelegung ist vor allem für die Ermittlung der Wärmezufuhr durch interne Wärmequellen ausschlaggebend. Obwohl sich die Nutzungszeit über 4 Stunden erstreckt, wird in den Nutzungsrandprofilen lediglich eine Vollnutzungsstunde angenommen. Dies ist nachvollziehbar, da das Foyer hauptsächlich vor den Vorstellungen, in den Pausen sowie im Anschluss frequentiert wird.
Aus der Gegenüberstellung der aufgenommenen Daten mit dem Nutzungsrandprofil „Nr. 24 Theater-Foyer“ geht hervor, dass hier hauptsächlich im Bereich der RLT-Anlagen sowie der Auslegung der Raum-Solltemperaturen für die Heizung Abweichungen in der Praxis bestehen.

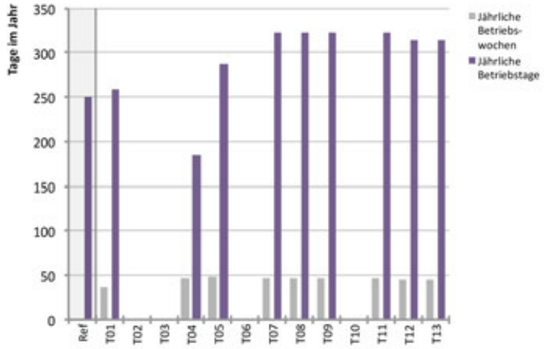

Abb. 206 Jährlichen Betriebswochen und –Tage der RLT-Anlage für das Theater-Foyer

Literatur:
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012b)

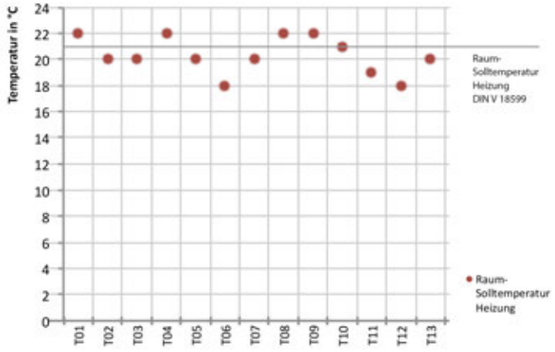

Abb. 207 Raum-Solltemperaturen im Heizfall für das Theater-Foyer

Ebenso wie in [6.2.1] und [6.2.2] beschrieben, wurden auch für die Bühnen in den Theaterspielstätten vor allem Nutzungszeiten erhoben, die mit dem Nutzungsprofil „Nr. 25 Bühne – Theater- und Veranstaltungsbauten“ abgeglichen wurden.
Als tägliche Nutzungszeit ist in den Nutzungsrandbedingungen der Zeitraum von 13.00 Uhr bis 23.00 Uhr angegeben und umfasst somit die abendliche Vorstellungszeit sowie einen sechsstündigen Vorlauf zur Vorbereitung der Bühne (vgl. Nutzungsprofil Nr. 23 Zuschauerbereich – Theater und Veranstaltungsbauten). Bei der Aufnahme der Daten hat sich herausgestellt, dass sich die Nutzung der Bühne in zwei Zeiträume gliedern lässt. Zum einen betrifft dies die Zeit während der Vorstellungen, zu der abweichende Anforderungen an die Beleuchtung gestellt werden und die sich nur über einen Zeitraum von etwa zwei Stunden erstrecken. Zum anderen handelt

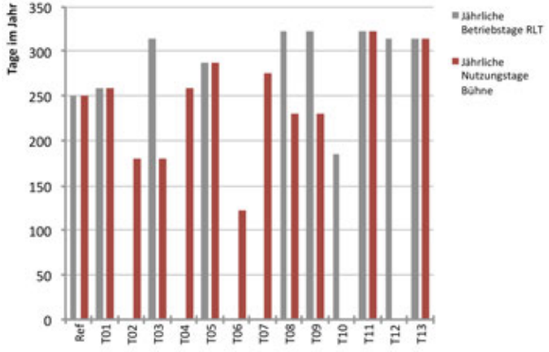

Abb. 208 Jährlichen Nutzungs- und Betriebstage für die Bühne

Bühne **Theater und Veranstaltungsbauten**					**Nr. 25**
Nutzungszeiten				von	bis
tägliche Nutzungszeit			Uhr	13:00	23:00
jährliche Nutzungstage $d_{nutz,a}$			d/a	250	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit t_{Tag}			h/a	1259	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit t_{Nacht}			h/a	1241	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung			Uhr	11:00	23:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung $d_{op,a}$			d/a	250	
tägliche Betriebszeit Heizung			Uhr	11:00	23:00
Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)					
Raum-Solltemperatur Heizung $\theta_{i,h,soll}$			°C	21	
Raum-Solltemperatur Kühlung $\theta_{i,c,soll}$			°C	24	
Minimaltemperatur Auslegung Heizung $\theta_{i,h,min}$			°C	20	
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung $\theta_{i,c,max}$			°C	26	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb $\Delta\theta_{i,NA}$			K	4	
Feuchteanforderung			–	mit Toleranz	
Mindestaußenluftvolumenstrom $\dot{V}_A$					
personenbezogen			m^3 je Stunde und Person	–	
flächenbezogen			$m^3/(h \cdot m^2)$	0,3	
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude $\dot{V}_{AGeb}$			$m^3/(h \cdot m^2)$	–	
relative Abwesenheit RLT c_{RLT}			–	–	
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit F_{RLT}			–	–	
mech. Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel (Praxis)				von	bis
Luftwechsel			h^{-1}	3	5
Beleuchtung					
Wartungswert der Beleuchtungsstärke E_m			lx	1000	
Höhe der Nutzebene h_{Ne}			m	0	
Minderungsfaktor k_A			–	0,9	
relative Abwesenheit C_A			–	0	
Raumindex k			–	2,5	
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit F_t			–	0,6	
Anpassungsfaktor Beleuchtung vertikaler Flächen k_{VB}			–	1	
Personenbelegung			gering	mittel	hoch
maximale Belegungsdichte		m^2 je Person	–	–	–
Interne Wärmequellen		Vollnutzungs-stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m^2) tief	mittel	hoch
Personen (70 W je Person)		–	–	–	–
Arbeitshilfen		–	–	–	–
Wärmezufuhr je Tag ($q_{l,p} + q_{l,fac}$)		Wh/(m^2 · d)	–	–	–
Automationsgrad		D	C	B	A
Summand Automation $\Delta\theta_{EMS}$	K	0	0	−0,5	−1
Faktor für adaptive Temperaturführung f_{adapt}	–	1	1	1,35	1,35

Abb. 209 Nutzungsrandbedingungen für das Nutzungsprofil Nr.25 Bühne DIN V 18599-10 [34]

es sich um Einrichtungszeiten, bei denen die Bühne für die Vorstellungen vorbereitet wird. Dazu zählen Arbeiten an der Beleuchtung oder dem technischen Equipment, aber auch Aufbauten auf der Bühne. Anhand des Faktors für die Relative Abwesenheit CA wird deutlich, dass im Nutzungsrandprofil von einer dauerhaften Beleuchtung während der Nutzungszeit ausgegangen wird. Auch im Zuge der Datenerfassung wurde festgestellt, dass vor allem während der Einrichtungszeiten eine beständige Grundbeleuchtung auf den Arbeitsgalerien herrscht.

Die Nutzungszeiten konnten nicht eindeutig für alle Spielstätten bestimmt werden. In einigen Spielstätten erfolgt jedoch die Angabe, dass der Arbeitsbetrieb auf der Bühne bereits zwischen 7.00 Uhr und 8.00 Uhr aufgenommen werde, was sich stark von der Nutzungszeit aus den Nutzungsrandbedingungen unterscheidet. Darüber hinaus wurde angegeben, dass dieser nicht nur an fünf Tagen in der Woche stattfinde, sondern insbesondere in Repertoiretheatern eine tägliche Nutzung der Bühne üblich sei. Somit wäre für die jährlichen Nutzungstage eine 7-Tage-Woche, abzüglich der Theaterpause, anzusetzen.

Die Nutzung von RLT-Anlagen wurde in den betrachteten Theaterspielstätten sehr unterschiedlich gehandhabt. Drei Theaterspielstätten verfügen über eine eigene Lüftungsanlage für die Bühne, fünf gaben explizit an, dass eine Lüftungsanlage gemeinsam für Bühne und Zuschauersaal bestehe, während in einer Theaterspielstätte sogar ein Luftverbund zwischen Zuschauersaal, Foyer und Bühne vorhanden ist. Bei den restlichen Theaterspielstätten erfolgt eine indirekte Belüftung der Bühne über die Frischluftzufuhr des Zuschauersaals. Sofern die Bühne direkt mittels RLT-Anlage mit Frischluft versorgt wird, besteht eine tägliche Betriebszeit. Eine Ausnahme stellen nur T05 und T10 dar, bei denen sich die Betriebs- an den Vorstellungstagen orientieren.

Wie bereits bei den Nutzungstagen ergeben sich unter Berücksichtigung der Angaben auch mehr Betriebstage für die RLT-Anlagen. Aus der Angabe zu den Laufzeiten lässt sich kein einheitliches Muster für die betrachteten Theaterspielstätten ableiten, da diese mit 3 bis 16 Stunden angegeben wurden.

Nach Gegenüberstellung der erhobenen Daten zur Nutzung der Bühne mit dem Nutzungsrandprofil Nr. 25 Bühne – Theater und Veranstaltungsbauten sind Hinweise auf abweichende Nutzungs- und Betriebstage sichtbar geworden. Konkrete Empfehlungen zur Anpassung des Nutzungsrandprofils sind jedoch nicht möglich, da hierfür ein Ausbau der Datenbasis notwendig ist.[36]

Literatur:
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012b)

Abb. 210 Arbeitsgalerien im Bühnenturm des Opernhauses Chemnitz

7. Zusammenfassung der Ergebnisse zur Querschnittserhebung

Im Rahmen der Querschnittserhebung wurden deutschlandweit in 13 Theaterspielstätten über einen Zeitraum von drei bis vier Wochen Erhebungen zum Energieverbrauch und Raumkomfort durchgeführt.
Die Ergebnisse auf endenergetischer Ebene zeigen, dass durchschnittlich rund ein Viertel der Energie für Strom und drei Viertel für Heizung und Warmwasser verbraucht werden. Sowohl der jährliche und tägliche absolute Stromverbrauch als auch der Verbrauch für Heizung und Warmwasser variieren zwischen den verschiedenen Häusern sehr stark. Dies ist im Hinblick auf den Stromverbrauch auf die unterschiedliche Größe der Häuser, den Technisierungsgrad und die verschiedenen Nutzungen zurückzuführen. Der Verbrauch für Heizung und Warmwasser ist ebenfalls von der Größe des Hauses, aber auch vom Zustand der Gebäudesubstanz sowie der Anlagentechnik abhängig.
Trotz des einheitlichen Gebäudetypus bestehen in den einzelnen Theaterspielstätten sehr unterschiedliche bauliche und technische Situationen. Die Sitzplatzkapazität, die in den verschiedenen Häusern variiert, übt Einfluss auf die Gebäudenutzfläche aus, da sie sich bei steigendem Fassungsvermögen tendenziell erhöht. Darüber hinaus vereinen Theaterspielstätten viele unterschiedliche Nutzungen unter einem Dach, sodass hier differenzierte räumliche Konstellationen entstehen. Da viele Theaterspielstätten bereits um die Jahrhundertwende errichtet wurden, sind im Laufe der Jahre neue Anforderungen an die Räumlichkeiten entstanden, welche entweder durch Anbauten oder durch Auslagerungen von Teilnutzungen umgesetzt wurden. Zu den ausgelagerten Funktionen zählen oftmals energieintensive Nutzungen wie Werkstätten, aber auch Lagerflächen und Verwaltungsbereiche. Je nachdem welche Nutzungsbereiche anteilig in direktem räumlichen Zusammenhang mit dem betrachteten Gebäude stehen, kann dies bedeutende Auswirkungen auf den Energieverbrauch haben. Besonders die funktionalen Räume, die zur Vorbereitung und Durchführung von Theaterspielstätten notwendig sind, nehmen die meiste Gebäudefläche ein. Repräsentative und zuschauerfrequentierte Bereiche stellen dagegen nur einen verhältnismäßig geringen Anteil.
Auch die Betrachtung der technischen Situation offenbart große Unterschiede in den Energieversorgungskonzepten und in den Technisierungsgraden. Die Belüftung der Räumlichkeiten erfolgt im Zuschauersaal aller Theaterspielstätten maschinell. In manchen Häusern ist dies jedoch der einzige maschinell belüftete Bereich, während in anderen Häusern fast das gesamte Gebäude mit Lüftungsanlagen versorgt wird. Technische Unterschiede bestehen auch bei der Kühlung. Während die Serverräume in allen Fällen durch Split-Kälteanlagen gekühlt werden, besteht in einigen Häusern zusätzlich die Möglichkeit zur Kühlung des Zuschauersaals. Erfolgt eine Betrachtung der Beleuchtung, so bestehen in vielen Häusern Bemühungen, die Beleuchtung der funktionalen Bereiche auf energiesparende Leuchtmittel umzurüsten und so den Stromverbrauch zu reduzieren. In der Regel sind bisher jedoch keine tageslicht- oder präsenzgesteuerten Systeme vorhanden, die ein weiteres Einsparpotential bieten. Große Unterschiede werden auch bei der installierten szenischen Beleuchtungsleistung sichtbar. Da der Grad der Technisierung in den Bereichen Lüftung, Kühlung und Beleuchtung stark variiert, schlägt sich dies in der elektrischen Gesamtanschlussleistung und auch im Stromverbrauch wieder. Ein Teil des technischen Gebäudekonzepts ist die Deckung des Bedarfs für Heizung und Warmwasser. In den meisten Theaterspielstätten erfolgt diese zentral mit einem Fernwärmeanschluss an das städtische Netz.
Betrachtet man die einzelnen Gebäudebereiche in Bezug auf die Entstehung des Endenergieverbrauchs, so ist festzustellen, dass der größte absolute Verbrauch für die Bereiche Foyer sowie Lager/Technik anfällt.

Beide Bereiche haben einen großen Anteil an der Gebäudefläche. Da ihr Technisierungsgrad jedoch eher gering ist, zeigt sich in diesen Bereichen nur ein geringer spezifischer Verbrauch. Anders verhält es sich dagegen in Sanitär- und Gastronomiebereichen, welche aufgrund des starken Lüftungsbedarfs einen hohen spezifischen Verbrauch aufweisen. Beide machen jedoch nur einen geringeren Anteil an der Gebäudefläche aus, sodass ihr Anteil am absoluten Endenergiebedarf gering ist. Bedingt durch die szenische Beleuchtung und die Luftförderung ist der spezifische Bedarf für den Bereich des Zuschauersaals hoch. Da dieser zusätzlich einen nicht unerheblichen Anteil an der Gebäudefläche besitzt, fällt hier auch der absolute Bedarf stark ins Gewicht.
Da der Endenergiebedarf des Bereichs Zuschauersaal, vor allem durch den Strombedarf für szenische Beleuchtung und Luftförderung besonders hoch ist, wurden in den meisten Theaterspielstätten jährliche und tägliche Unterschiede in Abhängigkeit des Nutzungszustands des Zuschauersaals festgestellt. An Vorstellungstagen ist der Verbrauch tendenziell höher als an Leerstandstagen. Der Einfluss der Vorstellungszeiten hat auch charakteristische Auswirkungen auf das Lastprofil. Während der Vorstellungen ist ein starker Anstieg der Lasten zu verzeichnen, welcher für die erheblichen Lastschwankungen im Tagesverlauf verantwortlich ist.
Der Einfluss des Stromverbrauchs während der Vorstellungen zeigt sich nicht nur auf Tages-, sondern auch auf Wochen- und Jahresebene. Die Betrachtung des wöchentlichen Verlaufsprofils ergab montags einen besonders niedrigen Verbrauchsanteil, da dieser Tag in vielen Theaterspielstätten als spielfrei gilt und somit kaum Vorstellungen stattfinden. Aufgrund der komplexen Nutzungsüberlagerungen mit Werkstätten und Verwaltungsbereichen, welche überwiegend geregelte Arbeitszeiten an Wochentagen aufweisen, sind die Verbrauchsanteile auch am Wochenende trotz erhöhter Vorstellungsanzahl mit den Montagswerten vergleichbar. Charakteristisch für das Jahresprofil ist der geringe Verbrauchsanteil während der 6-wöchigen Spielpause im Sommer und der gegenüber anderen, innerhalb der Spielzeit liegenden, Monaten erhöhte Verbrauchsanteil im Dezember, welcher auf eine hohe Vorstellungsdichte aufgrund von Weihnachtsproduktionen zurückzuführen ist.
Aus den Gesamtjahresverbräuchen der Theaterspielstätten lassen sich spezifische Stromkennwerte ableiten und dem Vergleichswert aus der „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ gegenüberstellen. Hier hat sich gezeigt, dass der ermittelte Durchschnittskennwert aus der Querschnittserhebung den Referenzwert aus der Bekanntmachung deutlich überschreitet. Ein Vergleich der Spielstätten untereinander wurde auf Basis der Gebäudefläche und der Sitzplatzkapazität vorgenommen. Für beide Bezugsgrößen bilden sich drei Gruppen heraus, die charakteristische Gemeinsamkeiten aufweisen und anhand derer der Stromverbrauch der Theaterspielstätten kategorisiert werden kann. Der Bezug auf die Fläche zeigt die Anschlussleistung der Lüftungsanlagen sowie die durchschnittliche Anschlussleistung der Bühnenbeleuchtung während der Vorstellungen als Indikatoren für den Stromverbrauch auf, während der Sitzplatzbezug bei steigender Zuschauerkapazität einen höheren Stromverbrauch pro Sitzplatz verdeutlicht.
Anders als für den Stromverbrauch ist für den Verbrauch von Heizung und Warmwasser kein direkter Zusammenhang mit den Vorstellungen sichtbar, da vielmehr eine Abhängigkeit zur Außenlufttemperatur, zu den Raumlufttemperaturen in den unterschiedlichen und regelmäßig frequentierten Bereichen der Theaterspielstätten und der energetischen Qualität der Gebäudehülle besteht. Im Zuschauersaal selbst besteht gegenüber den restlichen Bereichen des

Theaters aufgrund der hohen Wärmeeinträge kein erhöhter Heizwärmebedarf. Anders verhält es sich im Sanitär- und Gastronomiebereich, wo aufgrund des hohen Lüftungsbedarfs ein überdurchschnittlicher Heizwärmebedarf entsteht, welcher aber aufgrund des geringen Anteils an der Gebäudefläche in der Gesamtbilanz nur wenig auffällig ist.
Wie bereits beim Stromverbrauch zeigen die verschiedenen Theaterspielstätten auch für den Verbrauch von Heizung und Warmwasser unterschiedliche Tages- und Jahresverbräuche. Diese entstehen größtenteils durch die Beheizung und nur zu einem sehr geringen Anteil durch den Warmwasserbedarf. Erfolgt auch hier die Bildung eines durchschnittlichen Verbrauchskennwerts und anschließend der Vergleich mit dem Referenzwert aus der Bekanntmachung, so zeigt sich eine leichte Unterschreitung. Der Vergleich der Spielstätten untereinander, bezogen auf die Gebäudefläche und die Sitzplatzkapazität, ermöglicht auch an dieser Stelle die Klassifizierung der Höhe des Verbrauchs. Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge zwischen den Anteilen der Nutzungsbereiche, den vorherrschenden Temperaturniveaus, dem Zustand der Anlagentechnik und der energetischen Qualität der Gebäudehülle konnten für die flächenbezogene Klassifizierung keine Indikatoren ermittelt werden. Beim Bezug auf die Sitzplatzkapazität zeigt sich dagegen tendenziell ein Einfluss des Baujahrs auf die Höhe des Verbrauchs.
Bisher erfolgte die Betrachtung des Energieverbrauchs auf endenergetischer Ebene, auf welcher der Verbrauchsanteil für Heizung und Warmwasser gegenüber Strom überwiegt. Im Gegensatz hierzu zeigt sich auf primärenergetischer Ebene eine andere Verteilung, da die Versorgung der meisten Spielstätten über Fernwärme geringe Primärenergiefaktoren in diesem Bereich nach sich zieht, sodass der Stromverbrauch primärenergetisch eine stärkere Gewichtung erfährt. Klassifizierungen nach Primärenergieverbrauch sind in den Theaterspielstätten daher stark vom Stromverbrauch geprägt. Erfolgt die Bildung eines Verbrauchskennwerts über den Bezug auf die Gebäudefläche, so sind die Höhe des Stromverbrauchs und der Primärenergiefaktor der Wärmeversorgung ausschlaggebend für die Einordnung des Primärenergieverbrauchs. Die Klassifizierung mittels Bezug auf die Sitzplatzkapazität zeigt, dass der Primärenergieverbrauch bei zunehmender Fläche pro Sitzplatz steigt. Diese Zunahme der Fläche pro Sitzplatz kann dann wiederum auf die Art der Räumlichkeiten, die im räumlichen Bezug zur Theaterspielstätte stehen, zurückgeführt werden.
Bei der Bewertung des Energieverbrauchs darf der Raumkomfort nicht unbeachtet bleiben, da die Aufrechterhaltung angenehmer Behaglichkeitsbedingungen in Abhängigkeit zur jeweiligen Nutzung durch die Gebäudetechnik großen Einfluss auf den Energieverbrauch ausübt. Besonders sensibel ist in Theaterspielstätten der Raumkomfort im Zuschauersaal, dessen Erfassung mit Hilfe des auf Nutzerebene platzierten Messtorsos, der von den Zuschauern überwiegend gut angenommen wurde, erfolgte. Die Raumluftqualität wies, basierend auf dem Parameter der CO_2-Konzentration, in den meisten Fällen eine hohe bis mittlere Qualität auf und ist hygienisch als unbedenklich einzustufen. Nur in Einzelfällen kam es zu erhöhten CO_2-Konzentrationen, die, je nach Steuerung der Lüftungsanlage, durch hohe Auslastungen des Zuschauersaals oder lange Vorstellungsdauern hervorgerufen wurden. Die Erfassung der Lufttemperaturen hat gezeigt, dass diese gegenüber den Behaglichkeitsbereichen aus den entsprechenden Normen tendenziell erhöht sind und zu einem Großteil der Zeit den dort definierten Anforderungen nicht entsprechen. Durch die Nutzerbefragungen, die aufgrund mangelnder Teilnahmebereitschaft nur geringe Rückläufe verzeichneten, wurde festgestellt, dass im Gegensatz zur Einordnung der Messwerte in die Normen die Temperatur durch die Zuschauer überwiegend neutral beurteilt wurde. Durch die Gegenüberstellung der objektiven und subjektiven Ergebnisse muss in Frage gestellt werden, ob der Tätigkeitsgrad, welcher für den nach Norm angewendeten Raumtypen angesetzt wird, für Zuschauersäle gelten kann oder ob dieser nach unten korrigiert werden muss. Auffällig niedrige Werte wurden durch die Messungen für die relative Luftfeuchte in den Zuschauersälen sichtbar. Besonders in Theaterspielstätten ohne Möglichkeit einer Zuluftbefeuchtung wurden Werte außerhalb der Behaglichkeitsbereiche erfasst, was auch durch die befragten Nutzer tendenziell widergespiegelt wurde. Die geringen relativen Luftfeuchten werden insbesondere durch den hohen Luftaustausch und die starke Aufheizung der Zuluft in der Heizperiode begünstigt. Neben den Parametern CO_2-Konzentration, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte wurde auch die Luftgeschwindigkeit erfasst, um Rückschlüsse auf Zugerscheinung zu ermöglichen. Diesbezüglich bestehen jedoch weder objektiv noch subjektiv Auffälligkeiten. Mit den Messungen wurde festgestellt, dass in den meisten Theaterspielstätten bezüglich des Raumklimas ein moderates Maß an Erwartungen, entsprechend der Empfehlung für bestehende Gebäude, erfüllt werden kann. Zu berücksichtigen ist jedoch der feste Standort des Messtorsos während der Messungen. Da Zuschauersäle mit der Bühne und dem Bühnenturm komplexe Raumgefüge bilden und die Anordnung der Zuschauer nicht nur auf einer Ebene erfolgt, können innerhalb des Raumes unterschiedliche komforttechnische Situationen auftreten, die über eine Einzelmessung nicht abgebildet werden können. Daher können die Ergebnisse der Messungen nur Anhaltspunkte zum Raumklima geben.
Mit den beschriebenen Erkenntnissen ist eine energetische und raumkomforttechnische Bestandsaufnahme für die Gebäudetypologie der Theaterspielstätte erfolgt. Für anstehende Sanierungen besteht nun eine Datengrundlage, mittels derer der Erfolg durchgeführter Maßnahmen eingeordnet werden kann. Der Raumkomfort im Zuschauersaal ist hierbei ein Gradmesser zur Sicherstellung, dass Energieeinsparmaßnahmen nicht zu Lasten des Raumkomforts erfolgen. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Maß des Raumkomforts im Zuschauersaal und der Höhe des Energieverbrauchs der Theaterspielstätten konnte nicht festgestellt werden. Vielmehr ist eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen der komplexen Nutzungsstruktur, den Raumkomfortbedingungen in allen Bereichen des Gebäudes und der Anlagentechnik im Einzelfall notwendig, um wirksame Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs zu konzipieren. Die Individualität der einzelnen Gebäude dieser Typologie lässt lediglich den Versuch von verallgemeinernden Aussagen zu, die nicht auf jedes Gebäude gleichermaßen zutreffen.

Intensivmonitoring

8. Durchführung des Intensivmonitorings

Ziel des Intensivmonitorings ist das Aufzeigen von Einsparpotentialen durch die energetische Sanierung eines exemplarischen Bestandsgebäudes. Die positiven Ergebnisse sollen anderen Kommunen als Anreiz dienen, ebenfalls Sanierungsmaßnahmen für ihren Gebäudebestand im Bereich der Theaterspielstätten anzustreben. Die Einsparpotentiale sollen vor allem in der Gegenüberstellung der Ergebnisse des sanierten Gebäudes für Energieverbrauch und Raumkomfort mit den Erkenntnissen aus der Querschnittserhebung des weitestgehend unsanierten Gebäudebestands deutlich werden. Darüber hinaus sollen mittels des Monitorings die formulierten Sollwerte in Bezug auf den Energieverbrauch überprüft werden. Es ist somit ein Werkzeug zur Qualitätssicherung und Betriebsoptimierung.

Das Intensivmonitoring beinhaltet grundsätzlich die gleichen Bestandteile wie die Querschnittserhebung. Während bei der Querschnittserhebung jedoch nur Daten zum Gesamtenergieverbrauch für Strom und Heizung/Warmwasser erfasst werden, erfolgt beim Intensivmonitoring auch die Messung von Unterverteilungen, sodass ein genaueres messtechnisches Bild der Energieverbrauchsstruktur gezeichnet werden kann. Auch die Erfassung des Raumkomforts erfolgt tiefgreifender. Dies äußert sich darin, dass nicht nur Messungen im Zuschauersaal mit den Messtorsi durchgeführt wurden, sondern auch in weiteren Räumlichkeiten des Gebäudes über Messboxen stattgefunden haben. Darüber hinaus wurden zeitweise mehrere Bereiche im Zuschauersaal parallel mit den Messtorsi untersucht.

Im Gegensatz zur Querschnittserhebung, die nur Kurzzeitmessungen über wenige Wochen beinhaltet, sieht das Intensivmonitoring einen wesentlich längeren Messzeitraum vor. Ursprünglich war die Messdauer auf einen Zeitraum von zwei Jahren ausgelegt. Im ersten

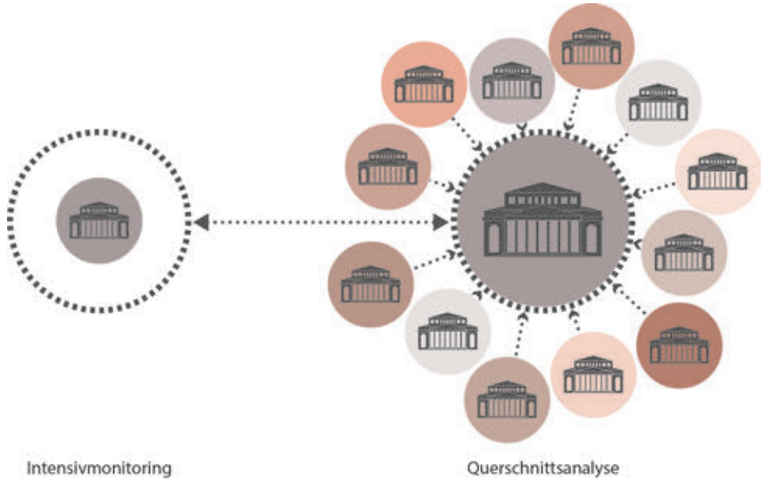

Abb. 211 Einordnung des Intensivmonitorings gegenüber der Querschnittserhebung

Abb. 212 Visualisierung des sanierten Gebäudeensembles der Bühnen Köln am Offenbachplatz [Bildquelle: © Bühnen der Stadt Köln]

Abb. 213 Saniertes Scharoun Theaters Wolfsburg [Bildquelle: © Lars Landmann]

Jahr sollte über alle Jahreszeiten hinweg der Prozess zur Einregulierung der Messtechnik begleitet werden, um anschließend in einem weiteren Jahr den Regelbetrieb zu evaluieren. Aufgrund geänderter Bedingungen im Projektablauf erfolgte jedoch eine Verkürzung der Messdauer auf ein Jahr. Bei Beginn des Monitorings im August 2017 hatte das Scharoun Theater Wolfsburg im Anschluss an die Sanierung bereits ein volles Betriebsjahr durchlaufen, sodass die Begleitung der Einregulierungsphase entfallen konnte.

Die geänderten Bedingungen im Projektablauf sind darauf zurückzuführen, dass das Monitoring ursprünglich im Opern- und Schauspielhaus Köln durchgeführt werden sollte. Das Bühnenensemble am Offenbachplatz wurde von dem Kölner Architekten Riphahn erreichtet und 1957, bzw. 1962 fertiggestellt. Es handelt es sich um eines der wichtigsten Kulturdenkmäler der Nachkriegszeit in Köln, da dieses ein Zeichen für die Rückkehr des kulturellen Lebens in die kriegszerstörte Stadt setzte. Seit seiner Errichtung wurden keine grundlegenden Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen vorgenommen, sodass sich sowohl die Gebäudesubstanz als auch die Anlagentechnik in einem bedenklichen Zustand befanden, der als stellvertretend für viele Theaterspielstätten in Deutschland angesehen werden kann. Im Vorfeld der Sanierung wurden trotz der Berücksichtigung denkmalpflegerischer Belange hohe Ziele formuliert. Das Gebäudeensemble sollte bei gleichzeitiger Verbesserung des Raumkomforts zukünftig energieeffizient und ressourcenschonend betrieben werden können. In Bezug auf geltende Normen sollte der nach EnEV 2009 zu erreichende Primärenergiebedarf um etwa ein Drittel unterschritten werden.

Der ursprüngliche Abschluss der Sanierung mit anschließender Wiedereröffnung war für 2015 geplant, konnte aber aufgrund von Verzögerungen im Bauablauf nicht eingehalten werden. Nachdem die Wiedereröffnung auf unbestimmte Zeit verschoben wurde, musste ein Alternativobjekt für das Monitoring gefunden werden, das ähnliche hohe energetische Zielsetzungen verfolgt und somit ebenfalls einen Vorbildcharakter aufweist. Da bisher nur wenige Theaterspielstätten in Deutschland umfassend saniert worden sind, kamen nur wenige Gebäude in Betracht. Die Wahl fiel auf das bis 2016 umfangreich sanierte Scharoun Theater Wolfsburg, das viele Parallelen zum Gebäudeensemble am Offenbachplatz aufweist. Ebenso wurden hier bei der Sanierung trotz Denkmalschutz hohe energetische Ziele angestrebt, um zukünftig einen ressourcenschonenden Gebäudebetrieb zu ermöglichen. Darüber hinaus wurden auch notwendige bauliche Ergänzungen vorgenommen. Ein entscheidender Unterschied besteht jedoch in der Betriebsstruktur der Gebäude. Während es sich bei den Bühnen Köln um ein im Repertoirebetrieb geführtes Haus handelt, wird das Scharoun Theater Wolfsburg als Gastspielbetrieb unterhalten. Dies bleibt bei den Auswertungen und vor allem bei der Gegenüberstellung mit den Erkenntnissen aus der Querschnittserhebung zu berücksichtigen.

9. Scharoun Theater Wolfsburg

9.1 Standort und Architektur

Bereits ab 1954 gab es in der Stadt Wolfsburg Bestrebungen zum Bau eines Theaters. Erste Planungsvorschläge hierzu wurden jedoch verworfen. Erst einige Jahre später begann durch die Bauverwaltung der Stadt die Vorbereitung eines Architektenwettbewerbs zum Neubau eines Theaters mit der Suche nach einem geeigneten Bauplatz. Frühere Überlegungen, das Theater in der Nähe des Rathauses zu bauen, wurden zugunsten eines Grundstücks am Südrand der Innenstadt am Hang des Klieversbergs, welches den Endpunkt der zentralen Stadtachse darstellt, verworfen. Im Jahre 1965 erfolgte dann schließlich die Ausschreibung des Wettbewerbs, zu dem sieben namenhafte Architekten eingeladen wurden Entwürfe einzureichen. Der Vorschlag des Architekten Hans Scharoun überzeugte die Jury aufgrund der besonderen städtebaulichen Lösung sowie der konsequenten Raumfolge. Es folgte die Beauftragung des Architekten zur Ausarbeitung eines Vorentwurfs. Aus Kostengründen musste das ursprünglich geplante Bauvolumen von ca. 83.000 m^3 deutlich auf 58.810 m^3 reduziert werden.

Das Gebäude, welches durch seine lineare Entwicklung und organische Formensprache die Topografie des Geländes aufgreift, wurde schließlich zwischen 1971 und 1973 errichtet. Die Funktionsbereiche im Inneren bilden eine lineare Abfolge, sodass sich die Architektur insgesamt in drei unterschiedlich gewichtete Baukörper gliedert, die zusammen eine Nettogrundfläche von 9.919 m^2 umfassen und ein A/V-Verhältnis von 0,24 m^{-1} aufweisen.

Das zentrale Element ist der Zuschauersaal mit Bühnentrakt, der in einem kantigen, mehrgeschossigen und fast gänzlich geschlossenen Kubus untergebracht ist und somit die restlichen Baukörper deutlich überragt. Die einzige Öffnung

Abb. 214 Standort des Scharoun Theaters in der Stadt Wolfsburg [Bildquelle: Google Maps]

bildet eine gebäudehohe Doppelverglasung an der südwestlichen Seite des Gebäudes, welche eine Beleuchtung des Zuschauersaals mit Tageslicht ermöglicht. Der Zuschauersaal selbst ist trapezförmig angelegt. Er gliedert sich in eine leicht ansteigende Parkettzone, einen Logenbereich und einen darüber auskragenden Rang.

Südöstlich zum Zuschauersaal angeordnet befindet sich ein langgestreckter und eingeschossiger Baukörper, der alle Funktionen mit Besucherfrequentierung aufnimmt. In Orientierung an die Abfolge eines Theaterbesuchs gelangt der Zuschauer vom Eingang zu den Garderoben über den Gastronomiebereich zum Eingangsportal des Zuschauersaals. Diese unterschiedlichen Bereiche werden durch verschiedene Ebenen und Raumhöhen gegliedert. Zusätzlich wird der Besucher durch eine differenzierte Lichtführung, die helle und dunklere Zonen vorsieht, geleitet. Während der Eingangsbereich noch weitestgehend geschlossen ist, erfolgt im Foyer eine fast vollständige Öffnung durch eine großflächige Verglasung in Richtung Stadt.

Getrennt durch den Baukörper des Zuschauersaals sind im Nordostflügel die Verwaltungs- und Funktionsbereiche, wie Büros und Künstlergarderoben, untergebracht. Der ebenfalls niedrige, aber zweigeschossige Baukörper ist sachlich und funktional gestaltet.

Auch von außen ist die innere Raumfolge sowohl durch die unterschiedlichen Höhen sowie die Vor- und Rücksprünge der Baukörper als auch durch die Materialität ablesbar. Die gesamte Fassade des Gebäudes ist mit Natursteinplatten verkleidet. Während die Erdgeschosszone mit hellen hochkant ausgerichteten rechteckigen Travertinplatten gestaltet ist, wird das Bühnengebäude durch die Verwendung von dunkleren grauen Brekzieplatten in abwechselnd quadratischem und rechteckigem Format betont. Die klare Fassadengestaltung wird durch die Rahmenprofile der Fenster sowie die Attikableche aus Aluminium und einzelne Sichtbetonelemente ergänzt.

Die Qualität der von Hans Scharoun geschaffenen Architektur wurde früh erkannt, sodass das Gebäude bereits 1989 als einzigartiges Beispiel für das organische Bauen in Deutschland unter Denkmalschutz gestellt wurde.[02],[09],[10],[96]

Literatur:
[02] Barthmann, K., Curti, R., Froberg, N. (2013)
[09] Brenne, W. et al. (2016)
[10] Brinkmann, U. (2016)
[96] Schönwetter, C. (2016)

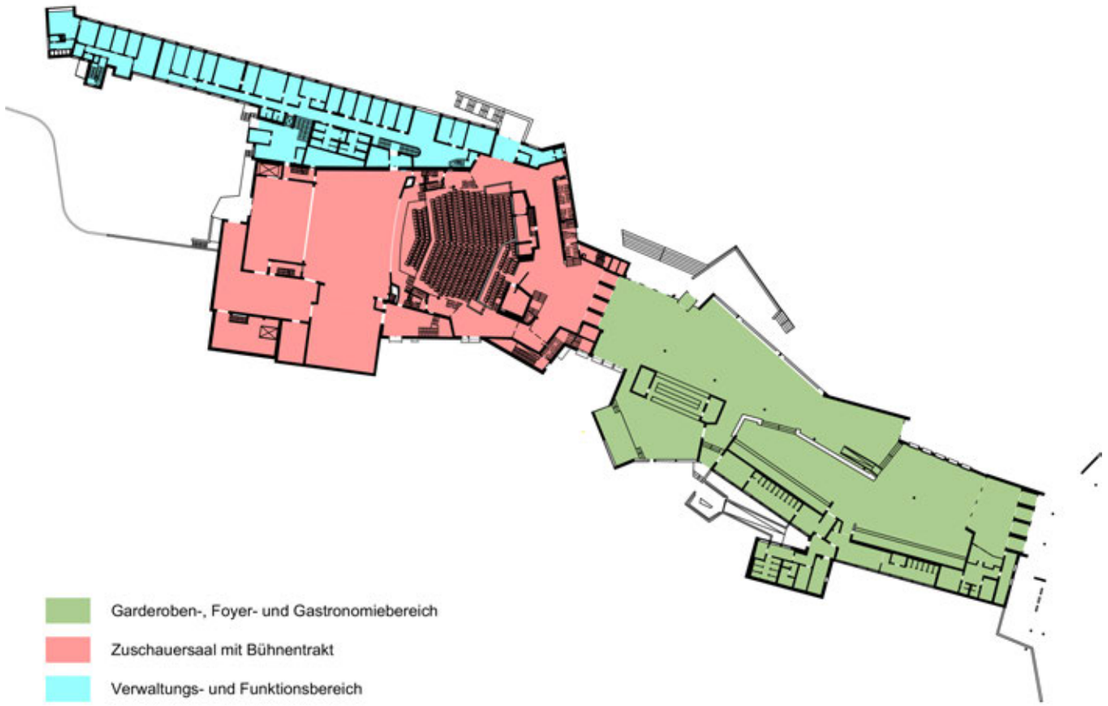

Abb. 215 Funktionale Gliederung des Baukörpers

9.2 Durchführung der Sanierung

9.2.1 Sanierungsmaßnahmen

Seit der Erbauung des Scharoun Theaters im Jahre 1973 waren keine größeren Sanierungsmaßnahmen erfolgt, sodass sich das Gebäude weitestgehend im Originalzustand befand. Vor Beginn der Sanierung erfolgte zunächst der Abgleich des baulichen Zustands mit den heutigen Anforderungen. Die Bestandsaufnahme zeigte Handlungsbedarf bezüglich der Nutzungs- und Betriebsabläufe sowie der Gebäude- und Bühnentechnik. Unter Berücksichtigung des Denkmalschutzes wurde ein Sanierungskonzept erstellt, das unterschiedliche Tiefen der geplanten baulichen Maßnahmen vorsah und die Bauteile ohne Beeinträchtigung der Gestaltung erhalten oder wiederherstellen sollte.

Zu den Instandsetzungsmaßnahmen zählten kleine Reparaturen wie die Reinigung der Oberflächen im Zuschauersaal und die Aufarbeitung der Originalbestuhlung.

Im Zuge der Renovierung wurden Abhangdecken und Bodenbeläge erneuert sowie Leuchtmittel im Foyer und Zuschauersaal ausgetauscht. Des Weiteren waren im Vorfeld Schwachstellen in der Gebäudehülle, durch die hohe Transmissionswärmeverluste zu verzeichnen waren, mittels Thermografie ermittelt worden. Um diese zu verringern, wurde die Gebäudehülle durch eine Dachdämmung, eine Dämmung des Sockelbereichs, eine Innendämmung im Verwaltungsbereich sowie den Austausch der Verglasung energetisch ertüchtigt.

Zur Verbesserung der Nutzung und der Betriebsabläufe wurden unter dem Punkt „Weiterbauen und Hinzufügen“ erforderliche Umbauten und bauliche Ergänzungen im Sinne Scharouns vorgenommen. Zum einen wurde der Kassenbereich umgestaltet und zum anderen wurde den heutigen Anforderungen an die Barrierefreiheit durch den Einbau von Rampen im Eingangsbereich sowie der Schaffung von behindertengerechten Sitzplätzen im Zuschauersaal Rechnung getragen. Außerdem wurden zusätzliche Sanitärbereiche durch einen Anbau an der Hangseite geschaffen. Dort wurde auch ein neuer Raucherpavillon erbaut, der das bisherige Provisorium ersetzt. Zudem wurde eine unterirdische Löschwasserzisterne angelegt, die notwendig geworden war, da eine Nutzung der Trinkwasserversorgung im Brandfall nicht mehr zulässig ist. Im Rahmen dessen wurden die Flächen für Bühne und Gebäudetechnik erweitert, um bessere Abläufe im Spielbetrieb zu gewährleisten. Insgesamt wurde so eine zusätzliche Nettogrundfläche von 570 m^2 sowie ein Gebäudevolumen von 2.206 m^3 geschaffen.

Unter dem Punkt „Ertüchtigung“ wurden Erneuerungen der technischen Infrastruktur und den Technikzentralen durchgeführt. Im Bereich der Gebäudetechnik verursachten unter anderem die fehlende Dämmung der Rohrleitungen und die ineffizienten Heizungskomponenten hohe Netzverluste, die zu einer ganzjährig hohen Wärmegrundlast in Höhe von ca. 50.000 kWh/Monat führten. Im Zuge der baulichen Maßnahmen wurden die Rohrleitungen gedämmt sowie auch die zentrale Trinkwarmwasserbereitung größtenteils zurückgebaut und durch eine dezentrale elektrische Trinkwarmwasserbereitung ersetzt. Des Weiteren wurde bei den Lüftungsanlagen eine Wärmerückgewinnung eingebaut. Diese Maßnahmen bedingten die Verringerung des Verbrauchs für Heizung und Warmwasser und führten zu einer reduzierten Anschlussleistung an das Fernwärmenetz. Aufgrund der veralteten Haus- und Bühnentechnik verzeichnete das Haus vor der Sanierung auch eine hohe Stromgrundlast von ca. 15.000 kWh/Monat. Um dieser entgegenzuwirken, wurde eine neue Kompressionskältemaschine mit höherer Anlageneffizienz und regenerativer Rückkühlung durch die Nutzung des Sprinklertanks installiert. Zudem erfuhr die Bühnentechnik, zu welcher die Bühnenbeleuchtung, die Video- und Audiotechnik, die Transportanlagen und die Bühnenmaschinerie

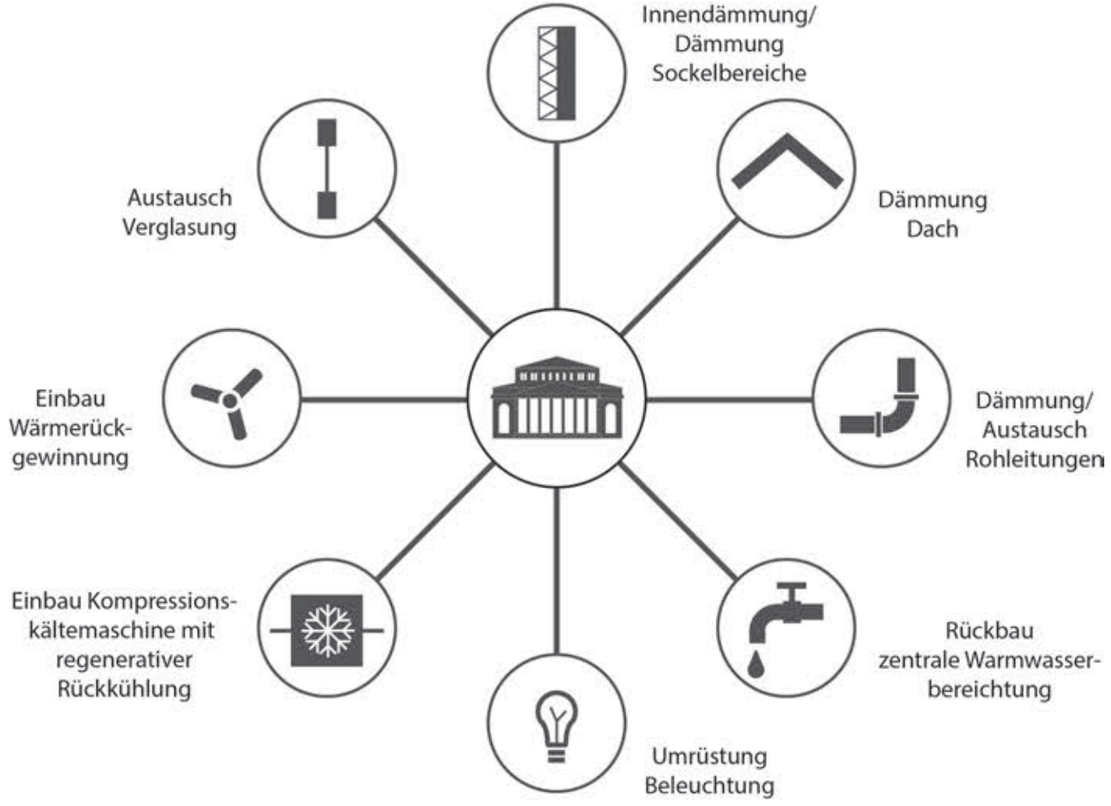

Abb. 216 Sanierungsmaßnahmen im Scharoun Theater Wolfsburg

zählen, eine Modernisierung. Zusätzlich bewirkte die Erneuerung der Elektroinstallationen sowie die Umrüstung der Beleuchtung im Foyer und Zuschauerraum auf LED-Technik eine Reduktion des Stromverbrauchs.
Aufgrund der Komplexität der geplanten Baumaßnahmen hatte die Stadt Wolfsburg diese an einen Generalplaner übergeben. Im Zeitraum von 2014 bis 2015 wurden die Baumaßnahmen in einer 18-monatigen Bauphase unter Leitung des Architekturbüros „Brenne Architekten“ durchgeführt. Die Kosten für die Sanierungsmaßnahmen betrugen insgesamt 29,75 Mio. Euro.[09],[13],[38],[40],[114]

Literatur:
[09] Brenne, W. et al. (2016)
[13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009a)
[38] DIN-Normenausschuss Bauwesen (2016)
[40] energydesign braunschweig GmbH (2013)
[114] Wirtschaft und Verkehr, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2017)

9.2.2 Energetische Zielsetzung

Mit den umfangreichen Sanierungsmaßnahmen strebte die Stadt Wolfsburg trotz des Denkmalschutzes hohe energetische Einsparungen an. Die Mittelwerte des Endenergieverbrauchs über die Jahre 2009 bis 2011 ergaben vor der Sanierung einen Verbrauch von jährlich 429.333 kWh Strom und 1.693.000 kWh Fernwärme. Bezogen auf die Nettogrundfläche von 9.919 m² entspricht dies einem spezifischen Stromverbrauch von 43,3 kWh/(m²a) und einem spezifischen Fernwärmeverbrauch von 170,7 kWh/(m²a). Stellt man diesen Werten die Energieverbrauchskennwerte für die Nutzung „Opernhäuser, Theatergebäude“ aus der „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ gegenüber, so überschritt das Scharoun Theater Wolfsburg diese deutlich. Gemäß EnEV 2009 ist ein Stromverbrauch von 40 kWh/(m²a) zum Vergleich anzusetzen, welchen das Scharoun Theater Wolfsburg um 8,3% überstieg. Der Vergleichswert für Heizung und Warmwasser von 110 kWh/(m²a) wurde sogar um 55,2% überschritten.
Durch die Sanierungsmaßnahmen sollte der jährliche Stromverbrauch auf 359.000 kWh, bzw. 36,2 kWh/(m²a) reduziert werden, was einer Unterschreitung der EnEV-Vergleichswerte von 2009 um 9,5% entspricht. So sollte eine Stromeinsparung von 16,4% gegenüber dem Stand vor der Sanierung erzielt werden. Zum einen soll diese Einsparung durch eine effizientere Kühlung des Gebäudes durch Einbau einer neuen Kompressionskältemaschine erreicht werden und zum anderen durch die Umstellung eines Großteils der Beleuchtung auf LED. Die Beleuchtungsumstellung trägt mit 57,1% der Stromeinsparung und einer Reduktion von 40.000 kWh/a den größten Anteil bei. Die restlichen 42,9% in Höhe von 30.000 kWh/a sollen durch die effizientere Kühlung erzielt werden.
Das Einsparpotential im Bereich Heizung und Warmwasser ergibt sich aus Maßnahmen an der Lüftungsanlage sowie der Gebäudehülle, sodass eine Verringerung des jährlichen Verbrauchs um 31,4% auf 1.239.504 kWh/a, bzw. 125,0 kWh/(m²a) erzielt werden konnte. Dennoch wurde hier der Vergleichswert nach EnEV 2009 weiterhin mit 13,6% überschritten. Einen Beitrag von 94.286 kWh/a und 20,8% an der Einsparung für Heizung und Warmwasser leistete der Einbau einer Wärmerückgewinnung. Die Maßnahmen an der Gebäudehülle untergliedern sich in vier Bereiche: Mit der Dämmung des Dachs sollten 212.144 kWh/a eingespart werden. Diese Maßnahme birgt mit einem Anteil von 46,8% das größte Einsparpotential. Der Austausch der Verglasung bietet ein Einsparpotential von 58.475 kWh/a und stellt damit einen Anteil von 12,9%. Durch die Dämmmaßnahmen im Gründungsbereich konnten 47.143 kWh/a eingespart werden. Dies entspricht einem Anteil von 10,4%. Der restliche Anteil wurde mit 9,1% und einer Einsparung von 41.250 kWh/a über die Innenwanddämmung im Verwaltungsbereich erzielt.
Bei Betrachtung des Energieverbrauchs des Scharoun Theaters Wolfsburg auf primärenergetischer Ebene liegt dieser bei jährlich 2.180.447 kWh, bzw. 219,9 kWh/(m²a). Dieser setzt sich aus einem Anteil am Endenergieverbrauch von 47,3% für Strom, der zum Zeitpunkt der Planungen der Sanierungsmaßnahmen mit einem Primärenergiefaktor von 2,4 bewertet wurde, und 52,7% für Heizung und Warmwasser zusammen. Die Energie hierfür wird über Fernwärme bereitgestellt, die vor Ort einen Primärenergiefaktor von 0,679 besitzt. Im Laufe der Sanierungsmaßnahmen wurde der Primärenergiefaktor für Strom aufgrund der Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien im allgemeinen Strommix auf 1,8 reduziert. Auch der Primärenergiefaktor für die Fernwärmeerzeugung des Kraftwerks vor Ort wurde auf 0,485 gesenkt, sodass sich der Primärenergieverbrauch unabhängig von den Sanierungsmaßnahmen rechnerisch um 26,9% auf 1.594.276 kWh/a und 160,7 kWh/(m²a) verringerte. Durch die Sanierungsmaßnahmen erfolgte eine weitere Reduktion des Primärenergieverbrauchs entsprechend 24,4% auf 1.247.661 kWh/a, bzw. 125,8 kWh/(m²a).
Neben den energetisch wirksamen Maßnahmen sah die Sanierung auch eine Erweiterung des Gebäudebestands um 571 m² Nettogrundfläche vor. Für die Erweiterungsbauten wurde ein jährlicher Strombedarf von 2.668 kWh, bzw. 4,7 kWh/(m²a) und ein Bedarf für Heizung uns Warmwasser von 42.984 kWh, bzw. 75,3 kWh/(m²a) berechnet. Bei einer Zusammenfassung des Endenergiebedarfs für das Gesamtgebäude nach der Sanierung ergibt sich so ein absoluter Strombedarf von 361.736 kWh/a und ein spezifischer Bedarf von 34,5 kWh/(m²a). Für Heizung und Warmwasser liegt dieser bei 1.282.859 kWh/a und 122,3 kWh/(m²a). Obwohl sich der absolute Primärenergieverbrauch durch die Erweiterungsbauten um 2,1% auf 1.273.311 kWh/a erhöht hat, ist der spezifische Primärenergieverbrauch nochmals um 3,5% auf 121,4 kWh/(m²a) gesunken.

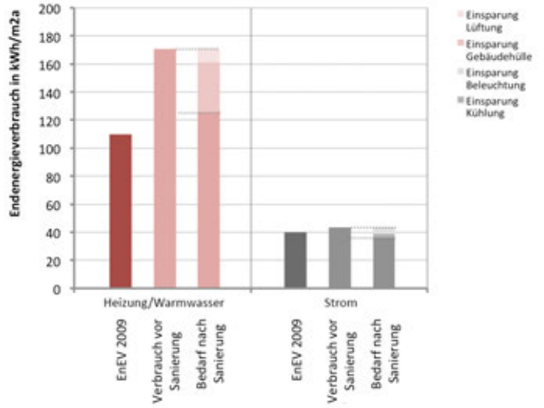

Abb. 210 Energetische Zielsetzung für das Scharoun Theater

9.3 Zustand nach der Sanierung

9.3.1 Nutzung

Das Scharoun Theater Wolfsburg wird als Gastspieltheater betrieben. Im Falle eines Gastspielbetriebs werden Produktionen externer Theaterbetriebe eingekauft, sodass kein regelmäßiger Proben- und Werkstattbetrieb im Haus stattfindet. Dies wirkt sich auch auf die Flächennutzungsstruktur aus [siehe 9.3.2].

Das Theater lässt sich in mehrere Bereiche aufteilen, die mit unterschiedlicher Intensität und zu verschiedenen Zeiten bespielt werden. Die zuschauerfrequentierten Bereiche wie Foyer und Zuschauersaal werden fast ausschließlich während Veranstaltungen genutzt. Diese finden an drei Orten im Haus statt. Zum einem dient hierzu das Foyer, welches flexibel bespielbar ist, zum anderen die Hinterbühne, die eine Kapazität von 200 Personen fasst und schlussendlich das Große Haus.

Die Zuschauerkapazität des Großen Hauses wird mit 745 Sitzplätzen berechnet, kann aber je nach Veranstaltungsart durch die Überdeckung des Orchestergrabens auf 833 erweitert werden. Insgesamt fanden im Großen Haus im Betrachtungszeitraum 125 Veranstaltungen statt, die von 67.302 Zuschauern besucht wurden. Dies entspricht einer durchschnittlichen Auslastung von 72,9%. Die Vorstellungen lassen sich den Bereichen Musik- und Tanztheater, Schauspiel, Konzert sowie Kinder- und Jugendtheater zuordnen. Weitere Veranstaltungen, wie beispielsweise Lesungen, werden unter Sonstiges zusammengefasst. Den größten Anteil an Veranstaltungen stellte der Schauspielbereich mit 48,8%. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der Weihnachtszeit mit dem Stück „Die kleine Meerjungfrau“ eine Eigenproduktion zur Aufführung kam und insgesamt 30 Mal gespielt wurde. Einen weiteren Schwerpunkt legten Musiktheater mit 19,2% und Konzert mit 17,2%. Die restlichen Bereiche Tanztheater, Sonstiges sowie Kinder- und Jugendtheater wiesen jeweils einen Anteil unter 10% auf.

Bei Betrachtung der Veranstaltungen nach Monaten ist festzustellen, dass der Dezember mit einem Anteil von 30,4% der veranstaltungsstärkste Monat war. Dies drückt sich auch in der Veranstaltungszeit in diesem Monat aus, die 4005 Minuten betrug.

Einhergehend mit der Veranstaltungsdichte im Dezember besuchten mit einer Anzahl von 25.066 sogar 37,2% der gesamten erfassten Besucher das Theater in diesem Zeitraum. Im Dezember war auch die Auslastung mit 88,5%, abgesehen vom Monat März, besonders hoch. Während der Theaterferien im Juli und August fanden dagegen keine Veranstaltungen statt.

Die Analyse der Veranstaltungen nach Wochentagen zeigt, dass der geringste Anteil der Vorstellungen mit 8,0% montags erfolgte. Es erfolgt eine kontinuierliche Steigerung zum Wochenende hin, sodass der höchste Anteil freitags mit 17,6% erreicht wurde. Im

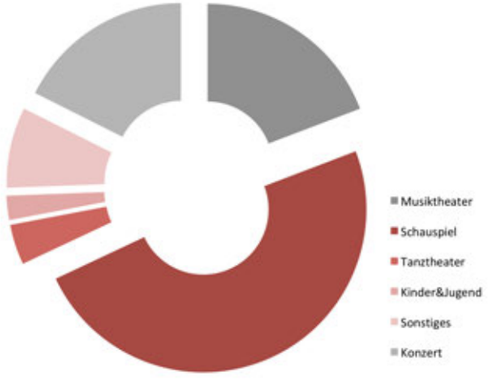

Abb. 217 Anteilige Genre der Veranstaltungen im Betrachtungszeitraum

Vergleich zum Wochenende fanden an den einzelnen Wochentagen mit Ausnahme des Montags mehr Veranstaltungen statt.

Bei Betrachtung des Vorstellungsbeginns wird deutlich, dass die meisten Vorstellungen mit einem Anteil von 29,6% um 19.30 Uhr starteten. Mit 21,6% begannen etwas weniger Vorstellungen erst um 20.00 Uhr. Für den Beginn der restlichen Vorstellungen lässt sich kein prägnanter Zeitpunkt feststellen. Die durchschnittliche Dauer einer Vorstellung beträgt im Messzeitraum 117 Minuten.

Ebenso wie der Zuschauersaal wird auch das Foyer nur bei Veranstaltungen genutzt. Dies war im Betrachtungszeitraum an 137 Tagen der Fall. Die Nutzung des Foyers und der dazugehörigen Bereiche beginnt etwa eine Stunde vor Vorstellungsbeginn und endet eine Stunde nach Abschluss der Vorstellung.

In Theaterspielstätten, die im Repertoirebetrieb geführt werden, ist der Bühnenbereich aufgrund von Proben, Einrichtung der Beleuchtung sowie Einrichtungs- und Wartungsarbeiten ganztägig stark frequentiert. Im Scharoun Theater Wolfsburg wird der Bühnenbereich hingegen nur während der Vorstellungen und zur Einrichtung der Stücke verwendet. Wegen des Gastspielbetriebs findet die Einrichtung der Bühne am Tag der Vorstellung durch Mitarbeiter des externen Theaterensembles zwischen 7.00 Uhr und 10.00 Uhr statt. Ebenso erfolgt der Abbau direkt im Anschluss an die Vorstellung. Auch der Betrieb der Kantine ist an die Vorstellungstage gekoppelt.

Eine besonders geringe Nutzung erfahren die Werkstattbereiche, da diese nur bei kurzfristigen Reparaturen verwendet werden. Eine Ausnahme stellt lediglich die Vorbereitung der Eigenproduktion des Weihnachtsmärchens dar. Hier werden die

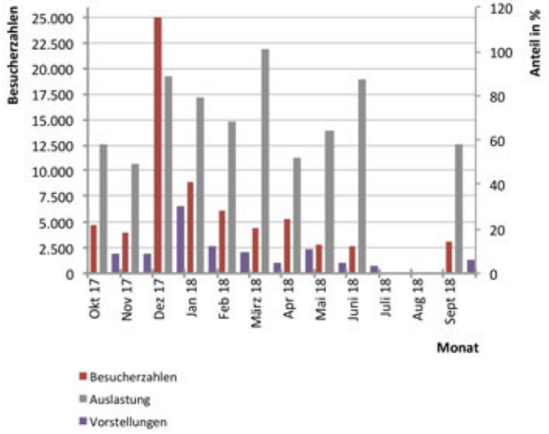

Abb. 218 Besucherzahlen, Auslastung und Anteil der Vorstellungen nach Monaten[*1]

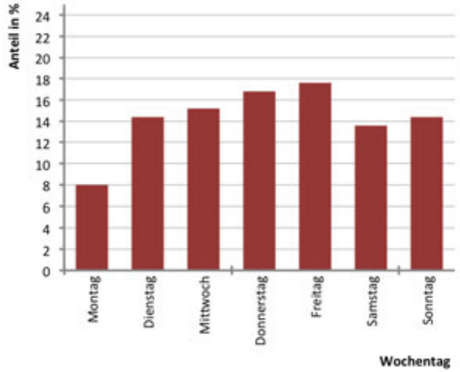

Abb. 219 Anteil der Vorstellungen nach Wochentagen

9.3.2 Flächen

Werkstätten etwa zwei bis zweieinhalb Monate täglich für 8 Stunden frequentiert.
Obwohl kein eigenes Ensemble im Scharoun Theater Wolfsburg ansässig ist, wird der Proberaum nachmittags regelmäßig durch externe Gruppen genutzt. Die Nutzung fokussiert sich auf die Wochentage Montag bis Donnerstag und erfolgt für etwa dreieinhalb bis vier Stunden.
Der einzige Bereich, der regelmäßig und kongruent zu Repertoiretheatern frequentiert wird, ist der Verwaltungsbereich. Dieser wird wochentags zwischen 8.30 Uhr und 17.00 Uhr genutzt.
Einen großen Unterschied zu Theaterspielstätten, die als Repertoirebetrieb geführt werden, stellt somit die geringe Nutzungsauslastung der Räumlichkeiten eines Gastspieltheaters dar. Diese zeigt eine starke Abhängigkeit von den Veranstaltungstagen.

[*1] Inklusive Stehplätze kann die Auslastung, die an den vorhandenen Sitzplätzen gemessen wird, über 100% betragen

Die gesamte Nettogrundfläche des Scharoun Theaters Wolfsburg beträgt 10.491 m². Im Vergleich zur durchschnittlichen Nettogrundfläche der im Zuge der Querschnittserhebung betrachteten Theaterspielstätten [siehe 5.1.1] liegt das Scharoun Theater um 3.230 m² unter dem Durchschnitt und zählt somit zu den Theaterspielstätten mittlerer Größe.
Ebenso fällt auch die Nettogrundfläche pro Sitzplatz mit 12,6 m² gegenüber 15,6 m² geringer aus. Der geringere Wert weist darauf hin, dass weniger Flächen zur Vorbereitung von Vorstellungen zur Verfügung stehen. Vor dem Hintergrund, dass es sich beim Scharoun Theater um eine Spielstätte ohne eigenes Ensemble handelt und somit kaum Eigenproduktionen entstehen, sind geringere Werkstatt- und Probenflächen, aber auch weniger Aufenthalts- und Garderobenbereiche für künstlerisches und technisches Personal erforderlich. Dies wird bei Gegenüberstellung der 13 Zonen [siehe 5.1.3] aus dem Durchschnitt der Querschnittserhebung und der Flächenerfassung des Scharoun Theaters deutlich. Während sich die Zonen für Lager- und Technikbereiche, aber auch für Foyer, Theatersaal und Bühne nur wenig voneinander unterscheiden, entfallen auf die oben genannten Bereiche deutlich geringere Flächenanteile. Die Werkstattflächen betragen im Scharoun Theater lediglich 2,3%. Im Gegensatz dazu liegen sie innerhalb der Querschnittserhebung bei 5,5%. Die Flächen für Proberäume stellen im Scharoun Theater mit einem Anteil von 2,2% gegenüber der Querschnittserhebung nur etwa ein Drittel der gesamten Gebäudenutzfläche. Gleiches gilt für Aufenthaltsräume des Personals, die im Scharoun Theater nur einen Flächenanteil von 0,7% besitzen. Geringer ist der Unterschied bei den Flächenanteilen für Künstlergarderoben und Verwaltung. Diese bilden im Scharoun Theater nur etwa die Hälfte des Flächenanteils der im Zuge der Querschnittserhebung erfassten Repertoiretheater.
Im Verhältnis zur Querschnittserhebung fällt im Scharoun Theater nur der Anteil für Verkehrsflächen deutlich höher aus. Dieser beträgt mit 27,2% mehr als ein Viertel der gesamten Nettogrundfläche, während der Anteil der Verkehrsfläche innerhalb der Querschnittserhebung nur bei 19,4% liegt und somit etwa ein Fünftel der Fläche ausmacht. Der große Unterschied ist darüber zu erklären, dass das Scharoun Theater Wolfsburg über eine einzigartige Kubatur verfügt. Im Gegensatz zu den anderen betrachteten Theaterspielstätten handelt es sich hier nicht um einen kompakten, sondern um einen langgestreckten linearen Baukörper, der sich mit Ausnahme des Bühnenhauses nur über zwei Ebenen erstreckt und somit längere Erschließungswege erfordert.
Nach [5.1.3] lassen sich die 13 Zonen in die drei Bereiche „repräsentativ“, „zentral“ und „funktional“ zusammenfassen. Bei einem Vergleich zwischen den zugeordneten prozentualen Anteilen aus der Querschnittserhebung und dem Scharoun Theater wird deutlich, dass sich diese nur wenig voneinander unterscheiden. Gerade der repräsentative sowie der zentrale Bereich zeigte bei den zugeordneten Zonen, die vor allem Foyer, Theatersaal und Bühne umfassen, nur geringe Unterschiede, die sich auch in den Bereichsanteilen wiederspiegeln. Im funktionalen Bereich zeigten sich zwischen den zugeordneten Zonen große Unterschiede. Da hierunter jedoch zum einen die Zonen mit geringerem Flächenanteil gegenüber der Querschnittserhebung wie Werkstätten und Proberäume fallen, zum anderen aber auch die Verkehrsfläche, die einen stark erhöhten Flächenanteil aufweist, gleichen sich diese Unterschiede innerhalb des Bereichs aus.
Festzuhalten ist somit, dass sich bei Betrachtung der Flächenanteile der einzelnen Zonen die Betriebsform der Theaterspielstätten abzubilden scheint.

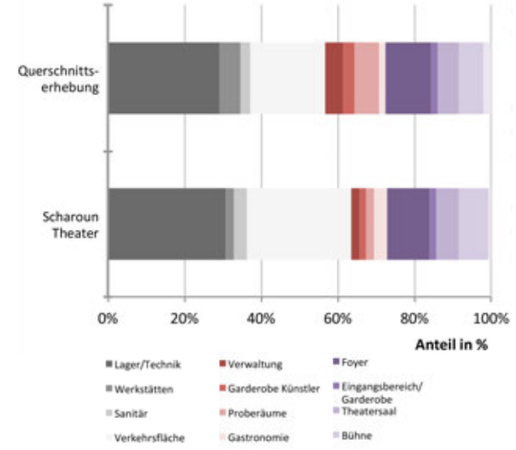

Abb. 220 Flächenanteile der Zonen aus dem Scharoun Theater Wolfsburg gegenüber der Querschnittserhebung

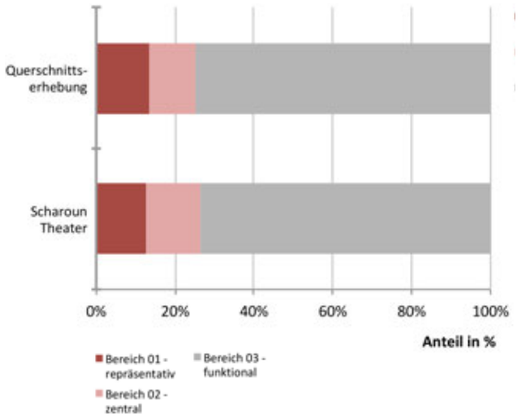

Abb. 221 Flächenanteile der Organisationsbereiche aus dem Scharoun Theater Wolfsburg gegenüber der Querschnittserhebung

9.3.3 Konstruktion und Thermische Gebäudehülle

Beim Bau des Scharoun Theaters Wolfsburg wurden vorrangig die Materialien Stahlbeton, Stahl, Aluminium, Glas und Naturstein zur Konstruktion und Gestaltung verwendet. In allen Bereichen des Theaters sind die Wände mit Stahlbeton ausgeführt und dienen vertikal als tragendes Element. Im Foyer und Verwaltungstrakt wurden vereinzelt Teilbereiche als Sichtbetonelemente belassen. Überwiegend erfolgte jedoch eine Verkleidung der Fassaden mit Natursteinplatten. In der zweigeschossigen Sockelzone, die Foyer- und Verwaltungsbereich umfasst, bestehen die rechteckigen und hochkant angebrachten Natursteinplatten aus hellbeigem Travertin. Um dieses auch gestalterisch abzuheben und eine monolithische Wirkung zu erzielen, wurde das Bühnenhaus mit dem grauen Kalksedimentgestein Ceppo di Gre verkleidet. Hier sind die Natursteinplatten abwechselnd querrechteckig und quadratisch angeordnet. Die Befestigung der hinterlüfteten Natursteinplatten an den tragenden Stahlbetonwänden erfolgte über rostfreie Edelstahlanker, die in die horizontalen Fugen eingebracht wurden. Im Bereich des Foyers und Verwaltungstrakts wurde auf weitere Dämmung verzichtet, da man sich dort in den 70er Jahren aufgrund des Einsatzes eines Thermocrete-Betons eine ausreichende Dämmwirkung versprach. Da diese jedoch sehr gering ist, erfolgte im Verwaltungstrakt eine energetische Nachrüstung der Außenwände über eine Innendämmung in Form von Kalziumsilikatplatten. Aus gestalterischen und denkmalpflegerischen Gründen waren solche Maßnahmen im Foyerbereich jedoch nicht möglich. Anders als der Foyer- und Verwaltungsbereich besaß das Bühnenhaus hinter der Natursteinverkleidung bereits eine 4cm dicke Dämmschicht aus Mineralwolle. Als besondere energetische Schwachstelle der Fassade hat sich die Konstruktion im Sockelbereich herausgestellt. Als Übergang zum Gelände sind die Natursteinplatten abgetreppt, sodass der ungedämmte Beton im Sockelbereich zwischen 5 und 20cm sichtbar war. Um diese energetische Schwachstelle zu beheben, wurde im Bereich des Foyers sowie der Verwaltung bis zu einer Höhe von maximal 50cm eine Dämmung aufgebracht.

Im Innenraum ist die Stahlbetonkonstruktion der Wände nur in einigen wenig frequentierten Funktionsbereichen sichtbar. In den übrigen Bereichen sind diese entweder mit unterschiedlichen Hölzern verkleidet oder mit Gipsputz versehen.

Die Öffnungen in den unterschiedlichen Bereichen sind, wie auch bereits die Wandkonstruktion, unterschiedlich gestaltet. Das Bühnenhaus verfügt außer dem großformatigen Fenster zum hinteren Bereich des Zuschauersaals über keine weiteren prägnanten Öffnungen. Dieses Fenster ist als Kastenfenster ausgebildet und besteht aus zwei Verglasungsebenen, die im Abstand von anderthalb Metern angeordnet sind und somit einen begehbaren Zwischenraum erzeugen. Die innere Verglasungsebene besitzt einen Rahmen mit

Bauteil	Material	Dicke in m	U-Wert (W/m2K)
Außenwand Erdreich Verwaltung (v.i.n.a.)	Thermocrete-Beton	0,286	
	Abdichtung Bitumen	0,003	
	Gesamt	*0,289*	*1,71*
Außenwand Luft Verwaltung (v.i.n.a.)	Gipsputz	0,01	
	Kalziumsilikatplatte	0,042	
	Thermocrete-Beton	0,331	
	Luftschicht	0,075	
	Natursteinfassade	0,03	
	Gesamt	*0,488*	*0,229*
Außenwand Luft Bühnenhaus (v.i.n.a.)	Beton	0,29-0,34	
	Wärmedämmung Mineralwolle	0,04	
	Luftschicht	0,035	
	Natursteinfassade	0,03	
	Gesamt	*0,395-0,445*	*0,354-0,350*
Außenwand Luft Foyer (v.i.n.a.)	Thermocrete-Beton	0,31	
	Luftschicht	0,075	
	Natursteinfassade	0,03	
	Gesamt	*0,415*	*0,267*
Außenwand Erdreich Anbau NW (v.i.n.a.)	Stahlbeton	0,3	
	XPS-Perimeterdämmung	0,1	
	Abdichtung Bitumen	0,003	
	Gesamt	*0,403*	*0,315*
Außenwand Erdreich Anbau SW (v.i.n.a.)	Stahlbeton	0,3	
	XPS-Perimeterdämmung	0,08	
	Abdichtung Bitumen	0,003	
	Gesamt	*0,383*	*0,384*
Außenwand Luft Anbau SW (v.i.n.a.)	Stahlbeton	0,3	
	Wärmedämmung Mineralwolle	0,12	
	Luftschicht	0,04	
	Natursteinfassade	0,03	
	Gesamt	*0,49*	*0,434*

Abb. 222 Konstruktion der Außenwände

Abb. 223 Außengestaltung des Scharoun Theaters Wolfsburg [Bildquelle: © Lars Landmann]

Kastenfenster Zuschauersaal	Glas innen: Ornamentgläser in Stahlsprossen-Konstruktion	-	
	begehbarer Luftzwischenraum	1,5	
	Glas außen: Klarglas, 2-Scheiben-Isolierverglasung in Aluminiumrahmen	-	
	Gesamt	-	...
Fenster allgemein	2-Scheiben-Isolierverglasung, Dichtungserneuerung	-	
	Gesamt	-	...
Fenster Foyer	2-Scheiben-Isolierverglasung, neue Rahmen	-	
	Gesamt	-	...

Abb. 224 Konstruktion der Fenster

Dach Verwaltung	Abdichtung EVA-Folie	-	
(Trapezblechdach auf Stahlträgern)	Mineralwolle WLG 037, Gefälledämmung 2%	0,2	
(v.o.n.u.)	Bitumen-Dampfsperre	0,04	
	Stahl-Trapezblech (T90/167D)	0,09	
	Gesamt	*0,33*	*0,173*
	Stahlträger	H=0,23	
	Installationsebene	0,079	
	Gipskarton	0,051	
Dach Bühnenhaus	Abdichtung EVA-Folie	-	
(v.o.n.u.)	Mineralwolle WLG 037, Gefälledämmung 2%	0,2	
	Bitumen-Dampfsperre	0,04	
	Stahlbeton	0,19-0,24	
	Gesamt	*0,43-0,48*	*0,171-0,170*
	Stahlträger	0,28	
Dach Foyer	Abdichtung EVA-Folie	-	
(v.o.n.u.)	Mineralwolle WLG 037, Gefälledämmung 2%	0,2	
	Bitumen-Dampfsperre	0,04	
	Stahl-Trapezblech (T90/167D)	0,09	
	Gesamt	*0,33*	*0,173*
	Stahlträger	0,23	
	Installationsebene	0,47	
	Akustikdecken (Mineralfaserplatten?)	0,03	
Dach Anbau NW Erdreich	bituminöse Abdichtung	-	
(v.o.n.u.)	XPS-Perimeterdämmung	0,199	
	Gefälleestrich, 1,5%	0,09	
	Stahlbeton	0,251	
	Gesamt	*0,54*	*0,167*
Dach Anbau NW Luft	Abdichtung EVA-Folie	-	
(v.o.n.u.)	Mineralwolle WLG 037, Gefälledämmung 2%	0,22	
	Stahlbeton	0,25	
	Gesamt	*0,47*	*0,161*
Dach Anbau SW	Abdichtung EVA-Folie	-	
(v.o.n.u.)	Mineralwolle WLG 037, Gefälledämmung 2%	0,22	
	bituminöse Abdichtung	-	
	Stahlbeton	0,3	
	Gesamt	*0,52*	*0,161*
	in Teilbereichen abgehänkte GK-Decke	0,339	
	Gipskarton	0,06	

Abb. 225 Konstruktion der Dächer

geometrischer Sprosseneinteilung aus Stahl und wurde im Zuge der Sanierung weitestgehend unverändert belassen. Bei der äußeren Ebene ist die Verglasung dagegen in Aluminiumprofile eingefasst. Während die Aluminiumprofile belassen werden konnten, wurde die Verglasung durch eine effizientere Zweischeiben-Isolierverglasung ersetzt. Im Verwaltungsbereich handelt es sich um eine Lochfassade. Die Stürze werden als Sichtbetonelemente sichtbar, sind jedoch als L-Fertigteile ausgebildet, die mit einer Styropordämmung ausgefüllt sind. Auch in diesem Bereich wurden die Aluminiumprofile erhalten, sodass lediglich ein Austausch der Verglasung stattfand. Das Foyer verfügt über große verglaste Flächen, die zwischen den Wandscheiben eingesetzt sind. Auch hier wurde die alte Verglasung durch eine neue Wärmeschutzverglasung ersetzt. Um eine zusätzliche Erhöhung der Sonnen- und Wärmeschutzfunktion herbeizuführen, besitzt das Glas eine besondere Beschichtung.

Bei den Dachaufbauten kann zwischen zwei unterschiedlichen Konstruktionsweisen differenziert werden. Das Dach des Bühnenhauses ist als Stahlbetondecke konstruiert, während im Foyer- und Verwaltungsbereich Stahlträger über den Stahlbetonwänden sowie in der Mitte des Raumes verlaufenden Stahlbetonstützen aufgespannt sind, auf denen ein Stahltrapezblech aufgelegt ist. Besonders bei dieser Konstruktion bestanden vor der Sanierung konstruktive Mängel, die zu einem großen Wärmeverlust führten. Diese lagen darin begründet, dass an den Dachkanten oftmals offene Rippen des Trapezblechs vorhanden waren. Darüber hinaus wurden punktuell Durchfeuchtungen und Hohlstellen festgestellt. Dies, sowie die geringe Dämmung der Dachflächen mit nur 6cm Styropor und der Ausführung als Foliendach, führte dazu, dass im Zuge der Sanierung eine komplette Erneuerung des Dachaufbaus erfolgte. Auf die jeweilig vorhandene Konstruktion wurde zunächst eine Schicht aus Bitumen als Dampfsperre aufgebracht, anschließend folgte eine Dämmschicht aus Mineralwolle, die im Durchschnitt 20cm beträgt und abschließend wurde das Dach mit Folie abgedichtet. Um einen Abschluss zur Wand herzustellen, wurde die Attika wieder mit den bauzeitlichen Aluminiumblechen verkleidet.

Ebenso wie die Konstruktion der restlichen Bauteile bestehen auch Bodenplatten und Geschossdecken hauptsächlich aus Beton. Alle Bodenplatten des Bestandsgebäudes grenzen jeweils ungedämmt an das Erdreich. Lediglich die Aufbauten unterscheiden sich. Im Verwaltungsbereich sind auf den Stahlbetonuntergrund eine Trittschalldämmung, gefolgt von Zementestrich und ein Bodenbelag in Abhängigkeit des Funktionsbereichs aufgebracht. Während in den Garderoben und Fluren ein PVC-Belag verlegt ist, sind vor allem die Büroräume mit einem Nadelfliesteppichboden ausgestattet. Im Gegensatz zum Verwaltungstrakt ist in den zuschauerfrequentierten Bereichen wie dem Foyer und dem Zuschauersaal, direkt auf die Stahlbetondecke ein Estrich aufgebracht, der aus akustischen Gründen mit einem Teppich belegt ist. Eine Ausnahme bildet lediglich der Eingangsbereich. Hier wurde der Teppichboden durch einen Quarzitbelag ersetzt.

Ebenso wie der Bodenbelag ist die Ausgestaltung der sichtbaren Decken je nach Funktionsbereich unterschiedlich ausgestaltet. Im Zuschauersaal befindet sich eine Rabitzdecke. Hierbei handelt es sich um ein verputztes Drahtgeflecht, das an einem Stahlgerüst abgehangen ist. Das Foyer dagegen besitzt eine Verkleidung der Deckenkonstruktion mit Mineralfaserplatten. Durch die besondere Struktur sowie der Mikrolochung wird eine Verbesserung der Raumakustik herbeigeführt. In den Fluren des Verwaltungstrakts bestanden ebenfalls Anforderungen an die Akustik. Daher sind in diesen Bereichen Akustikabhangdecken installiert. Die Funktionsräume im Verwaltungstrakt, zu denen vor allem Büroräume und Garderoben gehören, sind mit Gipskartondecken versehen.

Geschossdecke UG Verwaltung	Fliesen, Zementestrich, Trittschalldämmung	0,07	
(v.o.n.u.)	Stahlbeton	0,15	
	Gesamt	*0,22*	*1,2*
Geschossdecke UG Verwaltung	Teppich, Zementestrich, Trittschalldämmung	0,1	
(v.o.n.u.)	Stahlbeton	0,15	
	Gesamt	*0,25*	*0,6*
Geschossdecke UG Verwaltung	Linoleum, Zementestrich, Trittschalldämmung	0,12	
(v.o.n.u.)	Stahlbeton	0,15	
	Gesamt	*0,27*	*0,7*
Geschossdecke KG Verwaltung	Teppich, Zementestrich, Trittschalldämmung	0,08	
(v.o.n.u.)	Stahlbeton	0,2	
	Gesamt	*0,28*	*0,7*
Geschossdecke KG Verwaltung	Linoleum, Zementestrich, Trittschalldämmung	0,06	
(v.o.n.u.)	Stahlbeton	0,229	
	Gesamt	*0,289*	*1,1*
	Installationsebene AD	0,22	
	Gipskarton AD	0,05	
Geschossdecke KG Verwaltung	Laminat, Zementestrich, Trittschalldämmung	0,09	
(v.o.n.u.)	Stahlbeton	0,05	
	Gesamt	*0,14*	*0,859*
	Stahlbetonunterzüge	0,22	
	Installationsebene	0,19	
	Gipskarton	0,05	
Geschossdecke Bühnenhaus	Stahlbeton	0,21-0,41	
(v.o.n.u.)	*Gesamt*	*0,21-0,41*	*4,323-3,142*
Geschossdecke Bühnenhaus	Metalldielen, gummierte Beschichtung	0,04-0,08	
(v.o.n.u.)	Stahlbeton	0,23-0,26	
	Gesamt	*0,27-0,34*	*3,702-3,522*
Bühnenboden	Holzdielen, schwarz gestrichen	0,05	
(v.o.n.u.)	Konstruktionsschicht	0,06	
	Gesamt	*0,11*	
	Stahlträger	H=0,15-0,32	...
Boden Zuschauersaal	Stahlbetonstufen mit Teppichbelag	0,28-1,4	
(v.o.n.u.)	*Gesamt*	*0,28-1,4*	*2,024-1,015*
Bodenplatte Verwaltung	Zementestrich	0,04	
(v.o.n.u.)	Beton	0,2	
	Gesamt	*0,24*	*2,750*
Bodenplatte Bühnenhaus	Beton	0,2	
(v.o.n.u.)	*Gesamt*	*0,2*	*2,985*
Bodenplatte Foyer	Teppich, Zementestrich	0,08	
(v.o.n.u.)	Beton	0,2	
	Gesamt	*0,28*	*1,148*
Bodenplatte Foyer	Naturstein Quarzit im Dickbett	0,08	
(Vorraum, Kassenhalle, Cafeteria)	Beton	0,2	
(v.o.n.u.)	*Gesamt*	*0,28*	*2,704*
Bodenplatte Foyer	hochabriebfeste Beschichtung, Zementestrich	0,04	
(Klimazentrale)	Beton	0,2	
(v.o.n.u.)	*Gesamt*	*0,24*	*2,750*
Bodenplatte Anbau NW	Epoxidharzbeschichtung, WU-Betonsohle	0,4	
(v.o.n.u.)	Frischbetonverbundfolie	-	
	XPS-Perimeterdämmung	0,08	
	Sauberkeitsschicht Magerbeton	0,1	
	Gesamt	*0,58*	*0,291*
Bodenplatte Anbau NW	Epoxidharzbeschichtung, WU-Betonsohle	0,6	
(v.o.n.u.)	Frischbetonverbundfolie	-	
	XPS-Perimeterdämmung	0,08	
	Sauberkeitsschicht Magerbeton	0,1	
	Gesamt	*0,78*	*0,354*
Bodenplatte Anbau NW	Epoxidharzbeschichtung, Hartstoffestrich	0,04	
(v.o.n.u.)	Magerbetonaufüllung	0,61	
	WU-Betonsohle	0,4	
	Frischbetonverbundfolie	-	
	XPS-Perimeterdämmung	0,08	
	Sauberkeitsschicht Magerbeton	0,1	
	Gesamt	*1,23*	*0,312*
Bodenplatte Anbau SW	Keramikfliesenbelag	0,02	
(v.o.n.u.)	Zementestrich	0,06	
	Trittschalldämmung	0,085	
	WU-Betonsohle	0,3	
	Frischbetonverbundfolie	-	
	XPS-Perimeterdämmung	0,08	
	Sauberkeitsschicht Magerbeton	0,105	
	Gesamt	*0,65*	*0,205*

Abb. 226 Konstruktion der Geschossdecken und Bodenplatten

Mittels der Einteilung in Baualtersklassen und Berechnungen wurden der U-Wert vor der Sanierung seitens des beauftragten Ingenieurbüros für die Außenwände zwischen 0,48 bis 0,51 W/m²K, die Fenster mit 2,56 bis 5,11 W/m²K, für das Dach mit 0,5 W/m²K und die Bodenplatte zwischen 1,34 und 3,33 W/m²K ermittelt. Somit konnten heutige Standards bei weitem nicht erfüllt werden. Durch die energetische Sanierung der Bauteile konnte in einigen Bereichen der Wärmedurchgang verringert werden. Insbesondere durch die Sanierung der Dachflächen konnte der U-Wert auf etwa 0,17 W/m²K gesenkt werden.
Die neu hinzugefügten Baukörper orientieren sich an den Standards der EnEV 2009 und weisen somit geringere U-Werte auf. Beide Baukörper besitzen eine zu den Bestandsbauten vergleichbare Konstruktion, jedoch erfolgt jeweils eine stärkere Dämmung der Bauteile nach außen.[02],[09],[40]

Literatur:
[02] Barthmann, K., Curti, R., Froberg, N. (2013)
[09] Brenne, W. et al. (2016)
[40] energydesign braunschweig GmbH (2013)

9.3.4 Gebäudetechnik

9.3.4.1 Heizkonzept und Warmwasserbereitung

Das Heizkonzept und Teile der Warmwasserbereitstellung des Scharoun Theaters Wolfsburg basieren auf der Wärmeversorgung über einen Anschluss an das Fernwärmenetz der Stadt Wolfsburg. Die dort bereitgestellte Wärme wird mittels Kraft-Wärmekopplung im Heizwerk erzeugt und besitzt einen Primärenergiefaktor von 0,485.
Im Scharoun Theater Wolfsburg befinden sich drei Wärmetauscher, mithilfe derer die Wärme aus dem zentralen Fernwärmenetz entnommen wird. Der erste Wärmetauscher mit einer Nennleistung von 300 kW ist für die Beladung des Warmwasserspeichers erforderlich. Über einen Kaltwasseranschluss wird Trinkwasser in den Wärmetauscher eingeleitet, wo dieses erwärmt und anschließend im Warmwasserspeicher, der ein Fassungsvermögen von 1000 l besitzt, bis zur Abnahme eingespeichert wird. Die Abnahmestellen für die zentrale Warmwasserbereitstellung befinden sich in den Sanitärbereichen der Künstler, während die Versorgung der restlichen Abnahmestellen über dezentrale Durchlauferhitzer erfolgt.
Die anderen beiden Wärmetauscher, mit jeweils einer Nennleistung von 475 kW, sind für die Wärmeversorgung des Scharoun Theaters zuständig. Die Verteilung gliedert

Abb. 227 Oberflächengestaltung im Foyer

Abb. 228 Fernwärmeversorgung Scharoun Theater Wolfsburg

Abb. 229 Wärmeversorgung

sich in eine statische und eine dynamische Heizung.
Die statische Heizung umfasst neun Unterverteilungen, durch welche die Bereiche Verwaltung, Bühnenhaus, Zuschauerhaus und Foyer versorgt werden. Insgesamt wird hier eine Nennleistung von 611 kW berücksichtigt. Dieseistjedochnichtgleichmäßigaufdie Unterverteilungen aufgegliedert. Die größte Anschlussleistung besitzt „H4 Bühnenhaus Deckenheizung 1-3“ mit 141 kW. Besonders gering ist diese mit 7 kW dagegen bei „H8 Unterverteilung Fußbodenheizung Foyer“. In den meisten Heizkreisen werden überwiegend Heizkörper zur Wärmeübergabe verwendet, jedoch kommen vereinzelt auch andere Wärmeübergabesysteme zum Einsatz. Hierzu zählt die Holzwerkstatt, in welcher der Erhitzer über die zentrale Wärmeversorgung gesteuert wird. Das Bühnenhaus verfügt dagegen über Deckenstrahlplatten auf den verschiedenen Ebenen der Arbeitsgalerien und der Vorraum des Kassenbereichs ist mit einer Fußbodenheizung ausgestattet. Im Bereich der Probebühne werden Unterflurkonvektoren durch eine Schwingbodenheizung ergänzt.
Die dynamische Heizung zeigt elf Unterverteilungen, die vor allem die zuschauerfrequentierten Bereiche, wie den Zuschauersaal, das Foyer und die Cafeteria, versorgen, aber auch die an Zuschauersaal und Bühne angeschlossenen Funktionen, die über Lüftungsanlagen bedient werden. Für die dynamische Heizung beträgt die gesamte Anschlussleistung 758 kW. Wie bereits bei der statischen Heizung gliedert sich diese sehr unterschiedlich auf die einzelnen Unterverteilungen auf. Die geringste Anschlussleistung zeigt mit 4 kW „HR2 NE-Dolmetscher“ und die höchsten mit jeweils 176 kW „HR8 L01 VE“ und „HR9 L02 VE“.[78]

Literatur:
[78] LSW Energie GmbH & Co. KG (2019)

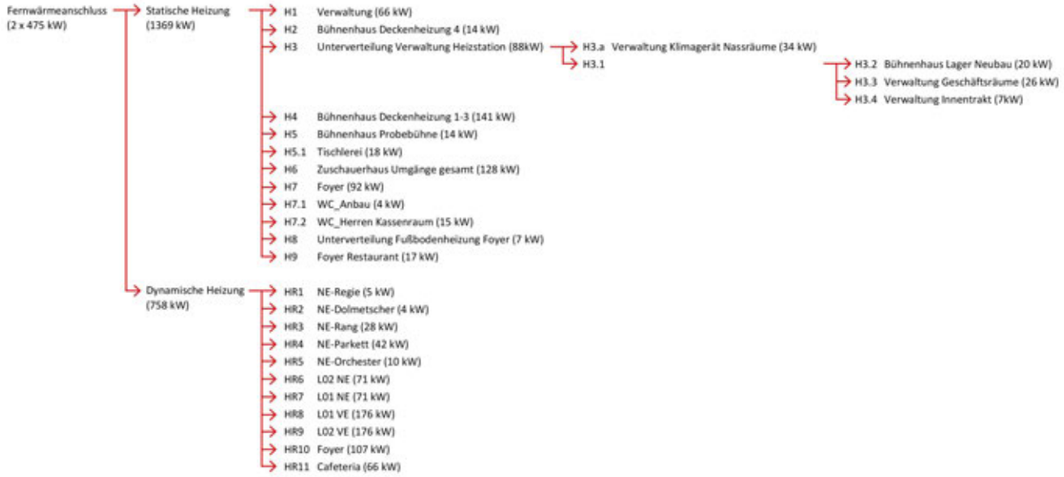

Abb. 230 Heizungsverteilung

9.3.4.2 Kühlkonzept

Im Scharoun Theater Wolfsburg wird hauptsächlich der Zuschauerraum mit hohen internen Lasten mechanisch gekühlt, da hier besondere Ansprüche an den thermischen Komfort bestehen. Neben dem Zuschauerraum werden außerdem die angelagerten Räume, die durch die gleiche Lüftungsanlage mit Frischluft versorgt werden, gekühlt. Hierzu zählen die Intendantenloge, Dolmetscherkabinen, der Beleuchterraum sowie die Licht- und Tonregie. Darüber hinaus erfolgt eine Temperaturbegrenzung von Räumen, die technische Geräte enthalten, für die bei zu hohen Raumlufttemperaturen die Gefahr einer Überhitzung besteht. Bei diesen Räumlichkeiten handelt es sich zum einen um den BOS-Raum sowie die Bühnentechnik im Kellergeschoss und zum anderen um den Dimmerraum im Dachgeschoss sowie die ELA-Räume im Erd- und Kellergeschoss.
Für jeden dieser Räume findet eine Temperaturbegrenzung durch dezentrale Splitkälteanlagen statt. Die gesamte Kühlleistung dieser Anlagen beträgt 28,6 kW. Hierbei liegen die einzelnen Leistungen zwischen 2,5 kW für den ELA-Raum im Erdgeschoss und 12,5 kW für den Dimmerraum im Dachgeschoss. Insgesamt wird auf diese Weise eine Fläche von 104,5 m^2 direkt gekühlt, was 1,0% der Gesamtfläche entspricht.
Die Kälte für den Zuschauerraum wird über einen wassergekühlten Kaltwassersatz erzeugt, der im Keller des Theaters aufgestellt ist. Die Kälteleistung beträgt hier 73,5 kW. Über die Sprinklerzisterne mit einem Fassungsvermögen von 400 m^3 erfolgt die regenerative Rückkühlung mit einer maximalen Kapazität von 230 kW. Durch den ungedämmten Betonbehälter kann eine Entladung über das Erdreich erfolgen. Die erzeugte Kälte kann in einen Pufferspeicher mit 1200l Fassungsvermögen

Nummer	Bezeichnung der Anlage	Art der Anlage	Kühlleistung [kW]	Heizleistung [kW]	Kältemittel
K01	ELA-Raum KG	Splitkälteanlage	5,0	-	R410A
K02	Bühnentechnik	Splitkälteanlage	5,0	-	R410A
K03	Dimmerraum	Splitkälteanlage	12,5	14,0	R410A
K04	BOS-Raum	Splitkälteanlage	3,6	4,0	R410A
K05	ELA-Raum EG	Splitkälteanlage	2,5	3,4	R410A
K06	Zuschauersaal	Zentralanlage	73,5	-	R410A

Abb. 231 Aufstellung der Kälteanlagen im Scharoun Theater Wolfsburg

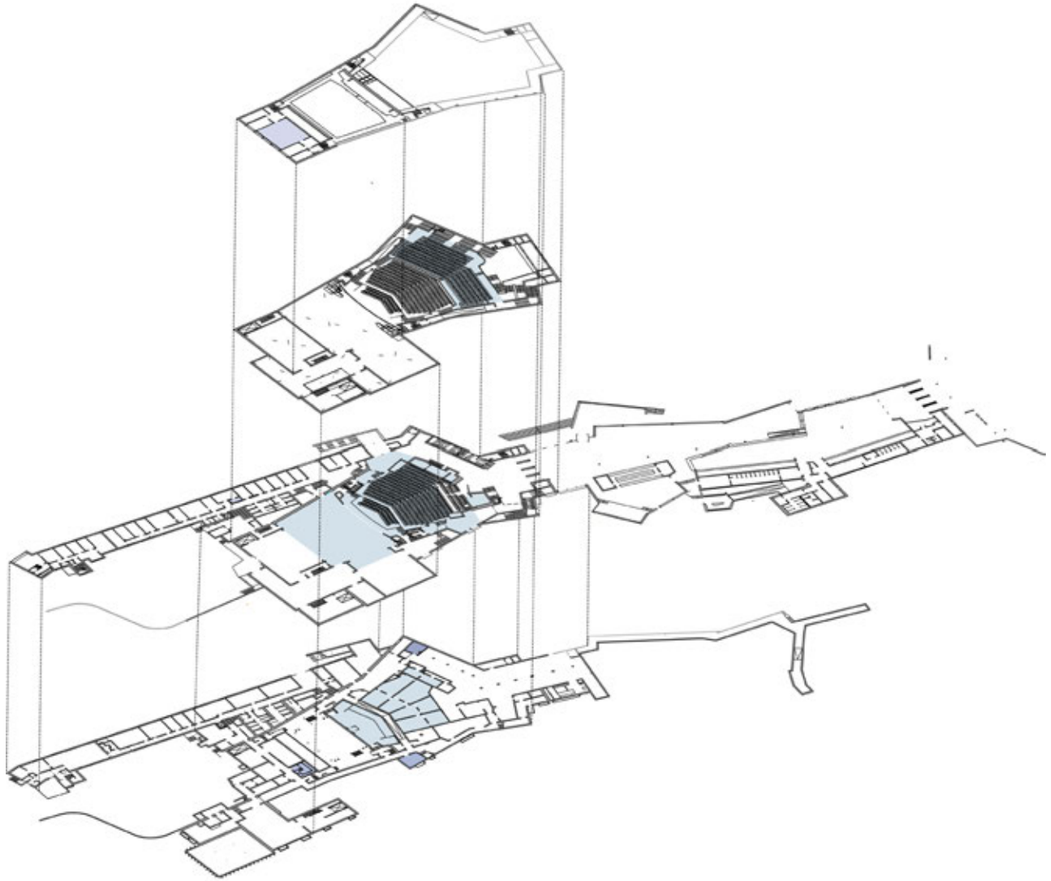

Abb. 232 Gekühlte Gebäudebereiche

eingespeichert werden oder direkt an zwei baugleiche Kühler, die im Parallelbetrieb geschaltet sind, weitergeleitet werden, sodass eine Konditionierung der durch die Lüftungsanlage eingebrachten Zuluft erfolgt. Die über dieses System mit Kälte versorgte Fläche umfasst 1.391 m^2. Dies entspricht einem Anteil von 13,3% am Gebäude.

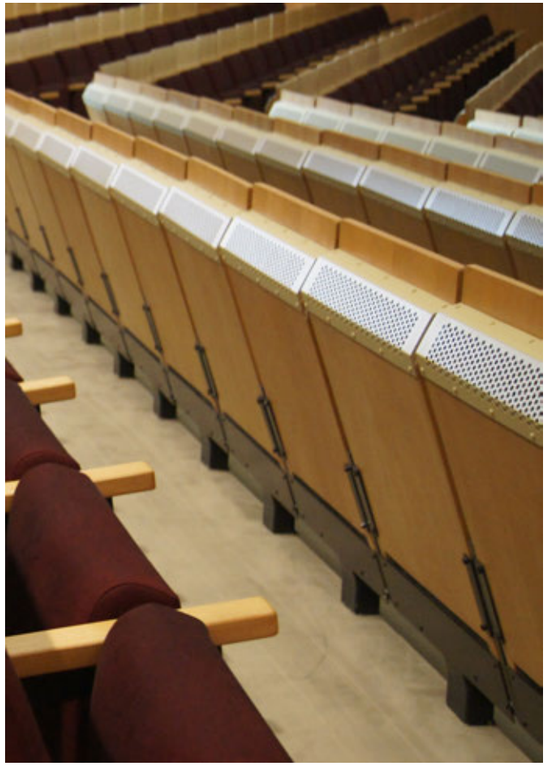

Abb. 233 Bestuhlung des Zuschauersaals

9.3.4.3 Belüftungskonzept

Das Scharoun Theater Wolfsburg verfügt aufgrund der architektonischen Bedingungen sowie der unterschiedlichen Raumnutzungen über ein komplexes Belüftungskonzept, das unterschiedliche Arten der Belüftung beinhaltet. Eine natürliche Belüftung erfolgt hauptsächlich in den Büroräumen und den Garderoben, die im Verwaltungstrakt untergebracht sind. Da diese Räume direkt an der Außenwand liegen und über große öffenbare Fensterflügel verfügen, ist eine bedarfsgerechte Lüftung möglich. Aufgrund der Gebäudetiefe sowie der architektonischen Gestaltung verfügen jedoch nicht alle Räume über Öffnungen zum Außenraum, sodass der größte Teil der Fläche mit 54% mechanisch belüftet wird. Die Notwendigkeit der mechanischen Belüftung ergibt sich zum einen aus dem Frischluftbedarf, der aus der Personenfrequentierung resultiert und zum anderen aus der Raumlufttemperaturbegrenzung, die nur durch die Abführung der Wärmeemissionen durch die technischen Anlagen möglich ist. Somit werden auch nicht alle Räume gleichermaßen belüftet, sondern es erfolgt eine Unterscheidung zwischen be- und entlüfteten sowie ausschließlich entlüfteten Bereichen.
Die zuschauerfrequentierten Bereiche wie das Foyer und der Zuschauersaal werden vollständig mechanisch belüftet, um den Anforderungen an den Frischluftbedarf bei großer Belegungsdichte gerecht zu werden. Der Zuschauersaal wird über zwei große, gekoppelte Lüftungsanlagen versorgt, die jeweils über Funktionen zur Konditionierung der Zuluft verfügen, welche die Kühlung, Beheizung und Befeuchtung beinhalten. Darüber hinaus erfolgt eine Steuerung des Umluftanteils in Abhängigkeit der CO_2-Konzentration. Die zugeführte Außenluft wird über einen Betonschacht angesaugt. Nach Konditionierung der Zuluft wird diese in die Druckkammern eingebracht, die unter dem gesamten Zuschauersaal verlaufen. Durch die insgesamt acht Druckkammern ist eine Regulierung der Belüftung unterschiedlicher Bereiche im Zuschauersaal möglich, da diese durch das Öffnen und Schließen

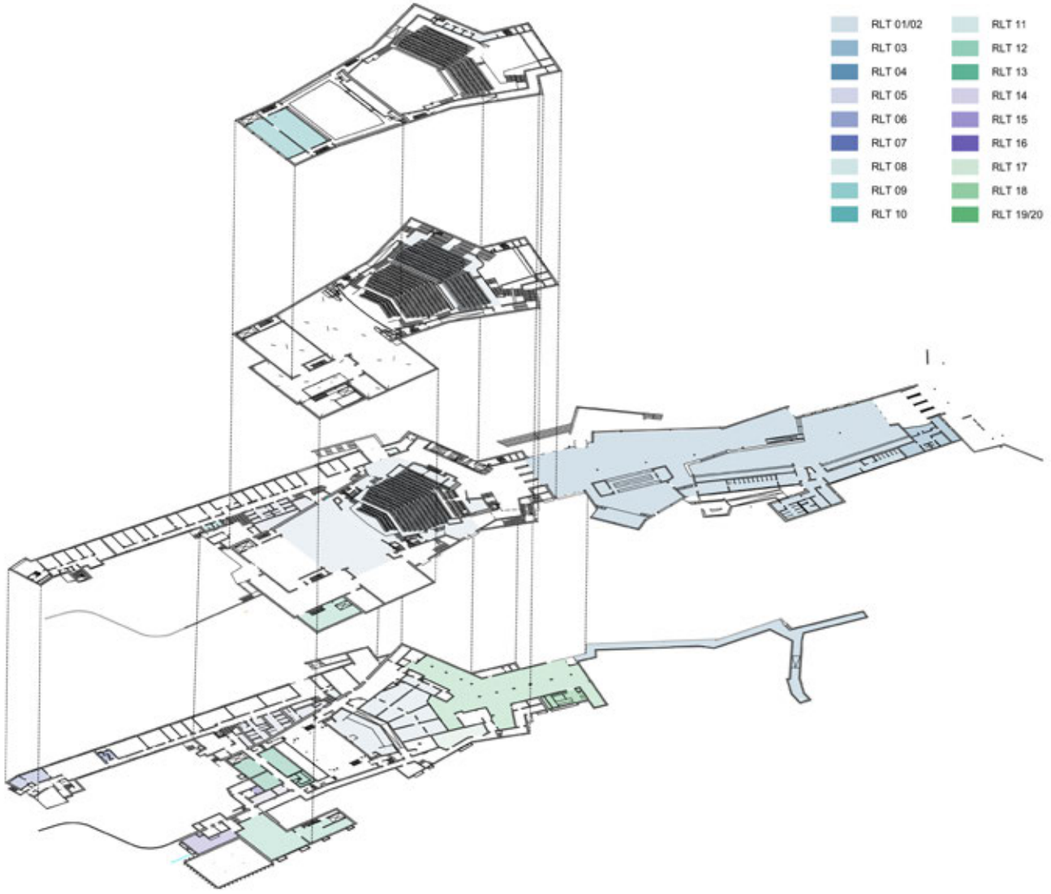

Abb. 234 Zonierung der Lüftungsanlagen

der Türen miteinander verbunden oder voneinander getrennt werden können. Aus den Druckkammern wird die Zuluft über die Fußhalterungen der festinstallierten Theaterstühle in die aufgedoppelten Rückenlehnen geleitet und am oberen Stuhlende über Lüftungsgitter ausgeblasen.
Die Abluft wird an der Saaldecke angesaugt und abgeführt. Neben dem Zuschauersaal versorgt die Lüftungsanlage jedoch auch die angeschlossenen Bereiche, wie die Dolmetscher-, Beleuchter- und Intendantenloge sowie die Licht- und Tonregie. In den Dolmetscherlogen wird die Zuluft über in der Decke eingelassene Tellerventile eingebracht, während in der Wand der Beleuchterloge Lüftungsgitter angebracht sind. Ton- und Lichtregie werden über Dralldurchlässe mit Zuluft versorgt und die Abluft wird über Schattenfugen abgeführt. Im Orchestergraben strömt die Zuluft über Quellauslässen am Boden ein.
Das Foyer inklusive der Garderobe und Cafeteria steht im Luftverbund mit den angelagerten Sanitärbereichen. Die Einbringung der Zuluft, die beheizt werden kann, durch die zwei Zuluftanlagen erfolgt im Foyer- und Garderobenbereich über Deckenauslässe, während im Barbereich Schlitzeinlässe installiert sind. Teile der Abluft werden bereits im Garderobenbereich durch Schattenfugen wieder abgesaugt und über zwei Dachventilatoren abgeführt. Die restliche Luft überströmt in den Sanitär- und Cafeteriabereich, wo sie über ein im Zuge der Sanierung installiertes Abluftgerät abgeführt wird. Durch die Integration eines Kreislaufverbundsystems kann etwa 60% der Wärme zurückgewonnen werden.
Der Kassenbereich mit den angrenzenden Personalräumen wird ebenfalls mechanisch belüftet. Hierzu ist ein Kompaktlüftungsgerät mit Gegenstromwärmetauscher installiert. Eine Konditionierung der Zuluft erfolgt jedoch hier nicht.
Auch in den Räumlichkeiten, die nicht für die Besucher zugänglich sind, findet in vielen Bereichen eine mechanische Belüftung Anwendung, da diese keine

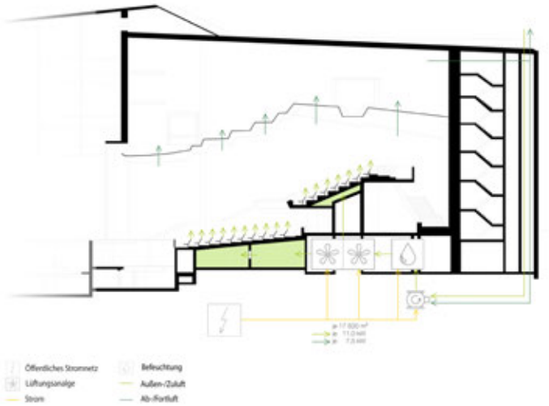

Abb. 235 Abb. 229 Funktionsschema der Lüftungsanlage „01/02 Zuschauersaal“

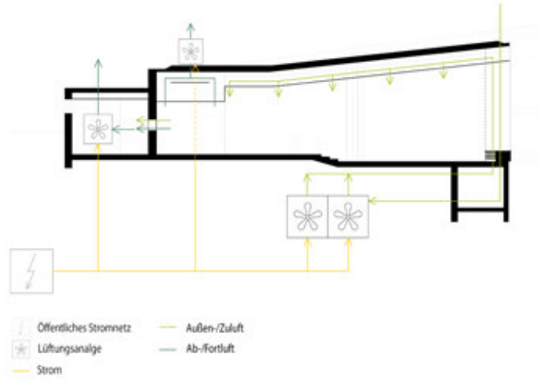

Abb. 236 Funktionsschema der Lüftungsanlage „03 Foyer/Cafeteria/ Sanitärbereich“

Öffnungen zum Außenraum besitzen und somit nicht natürlich belüftet werden können. Die Lagerbereiche, die in Alt- und Neubau unterteilt sind, werden über zwei Kompaktlüftungsgeräte belüftet, die ebenfalls über einen Gegenstromwärmetauscher verfügen. Zu den mechanisch belüfteten Werkstattbereichen zählen nur die Schlosserei und die Holzwerkstatt. Wie bereits die Lagerbereiche wird auch die Schlosserei über ein Kompaktlüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung versorgt. Die Holzwerkstatt besitzt dagegen ein getrenntes Zu- und Abluftgerät mit integriertem Lufterhitzer. Auch die Küche der Kantine wird mechanisch be- und entlüftet, um Gerüche und Partikel in der Luft ausreichend abführen zu können. Die Außenluft wird hierbei über Dach angesaugt und über einen Kanalventilator zugeführt. Durch die Induktionshaube mit vier Luftstutzen werden sowohl Frischluft eingebracht als auch Abluft abgesaugt, wobei letztere über einen Dachventilator abgeführt wird.

Die Belüftung der Technikbereiche wird über insgesamt sechs Lüftungsanlagen unterschiedlicher Arten sichergestellt. Die beiden Aufstellungsorte der NSHV werden über dezentrale Lüftungsgeräte mit Rohrventilatoren vollständig belüftet, während die Sprinkler- und Pumpenzentrale über Kanalventilatoren versorgt wird. In den Bereichen der Klimazentrale sowie der Heizungs- und Kälteanlagen wird dagegen nur die Abluft aufgrund der entstehenden Wärmelasten durch drei Anlagen abgeführt. Die Entlüftung der Klimazentrale erfolgt mit einem Boxventilator, während die Wärmelasten durch die Kältemaschinen sowie die Abstrahlung des Kaltwassersatzes raumtemperaturabhängig über Axialventilatoren abgeführt werden. Die Abluft aus dem Heizungsbereich wird über eine Bodenabsaugung durch einen Rohrventilator im Dauerbetrieb abgeführt.

Zusätzlich zu den technischen Bereichen müssen auch die Sanitärbereiche mechanisch belüftet werden. Für den Sanitärbereich der Künstler, in dem auch die Duschen untergebracht sind, wurde ein Zentralgerät mit Beheizung der Zuluft sowie Wärmerückgewinnung installiert. In den vier kleinen WC-Bereichen wird jeweils nur die Abluft über Dachventilatoren abgeführt, während die Frischluft aus den Flurbereichen überströmt.

Insgesamt sind somit im Scharoun Theater Wolfsburg 20 Lüftungsanlagen unterschiedlicher Größe und Ausprägung installiert. Diese können insgesamt ein Zuluftvolumen von 77.780 m^3/h sowie ein Abluftvolumen von 66.700 m^3/h bei Anschlussleistungen von 35,4 kW, bzw. 25,5 kW fördern. Die jährlichen Betriebsstunden sind in Abhängigkeit des Nutzungsbereichs sehr unterschiedlich.

Nummer	Bezeichnung der Anlage	Art der Anlage	Zuluft		Abluft		Konditionierung				Jährliche Betriebs-stunden [h]*1
			Volumen [m^3/h]	Anschluss-leistung [kW]	Volumen [m^3/h]	Anschluss-leistung [kW]	Heizen	Kühlen	Be-feuchten	WRG	
L01	Zuschauerraum	Zentralgerät	17500	11,00	17500	7,50	x	x	x	x	4928
L02	Zuschauerraum	Zentralgerät	17500	11,00	17500	7,50	x	x	x	x	4928
L03	Foyer/Cafeteria/Sanitär	Zentralgerät/Dachventilatoren	25500	6,00	12300	3,00	x	x	-	x	5152
L04	Kasse	Kompaktgerät	300	0,22	300	0,22	-	-	-	x	5152
L05	Sanitärbereich Künstler	Zentralgerät	2820	1,50	3190	1,50	x	-	-	x	5152
L06	Küche/Kantine	Kanal-/Dachventilator	4800	1,26	2400	0,56	-	-	-	-	
L07	Sanitär KG	Dachventilator	-	-	200	0,05	-	-	-	-	5152
L08	Sanitär Dirrigent	Dachventilator	-	-	200	0,05	-	-	-	-	5152
L09	Sanitär EG	Dachventilator	-	-	200	0,05	-	-	-	-	5152
L10	Holzwerkstatt		1600	1,03	1600	0,70	x	-	-	-	5152
L11	Sanitär Behinderten WC	Dachventilator	-	-	200	0,12	-	-	-	-	5152
L12	Lager Neubau	Kompaktgerät	940	0,45	1040	0,50	-	-	-	x	2912
L13	Lager Bestand KG	Kompaktgerät	340	0,22	340	0,22	-	-	-	x	5824
L14	NSVH AV	Rohrventilator	40	0,06	40	0,06	-	-	-	-	6552
L15	Sprinkler/Pumpenzentrale	Kanalventilator	5000	2,14	5000	2,14	-	-	-	-	26
L16	NSHV SV	Rohrventilator	40	0,06	40	0,06	-	-	-	-	6552
L17	Schlosserei	Kompaktgerät	1400	0,48	1400	0,48	-	-	-	x	
L18	Belüftung Zentrale	Boxventilator	-	-	1000	0,55	-	-	-	-	26
L19	Belüftung Havarie/Kälte	Axialventilator	-	-	2000	0,21	-	-	-	-	26
L20	Belüftung Heizung	Rohrventilator	-	-	250	0,07	-	-	-	-	8760

Genaue Angaben liegen nicht vor und wurden auf Basis der Kenntnisse zu den Anlagen soweit möglich geschätzt
Individuelle Anpassung der Laufzeiten an die temporäre Nutzung
*1 Ermittlung der jährlichen Betriebsstunden aus den Zeitplänen der GLT zu den jeweiligen Lüftungsanlagen

Abb. 237 Aufstellung der Lüftungsanlagen im Scharoun Theater Wolfsburg

Die Beleuchtung mit Tageslicht, aber auch die künstliche Beleuchtung, insbesondere in zuschauerfrequentierten Bereichen, sind integraler Bestandteil des architektonischen Konzepts des Scharoun Theaters Wolfsburg. Der Architekt Hans Scharoun setzte die Beleuchtung bewusst zur Inszenierung des Theatererlebnisses ein. Im langgestreckten Foyer sind auf der nord-östlichen Seite große Bereiche der Fassade vollflächig verglast, sodass ein lichtdurchfluteter Raum entsteht. Durch die Kombination der Verglasung mit geschlossenen Wandflächen im Zusammenspiel mit den geschwungenen Deckenelementen entstehen Bereiche mit unterschiedlicher Helligkeitswirkung. In Abstimmung auf die unterschiedlich ausgeleuchteten Bereiche bei Tageslicht entwickelte Hans Scharoun ein Kunstlichtkonzept für das Foyer, bei dem er in der Decke eine ungleichmäßige Platzierung von Downlights vorsah. So entstehen auch während der Nachtzeit unterschiedlich intensiv ausgeleuchtete Bereiche. Zur Beibehaltung des Lichtkonzepts wurden die originalgetreu nachgebauten Leuchtkörper wieder an ihrer ursprünglichen Position installiert. Lediglich die Leuchtmittel wurden im Zuge der Sanierung ersetzt. Um die Lichtatmosphäre aufrechtzuerhalten, mussten die neuen Leuchtmittel eine vergleichbare Lichtfarbe und Streuung aufweisen. Aufgrund des nach unten gerichteten Lichts der LED-Technik war die Entwicklung eines speziellen Kolbens zum Aufsatz auf die LEDs notwendig, um die gewünschte Streuung des Lichts herbeizuführen. Da die Decke im Foyer lichttechnische Möglichkeiten für unterschiedliche Veranstaltungen bieten muss, verfügen die verbauten LEDs über eine stufenlose Dimmbarkeit sowie über die Schaltung verschiedener Lichtfarben.

Neben der Ertüchtigung der Downlights erfolgte außerdem die Installation von Leuchtschienen, auf denen LED-Strahler angebracht sind. Im Garderobenbereich befinden sich als lichttechnisches Gestaltungselement zwei Reihen mit jeweils vier

Lichtkuppeln, die einen innenliegenden Kranz aus sichtbaren Glühlampen besitzen. Im Zuge der Sanierung konnte keine alternative Lösung gefunden werden, die nicht zu einer Veränderung der Lichtstimmung geführt hätte, sodass weiterhin Halogenleuchtmittel verwendet werden.
Im Kassenbereich erfolgte im Zuge der Sanierung die größte Überarbeitung des Beleuchtungskonzepts. In dem vorher dunklen Raum wurden Maßnahmen getroffen, um die Helligkeit des gesamten Bereichs zu erhöhen. Auch hier sind die Wirkung der natürlichen und der künstlichen Beleuchtung eng verknüpft. Da tagsüber das meiste Tageslicht über die verglasten Türen der Türschleusen einfällt, sind ebenfalls die Leuchten in diesem Bereich an der Decke angeordnet. Durch die Umrüstung auf LEDs liegt für den gesamten Foyer- und Eingangsbereich eine Anschlussleistung von ca. 4,4 W/m^2 vor. Der durch Tageslicht beleuchtete Bereich liegt aufgrund der großen Fensterflächen bei ca. 59%, sodass durch die natürliche Beleuchtung ein geringerer Bedarf an Kunstlicht begünstigt wird.
Im Zuschauersaal sorgt ein etwa 70m^2 großes Fenster für eine natürliche Beleuchtung während des Tages- und Probenbetriebs, welches für den Spielbetrieb durch einen Vorhang abgedunkelt werden kann. Durch die natürliche Beleuchtung des Zuschauersaals kann der Kunstlichtbedarf gegenüber anderen Spielstätten in diesem Bereich reduziert werden, da die Beleuchtung des Zuschauersaals mit Tageslicht einzigartig ist. Die Decke des Zuschauersaals ist mit runden, fest in die Rabitzdecke eingelassenen Deckenlampen bestückt, die in ihrer Anordnung wie ein Sternenhimmel wirken sollen. Auch hier wurden die Lampenrahmen und Reflektoren erhalten und lediglich die Leuchtmittel durch LEDs ersetzt. Wie bereits im Foyer sind nach den Umbauten Farbinszenierungen und eine stufenlose Dimmung möglich. Unter dem Rang, wo sich ebenfalls fest eingelassene Deckenleuchten befinden, war erneut eine Sonderlösung erforderlich, um die gewünschte Lichtwirkung beizubehalten. Zur Wahrnehmung der einzelnen LED-Lichtpunkte als einzige Lichtfläche wurden in die Deckenleuchten mattierte Glasscheiben integriert. Im Zuschauerbereich beträgt die spezifische Anschlussleistung nach Berechnungen mit TEK-Tool 2,9 W/m^2. Aufgrund des großen Fensters erreichen 33% der Fläche eine natürliche Beleuchtung.
Im Bühnenbereich befindet sich nun eine neue Bühnenbeleuchtungsanlage, die über dimmbare Kreise und feste Versätze verfügt. Insgesamt ist eine szenische Beleuchtungsleistung von ca. 200 kW installiert, von der durchschnittlich während der Vorstellung ein Anteil von 30 bis 40 % abgerufen wird. Neben der szenischen Beleuchtung ist auf den drei umlaufenden Arbeitsgalerien eine Arbeitsbeleuchtung installiert.
Im Verwaltungs- und Funktionsbereich werden alle Garderoben und Büros über nach Nord-Osten

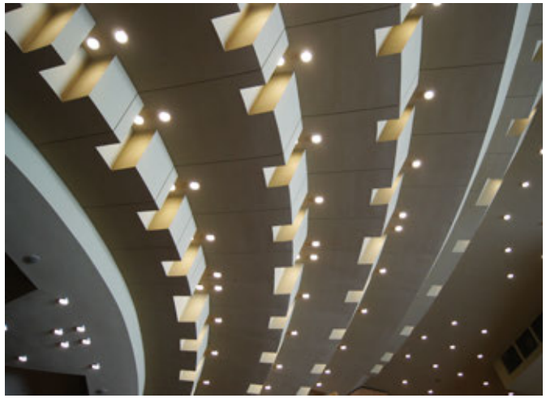

Abb. 238 Deckengestaltung des Zuschauersaals

Abb. 239 Foyerbereich des Scharoun Theaters Wolfsburg

Abb. 240 Kassen- und Eingangsbereich

orientierte und regelmäßig verteilte zweiflügelige Fenster einseitig natürlich beleuchtet. Anders als bei den zuschauerfrequentierten Bereichen, in denen der Beleuchtung eine atmosphärische Bedeutung beigemessen wird, ist diese hier funktional gestaltet. bei einer Sturzhöhe von 2,45m und einer angenommenen Nutzhöhe von 0,80m erreicht das Tageslicht gemäß DIN V 18599-4 mit 4,125m nahezu die gesamte Raumtiefe von 4,705m. Die Anschlussleistung liegt im Bürobereich bei 10,4 W/m², während diese für die Garderobenbereiche 19,8 W/m² beträgt. Somit ist diese im Garderobenbereich ein wenig höher, was darauf zurückzuführen ist, dass neben der Deckenbeleuchtung auch eine Spiegelbeleuchtung vorhanden ist.

Die Flurbereiche im Garderoben- und Verwaltungsbereich werden teilweise von Süd-Westen über Oberlichter beleuchtet. Ergänzend erfolgt die künstliche Beleuchtung über seriell aufgereihte Deckenleuchten. Funktionaler fällt die Beleuchtung der Erschließungsflächen zwischen den Lager-, Technik- und Werkstatträumen aus. Hier sind lediglich Deckenaufbauleuchten mit stabförmigen Leuchtstofflampen installiert. Insgesamt ist für die Verkehrsfläche eine Anschlussleistung von 9,1 W/m² ermittelt worden.[02],[09],[40],[102]

Abb. 241 Flurbereich bei den Garderoben

Literatur:
[02] Barthmann, K., Curti, R., Froberg, N. (2013)
[09] Brenne, W. et al. (2016)
[40] energydesign braunschweig GmbH (2013)
[102] Theater Engineering Ingenieursgesellschaft mbH (2019)

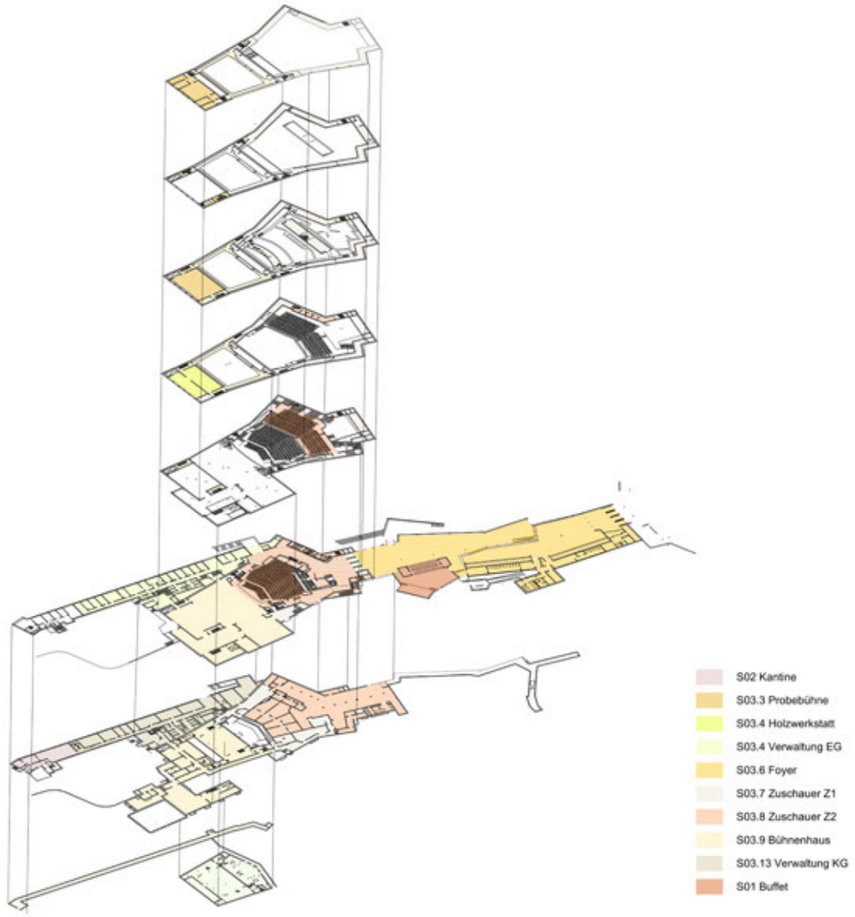

Abb. 242 Stromkreisläufe

10. Anpassung und Entwicklung des Messkonzepts

10.1 Messung der Wetterdaten

Im Rahmen des Intensivmonitorings wurden die Klimadaten vor Ort mit Hilfe einer fest installierten Wetterstation über den gesamten Messzeitraum erhoben. Während bei der Querschnittserhebung der Fokus auf der Außentemperatur und der relativen Luftfeuchte lag, wurden für das Intensivmonitoring auch die Klimaparameter Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Globalstrahlung erfasst und den Energieverbrauchsdaten gegenübergestellt.

Die Klimaparameter Außentemperatur und Relative Luftfeuchte wirken sich wie in [4.1.1] beschrieben auf den Energieverbrauch aus.

Die Windgeschwindigkeit sowie die –richtung haben Einfluss auf Sog- und Druckkräfte, die auf die Gebäudehülle wirken. Durch diese wird die Infiltration, das Eindringen kalter Außenluft durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle, maßgeblich beeinflusst. Je höher die wirkenden Druck- und Sogkräfte sind, desto stärker ist die Infiltration aufgrund der Druckdifferenzen.

Als Globalstrahlung ist die gesamte, auf die Erdoberfläche eintreffende Solarstrahlung definiert. Sie ist die bestimmende Größe zur Ermittlung solarer Einträge. Während sie in der Heizperiode zu einer Reduktion des Heizwärmebedarfs führen, tragen sie in der Kühlperiode zu einer Steigerung der Kühllasten bei.

Die Wetterstation wurde auf dem Dach des im Zuge der Sanierung neu errichteten Anbaus für Lagerflächen im Südwesten des Gebäudes aufgestellt. Bestandteile der Wetterstation sind zwei Pyranometer sowie ein Klimasensor.

Pyranometer sind Messgeräte, über welche die Intensität der einfallenden Globalstrahlung erfasst werden kann. Ihr Hauptbestandteil ist eine Thermosäule mit schwarzer Oberfläche, die durch eine Glaskuppel vor Witterungseinflüssen geschützt ist. Durch die schwarze Oberfläche wird die einfallende Strahlung absorbiert und in Wärme umgewandelt. In Folge dessen erwärmen sich die Messstellen am oberen Ende der Thermosäule, während sich das untere Ende der Umgebungstemperatur anpasst. Durch die so entstehende Temperaturdifferenz

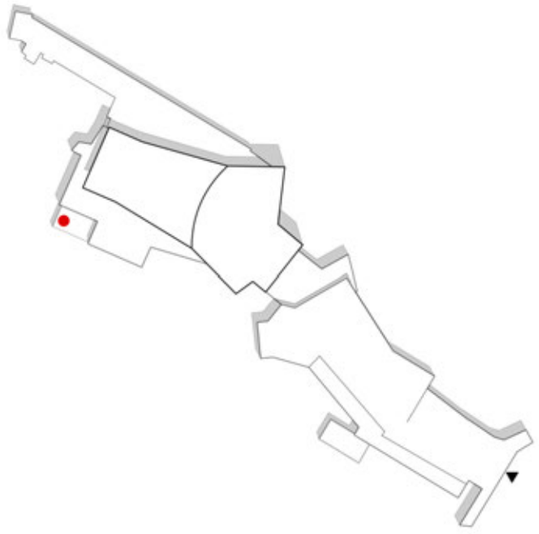

Abb. 243 Aufstellort der Wetterstation

Abb. 244 Datenübertragung der Wetterstation

wird eine zur einfallenden Strahlung proportionale Thermospannung erzeugt. Die verwendeten Pyranometer haben, unabhängig der solaren Einstrahlungsintensität, eine Messtoleranz von maximal 10%.

Indem ein Pyranometer horizontal uns das andere vertikal nach Süden ausgerichtet ist, können die gemessenen Bestrahlungsstärken für jeden Azimuth und Neigungswinkel ermittelt werden.

Der Klimasensor (Clima Sensor US, Variante 4.9201.00.000) erfasst Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Luftdruck, Temperatur und relative Luftfeuchte. Während Temperatur und Relative Luftfeuchte über einen Thermo-Hygrosensor bestimmt werden, der für die Temperatur im Bereich zwischen -40°C und 80°C eine Messtoleranz von bis zu 0,3K sowie für die relative Luftfeuchte Messtoleranzen in Höhe von 1,8% im Bereich von 10% bis 90% aufweisen kann, wird der Luftdruck über einen piezoresistiven MEMS-Sensor gemessen. Ein piezoresistiver MEMS-Sensor enthält zwei unterschiedliche Bestandteile. Der eigentliche Sensor besteht aus einer druckempfindlichen Siliziummembran, auf die zu einer Wheatstoneschen Brücke zusammengeschaltete elektrische Widerstände aufgebracht sind. Druckänderungen bewirken eine Verformung der Membran, die in den Widerständen eine zum Druck proportionale elektrische Spannung erzeugt. In dem Mikrochip, der einen Schaltkreis zur Signalverarbeitung enthält, wird die elektrische Spannung registriert und in die physikalische Größe Druck umgerechnet. Im Bereich von 10°C bis 35°C kann eine Messtoleranz von 0,25 hPa auftreten.

Die Windrichtung und –geschwindigkeit wurde mit Hilfe von Ultraschallsensoren erfasst. Das System basiert auf zwei sich gegenüberliegenden Ultraschallsensoren, die gleichzeitig als Sender und Empfänger fungieren und über einen Reflektor Ultraschallsignale austauschen. Mittels der Zeitdifferenz von gesendeten und empfangenen Signalen kann die Windgeschwindigkeit über das Laufzeitdifferenzverfahren berechnet werden. Zur Bestimmung der Windrichtung, die in einem Winkel von

Abb. 245 Wetterstation auf dem Dach des Anbaus

Messwert	Gültigkeitsbereich	Toleranz
Windgeschwindigkeit	< 5 m/s 5 m/s bis 60 m/s	± 0,3 m/s ± 3% rms
Windrichtung	> 2 m/s	± 2°
Temperatur	- 40°C bis 80°C	± 0,3 K
Relative Feuchtigkeit	10 % bis 90 %	± 1,8 %
Luftdruck	10 °C bis 35°C	± 0,25 hPa
Globalstrahlung	Absoluter Fehler	< ± 10 %

Abb. 246 Messtoleranzen für die Sensoren der Wetterstation

360° auftreten kann, sind zwei Sensorpaare notwendig. Im Laufe einer Messsequenz werden die Messstrecken nacheinander erfasst und die Anströmrichtung aus Messwerten ermittelt. Für eine Windgeschwindigkeit von kleiner 5 m/s besteht eine Messtoleranz von 0,3 m/s. Liegt die Windgeschwindigkeit im Bereich von 5 m/s bis 60 m/s, so ist mit einer Toleranz von 3% rms zu rechnen. Da auch die Windrichtung über die Ultraschallmessung erfasst wird, können auch hier Toleranzen auftreten. Diese liegen bei einer Windgeschwindigkeit unter 2 m/s bei 2°.
Alle erfassten Klimadaten wurden über Modbus an einen Datenlogger übermittelt, wo die Speicherung der Messwerte im Viertelstundentakt erfolgte. Der Datenlogger versendete alle 12 Stunden über GPRS Datenpakete an den FTP-Server der TH Köln.[52]

Im Gegensatz zu der Querschnittserhebung, in der nur der Gesamtverbrauch für Strom und Heizung sowie Warmwasser erfasst wurde, erforderten die detaillierteren Messungen im Zuge des Intensivmonitorings eine größere Anzahl Messstellen. Der nachträgliche Einbau der Sensorik nach Abschluss der Sanierungsmaßnahmen erschwerte eine detailliertere Messung und machte, ebenso wie bei den Häusern der Querschnittserhebung, einen reversiblen und zerstörungsfreien Einbau notwendig. Daher erfolgte für das Intensivmonitoring eine Weiterentwicklung des Basiskonzepts aus der Querschnittserhebung [siehe 4.1.2.2]. Die notwendigen Anpassungen wurden durch Begehungen des Scharoun Theaters sowie Sichtung der Gebäudepläne und Anlagenschemata abgeleitet. Das Messkonzept berücksichtigte zunächst die vorhandenen Daten vom Energieversorger, die durch Messwerte aus der Gebäudeleittechnik ergänzt wurden. Weitere benötigte Daten wurden durch zusätzlich installierte Messsensoren erfasst. Neben den so direkt erhobenen Daten konnten Ergänzungen durch rechnerisch ermittelte Werte über physikalische Zusammenhänge vorgenommen werden.
Die Speicherung und der Abruf der Daten erfolgten auf verschiedenen Wegen. Während die Daten vom Energieversorger aktiv dort angefordert werden mussten, wurden die Daten aus der GLT auf dem Server der Stadt Wolfsburg gespeichert, von wo sie mittels VPN vom Standort der Technischen Hochschule Köln abgerufen werden konnten. Die Daten zum Energieverbrauch, Volumenstrom, Raumkomfort und der Wetterstation, die über Messsensoren erhoben wurden, wurden auf einen FTP-Server übertragen. Zugriff auf den Datenlogger, der die Messwerte zusammenführt, war über NAS und NUC möglich.
Zwischen den Datenpaketen bestanden jedoch unterschiedliche zeitliche Intervalle in der Speicherung. Bei den installierten Messsensoren erfolgte eine Speicherung der Daten im Viertelstundentakt, die über 24-Stunden in eine Dateneinheit zusammengestellt wurden. Dagegen fand für die Messstellen der GLT eine kontinuierliche Datenspeicherung bei Änderung des Messwerts statt. Dies erforderte eine Skalierung der Daten auf viertelstündige Werte, um eine einheitliche Auswertung zu ermöglichen. Hierzu mussten die gespeicherten Daten zunächst auf 1-minütige Werte interpoliert werden, um anschließend die nicht benötigten Daten aus dem Datensatz zu entfernen.
Zur Bewertung der Verbräuche von unterschiedlichen Energiequellen standen die beschriebenen Datenquellen in unterschiedlicher Tiefe zur Verfügung. Um eine Erfassung und Analyse des Stromverbrauchs durchzuführen, wurden zunächst die Lastgänge im 15-minütigen Intervall beim Energieversorger abgefragt. Dort wurde eine getrennte Erfassung von drei Gebäudeeingangspunkten vorgenommen, bei denen es sich um S01 Buffet, S02 Kantine und S03 Theater handelt. Um den Stromverbrauch genauer analysieren zu können, wurden zusätzlich an 14 von 26 Unterverteilungen Rogowskispulen installiert. Somit wurden bei einer Gesamtanschlussleistung von 1730,7 kW 82,7% der Maximalleistung messtechnisch abgedeckt. Für die Auswertung der Messwerte bedeutete dies, dass Teilverbräuche gegebenenfalls nicht zugeordnet werden konnten.
Anders als beim Stromverbrauch wurden durch den Energieversorger für den Fernwärmeverbrauch nur monatliche Gesamtmengen zur Abrechnung gespeichert. In dieser Auflösung sind diese Werte zur dezidierten Auswertung des Gesamtverbrauchs nicht ausreichend. Um viertelstündige Werte zu erhalten, waren somit sowohl an der Haupt- als auch

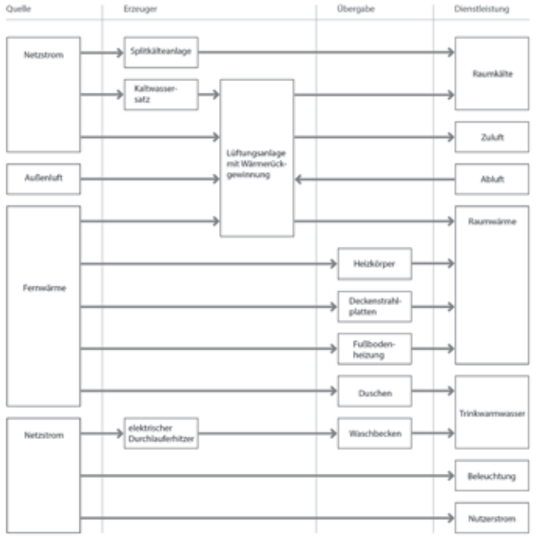

Abb. 247 Schema Gebäudetechnik

Literatur:
[52] Hausladen, G. Liedl, P., de Saldanha, M. (2012)

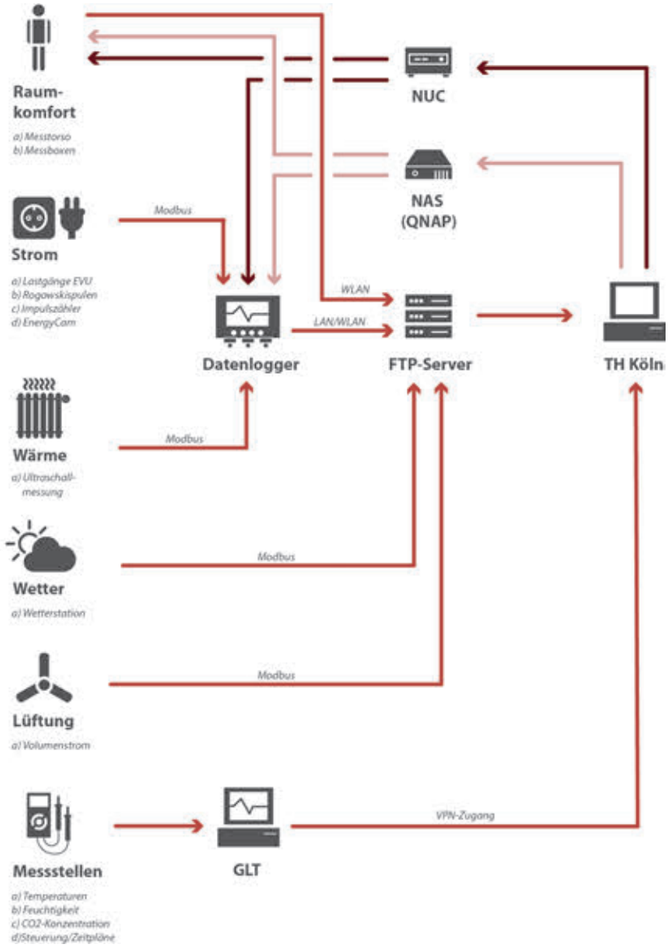

Abb. 248 Datenübergabe

an den Unterverteilungen Messungen notwendig. Die Hauptverteilung gliedert sich in die Teile Warmwasser und Heizung, wobei letztere jeweils in statische und dynamische Heizung unterteilt ist. Zur Erfassung der einzelnen Verbräuche wurden im Bereich Warmwasser und für mehrere Unterverteilungen des Bereichs der statischen Heizung Ultraschallmessgeräte installiert. Eine Erfassung der dynamischen Heizung erfolgte nicht. Obwohl der Warmwasserbereich messtechnisch erfasst wurde, konnte der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitstellung nicht vollständig ermittelt werden, da im Zuge der Sanierung für große Teile des Gebäudes eine Dezentralisierung stattgefunden hat, sodass das Warmwasser oftmals über elektrische Durchlauferhitzer erzeugt wird. Lediglich die zentrale Warmwasserbereitstellung für den Duschbereich der Künstler konnte somit über die Messung bewertet werden.

Bei der statischen Heizung wurden von 12 Unterverteilungen 9 erfasst, sodass in diesem Bereich lediglich 3,7% der Gesamtanschlussleistung unberücksichtigt blieben. Erfolgt eine Betrachtung des gesamten Heizsystems so werden von der Gesamtanschlussleistung 38,0% nicht abgedeckt. Der Verbrauch in diesen Bereichen konnte bei einer späteren Auswertung nicht zugeordnet werden.

Über die Erfassung des Strom- und Fernwärmeverbrauchs werden die Dienstleistungen Beleuchtung, Nutzerstrom, Trinkwarmwasser und Raumwärme abgedeckt. Da auch Raumkälte über strombetriebene Splitkälteanlagen sowie einen Kaltwassersatz erzeugt wird, waren hier weitere Messungen erforderlich, um die verbrauchte Kältemenge zu erfassen. Es besteht die Vermutung, dass der größte Kältebedarf im Zuschauersaal anfällt, der über den Kaltwassersatz gedeckt wird. Um die verbrauchte Kältemenge aufzunehmen, werden Ultraschallsensoren

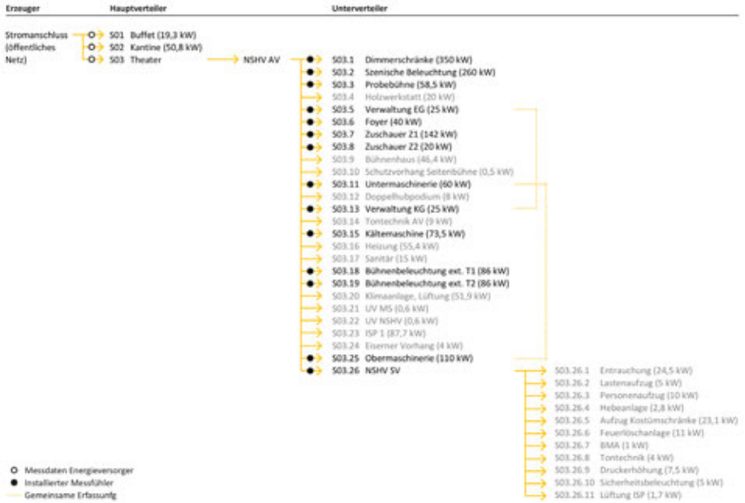

Abb. 249 Messstellen Stromverbrauch

angebracht. Darüber hinaus standen über die GLT Daten zu Vor- und Rücklauftemperaturen sowie solche im Pufferspeicher und der Sprinklerzisterne, die zur Rückkühlung genutzt wird, zur Verfügung, sodass eine Beurteilung der Funktion der Anlage vorgenommen werden konnte. Für die Splitkälteanlagen fand keine weitere Erfassung statt.
Eine weitere Dienstleistung, deren Energieverbrauch bereits in die Strom- und Fernwärmeverbrauchserfassung integriert ist, stellt die Luftzufuhr dar. Ein Großteil der Zu- und Abluft wird im Scharoun Theater Wolfsburg durch Lüftungsanlagen mechanisch transportiert. Der Betrieb der Lüftungsanlagen erfolgt mit Strom, während ein Teil der Raumwärme durch die Nacherhitzer an die Zuluft übergeben wird. Aufgrund der hohen Anschlussleistung sowie des hohen Zu- und Abluftvolumens wird vermutet, dass die Lüftungsanlage L01/02 Zuschauerraum einen großen Teil der Lüftungswärmeverluste verursacht. Daher wurden im zentralen Abluftschacht dieser Lüftungsanlage Ultraschallsensoren installiert, welche die Fortluftmenge erfasst haben. Zusätzlich wurden über die GLT Daten zur Temperatur und CO_2-Belastung der Luft sowie zum Umluftanteil erfasst. Mit dem des Umluftanteil sowie der Fortluftmenge konnte das im Zuschauerraum geförderte Luftvolumen berechnet und über die gesamte Förderkapazität der Anlage die Auslastung und die Laufzeiten bestimmt werden. Da die Lüftungsanlage CO_2-abhängig gesteuert ist, konnte über die CO_2-Belastung der Abluft die Einstellung des Sollwerts überprüft werden. Darüber hinaus konnten die Wärmeverluste durch die Lüftungsanlage über Fortluft- und Mischlufttemperatur bestimmt werden.

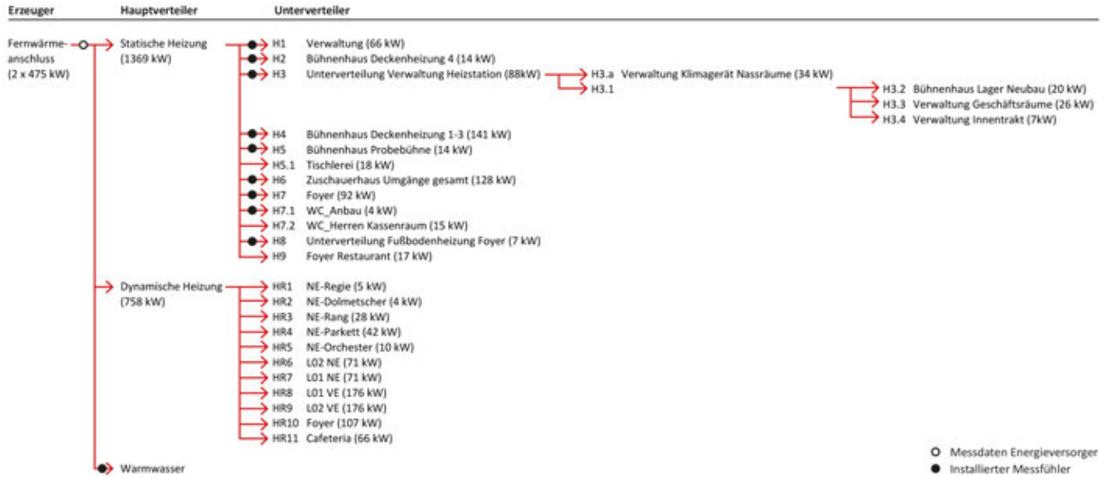

Abb. 250 Messstellen Fernwärmeverbrauch

10.3 Messtechnische Erfassung des Raumkomforts

10.3.1 Technisches Gesamtkonzept

Die Erfassung des Raumklimas fand im Scharoun Theater Wolfsburg über den gesamten Messzeitraum in mehreren Bereichen und auf zwei unterschiedliche Arten statt. Neben den in [4.1.3.1 bis 4.1.3.3] beschriebenen Messtorsi, die in den nutzerfrequentierten Bereichen „Foyer“ und „Zuschauersaal“ platziert werden, wurden zusätzlich Messboxen in Mitarbeiterfrequentierten Bereichen eingesetzt. Im Gegensatz zu den Messungen mit den Messtorsi beschränkten sich hier die Messung der Raumklimaparameter auf die Raumlufttemperatur, die relative Luftfeuchte und die CO_2-Konzentration der Raumluft [siehe 10.3.2] und bedienten somit die Grundanforderungen an die Erfassung des Raumklimas aus dem Messleitfaden der Wissenschaftlichen Begleitforschung.
Gemäß dem Leitfaden soll in mindestens drei repräsentativen Räumen das Raumklima exemplarisch untersucht werden. Das Foyer und der Zuschauerraum stellen zentrale Räumlichkeiten von Theaterspielstätten dar, in denen aufgrund der Zuschauerfrequentierung besonders hohe Anforderungen an das Raumklima bestehen. Neben diesen zentralen Punkten wurden in weiteren häufig genutzten Räumlichkeiten Messungen mit den Messboxen durchgeführt. Zu diesen zählen die Büroräume des Verwaltungsbereichs und die Probebühne. Darüber hinaus erfolgte auch im Garderobenbereich, in dem die Abluft des Foyers abgeführt wird, eine Raumklimamessung.
Die Dauer der Messungen orientierte sich sowohl bei den Messtorsi als auch bei den Messboxen am gesamten Messzeitraum. Eine Ausnahme bildete lediglich der zweite Messtorso im Zuschauersaal. Neben dem dauerhaft mittig

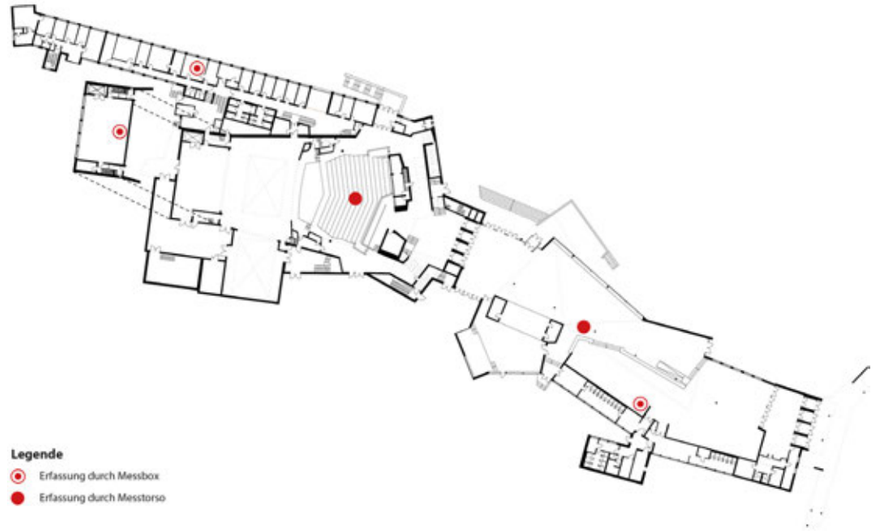

Abb. 251 Messstellen Raumklima

zwischen den Sitzreihen installierten Messtorso [siehe 4.1.3.4] wurde im Zeitraum von Januar 2018 bis Februar 2018 ein zweiter, den Sitzplatz wechselnder Messtorso in den Zuschauersaal eingebracht.
Dieser wurde im Rhythmus von zwei Wochen in unterschiedlichen Bereichen des Zuschauersaals platziert. Durch die Gegenüberstellung der Messdaten der beiden Messtorsi konnten Aussagen über das Raumklima in unterschiedlichen Bereichen des Zuschauersaals getroffen werden.
Hierzu wurde der Zuschauersaal in sechs Messbereiche unterteilt. Durch die architektonische Gestaltung des Zuschauersaals wird dieser bereits in zwei gleich große Raumhälften separiert. Diese lassen sich wiederum in drei Abschnitte gliedern. Der erste Abschnitt erstreckt sich bis zu Reihe 5 des Parketts und weist somit die größte Nähe zur Bühne auf, während der zweite Abschnitt dagegen den gesamten hinteren Bereich des Parketts einschließlich der Loge auf der linken Seite umfasst. Der dritte Abschnitt fokussiert sich auf den erhöht liegenden Rang.[41],[98],[99]

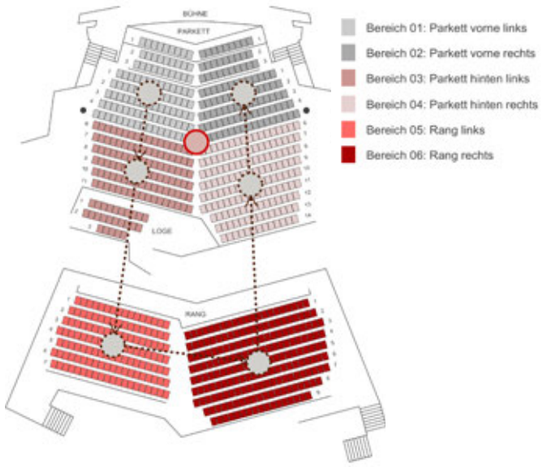

Abb. 253 Konzept des sitzplatzwechselnden Messtorsos

Abb. 252 Platzierung des fest installierten Messtorso im Zuschauersaal

Literatur
[41] Erhorn-Kluttig, H. et al. (2017)
[98] Seeed Technology Co., Ltd. (2018a)
[99] Seeed Technology Co., Ltd. (2018b)

10.3.2 Technisches Konzept der Messboxen

Zusätzlich zur detaillierten Erfassung des Raumkomforts auf Nutzerebene mit den Messtorsi erfolgten beim Intensivmonitoring reduzierte Messungen über Messboxen. Während der Messtorso auch die Luftbewegung misst, erfassen die Messboxen lediglich CO_2-Konzentration, Temperatur und relative Luftfeuchte. Im Gegensatz zum Messtorso, der für die Nutzer durch seine Größe und Gestaltung sehr präsent ist, handelt es sich bei den Messboxen um unauffällige Gehäuse, in denen auf einer Platine die Messeinheiten verlötet sind. Die Abfrage der Daten, deren Überprüfung und Aneinanderreihung erfolgte über einen Mikrocontroller (Seed Studio Wio Node v1.0) in Kombination mit einer Recheneinheit (Wilke Tiger ENN-1/6). Diese sind über einen WLAN-Adapter an einen Accesspoint angebunden und senden die erfassten Daten direkt an die PHP Datenbank. Eine interne Speicherung der Daten ist nicht erfolgt. Die Stromversorgung der Messeinheit wurde über ein Netzteil sichergestellt.
Zur Messung der CO_2-Konzentration wurde ein Sensor (Seed Studio Grove) gewählt, der, wie bereits beim Messtorso, das Messverfahren der Nicht Dispersiven Infrarot Spektronomie (NDIR) verwendet. Der Messbereich beträgt 0 ppm bis 2000 ppm bei einer Messtoleranz von ±200 ppm. Die Erfassung der Temperatur sowie der Relativen Luftfeuchte erfolgt durch eine gemeinsame Sensoreinheit (Seed Studio Temperature&Humidity Sensor). Um die Temperatur zu erfassen, greift die Sensoreinheit auf das Verfahren des NTC-Thermistors (Negativer Temperaturkoeffizient) zurück. Der Messbereich beträgt 0°C bis 50°C bei einer Messtoleranz von ±2,0°C und einer Sensibilität von 1°C. Die Relative Luftfeuchte, die für einen Bereich von 20% bis 90% gemessen wird, wird über einen kapazitiven Feuchtesensor aufgenommen. Hier beträgt die Messtoleranz ±5,0% bei einer Sensibilität von 1%. Insgesamt sind die Messtoleranzen gegenüber der im Messtorso verbauten Sensoren stärker ausgeprägt.[98],[99]

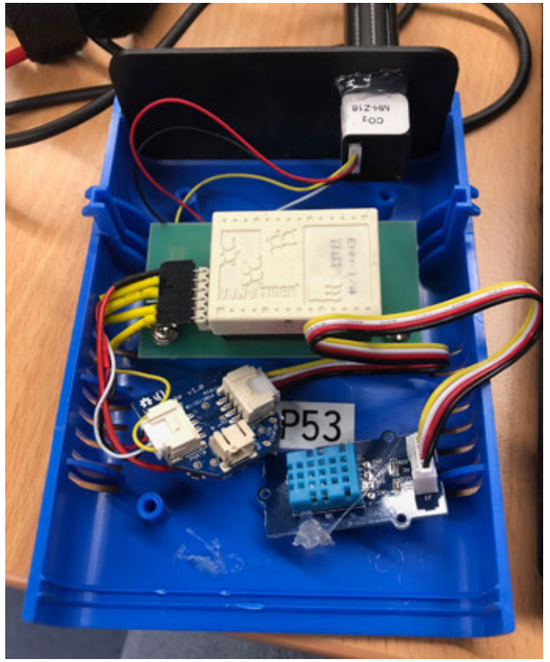

Abb. 255 Innere Struktur der Messboxen

Messwert	Gültigkeitsbereich	Toleranz
CO_2-Konzentration	0 ppm bis 2.000 ppm	± 200 ppm
Lufttemperatur	0 °C bis 50 °C	± 2,0 °C
Relative Feuchte	20 % bis 90 %	± 5,0 %

Abb. 254 Messtoleranzen der gewählten Sensoren für die Messboxen

11. Auswertung der Messungen und Berechnungen

11.1 Wetterdaten

Die Außenlufttemperatur, die Außenluftfeuchte und die solare Einstrahlung üben den größten Einfluss auf den Energieverbrauch und den Raumkomfort einer Theaterspielstätte aus [siehe 4.1.1], weshalb bei Auswertung der Daten zum Klima der Fokus auf diesen Parametern liegt. Im Folgenden werden die entsprechenden Klimadaten für die Messungen am Standort des Scharoun Theaters Wolfsburg für den Zeitraum von Oktober 2017 bis September 2018 dargestellt.

Die am Standort gemessenen Außenlufttemperaturen liegen zwischen -13,2°C am 28.02.2018 um 8.00 Uhr und 39,1°C am 07.08.2018 um 17.30 Uhr. Erfolgt ausschließlich eine Betrachtung der Monatsmittelwerte, so war der kälteste Monat der Februar mit durchschnittlichen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt von -0,7°C. Insgesamt traten im Betrachtungszeitraum 7 Eistage, auf. Hierbei handelt es sich um Tage, an denen das Maximum der Lufttemperatur den Gefrierpunkt nicht überschreitet. Des Weiteren wurden 27 Frosttage, mit einem Tagesmaximum von 0°C, erfasst.

Der wärmste Monat im Messzeitraum war der Juli mit einer Durchschnittstemperatur von 21,6°C. Die Anzahl der Hitzetage, also Tage an denen das Tagesmaximum 30°C überschritt, liegt bei 44. Dementsprechend fallen die Sommertage mit einem Tagesmaximum von mindestens 25°C mit 102 Tagen deutlich höher aus. Die Monate mit den höchsten Durchschnittstemperaturen sind kongruent zur Spielzeitpause, sodass diese den Theaterbetrieb und die benötigte Kühlleistung nur wenig beeinträchtigen.

Stellt man die gemessenen Monatsmitteltemperaturen dem Referenzklima von Potsdam gegenüber, so zeigt sich, dass die Monatsmitteltemperaturen mit Ausnahme der Monate Februar und März, in denen es zu einem Kälteeinbruch kam, für den Standort Wolfsburg höher ausfallen. Deutlich werden die durchschnittlich höheren Außenlufttemperaturen auch bei einem Vergleich der Jahresmitteltemperatur. Während diese für den Referenzstandort 9,5°C beträgt, liegt diese für den Standort Wolfsburg im Betrachtungszeitraum bei 11,4°C und somit 1,9K über der Referenzdurchschnittstemperatur. Mit Hilfe eines Klimafaktors kann die Auswirkung der Außenlufttemperatur auf den Energieverbrauch eliminiert werden. Dieser wird durch die Gegenüberstellung der Heizgradtage für den Referenzstandort mit dem Standort des Monitoringobjekts gebildet. Am Standort Wolfsburg wurden im Betrachtungszeitraum 225 Heiztage, entsprechend Tagen, an denen das Tagesmittel unter 15°C liegt, beobachtet. Aus der Differenz zwischen der Raumsolltemperatur und des Tagesmittelwerts der Außentemperatur ergeben sich somit für den Standort Wolfsburg 3165 Kd. Da für den Referenzstandort Potsdam 3667 Kd zu Grunde gelegt werden, zeigt sich auch hier, dass am Standort des Theaters weniger Heizgradtage vorliegen. Aus der Berechnung lässt sich ein Klimafaktor von 1,16 ermittelt, welcher ebenfalls mit den vom Deutschen Wetterdienst herausgegebenen Klimafaktor für die entsprechende Postleitzahl und den Messzeitraum übereinstimmt.

Die Luftfeuchte der Außenluft hat Auswirkungen auf die Innenluftfeuchte und somit auf notwendige Be- und Entfeuchtungsmaßnahmen. Die absolute Luftfeuchte steht im physikalischen Zusammenhang mit der Außenlufttemperatur. Dementsprechend zeigt sich, dass in den durchschnittlich kältesten Monaten Februar und März auch die absolute Außenluftfeuchte am niedrigsten ist. Das Minimum wird im Februar mit 3,7g/m³ erreicht. Dagegen wurden die höchsten absoluten Luftfeuchten mit 10,7g/m³ im Juni und August gemessen. Der Jahresdurchschnitt beträgt 7,8g/m³. Die geringen absoluten Luftfeuchten im Februar und März entfallen auf die Hauptspielzeiten des Theaters, sodass Auswirkungen auf die Befeuchtungsleistung der Lüftungsanlagen zu erwarten sind.

Werden auch die relativen Luftfeuchten betrachtet, so kann hier ein Mittelwert von 75% ermittelt werden. Der Monat Juli weist, trotz hoher absoluter Luftfeuchte aufgrund der hohen durchschnittlichen Lufttemperaturen, mit 59% den geringsten Durchschnittswert auf, während er im November

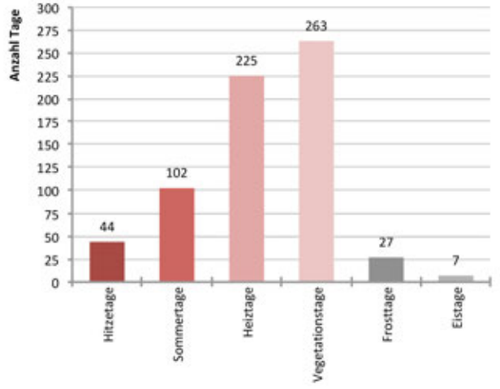

Abb. 256 Klimareferenztage im Messzeitraum am Standort Wolfsburg

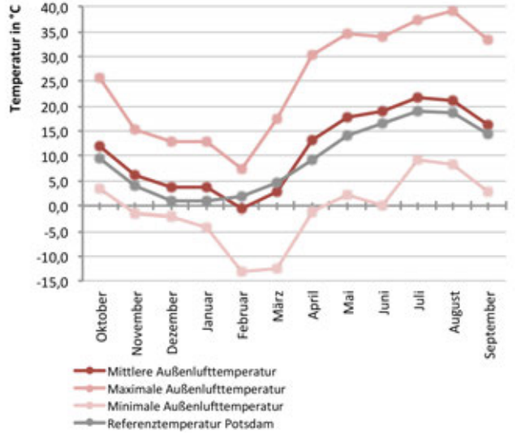

Abb. 257 Monatliche Lufttemperaturen im Messzeitraum am Standort Wolfsburg

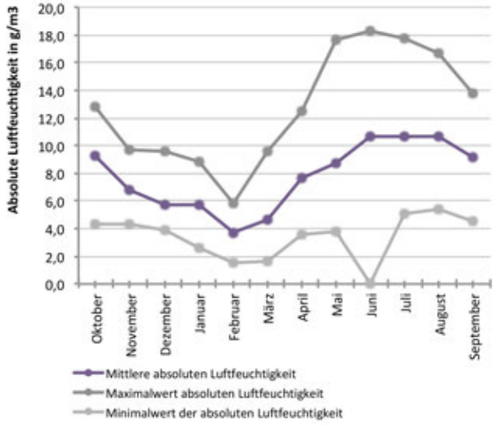

Abb. 258 Monatliche absolute Luftfeuchte im Messzeitraum am Standort Wolfsburg

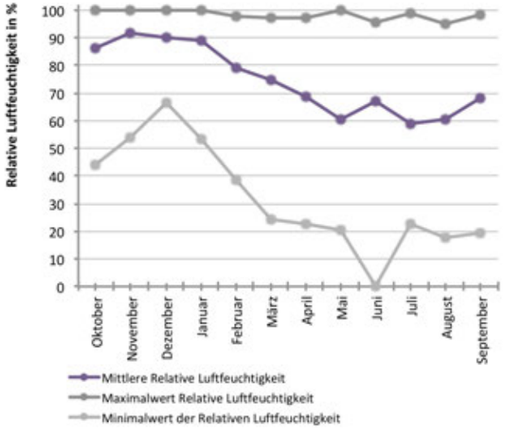

Abb. 259 Monatliche relative Luftfeuchte im Messzeitraum am Standort Wolfsburg

mit 92% am höchsten ist.
Im Jahresdurchschnitt wurde eine Windgeschwindigkeit von 1,02 m/s erfasst. Dies entspricht gemäß der Beaufortskala einem leisen Zug. Im Februar war die Windgeschwindigkeit mit durchschnittlich 0,81 m/s am niedrigsten. Der Monat mit den im Mittel höchsten Windgeschwindigkeiten von 1,18 m/s war dagegen der März. Erfolgt eine Betrachtung der Verteilung der Windgeschwindigkeiten gemäß der Beaufortskala, so zeigt sich, dass zu 55,2% der Zeit eine Windgeschwindigkeit von 1Bft herrschte, was Windgeschwindigkeiten von unter 2,06 m/s entspricht und als leiser Zug einzuordnen ist. Ein weiterer großer Anteil mit 33,9% der Messwerte lässt sich unter 0 Bft einordnen und weist somit Windgeschwindigkeiten unter 0,51 m/s auf. Dieser Zustand gilt als Windstille. Das während des Messzeitraums verzeichnete Maximum der Windgeschwindigkeit liegt bei 11,6 m/s und wird als starker Wind klassifiziert. Im Allgemeinen traten jedoch nur vereinzelt Messwerte über 8,23 m/s auf, die mit 5 Bft als frischer Wind bewertet werden müssen und vor allem im Oktober zu beobachten waren.

Als Hauptwindrichtung kann mit einem Anteil von 17,3% der Messwerte Südosten identifiziert werden. Darüber hinaus weht der Wind mit einem Anteil von mehr als 10% aus den Windrichtungen Osten bis Südsüdosten. Dies lässt sich über die Topografie um den Standort des Scharoun Theaters am Klieversberg erklären. Das Scharoun Theater Wolfsburg befindet sich auf einer Höhe von 82m NN am östlichen Hang des Klieversbergs. Richtung Westen steigt dieser weiter bis auf 110 m an, sodass der Berg dem Gebäude aus dieser Seite Windschatten spendet. Südöstlich liegt dagegen der dicht bewaldete Stadtteil Rabenberg, der somit eine Windschneise bildet.
Neben der südöstlichen Richtung wurde ein weiterer Anteil der Winde um 8% aus Norden bis Nordnordost verzeichnet. Den restlichen Windrichtungen sind nur Anteil um 5% oder darunter zuzuordnen.
Erfolgt eine Betrachtung der einzelnen Monate, so wird deutlich, dass der Wind in den Monaten Oktober bis Mai und im September hauptsächlich aus Osten bis Südsüdosten wehte. In den verbleibenden Monaten Juni bis August kam dieser verstärkt aus Norden bis Nordnordosten.

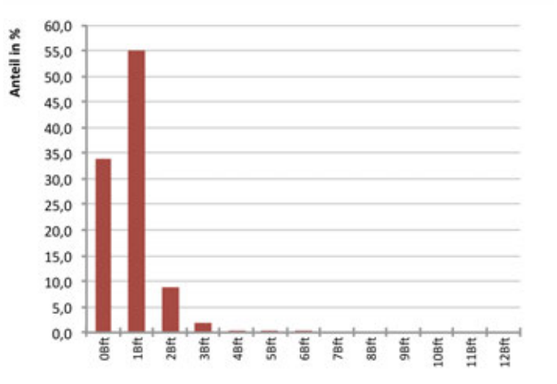

Abb. 260 Häufigkeit der Windgeschwindigkeit während des Messzeitraums am Standort Wolfsburg

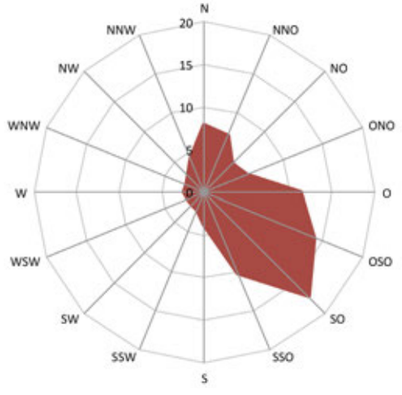

Abb. 261 Häufigkeit der Windrichtung während des Messzeitraums am Standort Wolfsburg

11.2 Energieverbrauch

11.2.1 Darstellung und Bewertung

11.2.1.1 Gesamtstromverbrauch

Während des Messzeitraums von Oktober 2017 bis September 2018 betrug der Gesamtstromverbrauch 459.038 kWh. Der höchste Monatsstromverbrauch trat im Dezember 2017 in Höhe von 47.671 kWh auf. Bezogen auf den Gesamtjahresverbrauch ist dies ein Anteil von 10,4%. Der niedrigste Verbrauch wurde dagegen im Juli erfasst, da dort nur 22.695 kWh verbraucht wurden. Die Einordnung gegenüber dem Jahresverbrauch zeigt, dass es sich hierbei nur um einen Anteil von 4,9% handelt. Im Monat Dezember wurde somit 2,1 Mal so viel Strom benötigt wie im Monat Juli. Bei einer Betrachtung des Monatsdurchschnittsverbrauchs zeigt sich, dass dieser im Messzeitraum bei 38.253 kWh liegt. Eine Überschreitung des Durchschnittsverbrauchs erfolgte während der Spielzeit in den Monaten Oktober 2017 bis Mai 2018. Eine Ausnahme stellt hier lediglich der Monat Februar 2018 dar, in dem eine Unterschreitung des Durchschnittsverbrauchs zu beobachten war, der auf die geringere Anzahl an Tagen zurückzuführen sein könnte. Weitere Unterschreitungen im Messzeitraum traten von Juni 2018 bis August 2018 auf, da sich in diesem Zeitraum das Ende der Spielzeit 2017/18 und die Spielzeitpause befinden, in der keine Vorstellungen stattfinden.
Bei einer genaueren Betrachtung des Jahresverbrauchsprofils des Scharoun Theaters Wolfsburg zeigt sich ein vergleichbarer Verlauf zum Jahresreferenzprofil [siehe 5.3.3.1]. Dieses wird besonders durch den stark reduzierten Stromverbrauch während den Monaten Juli und August geprägt, in welche die Spielzeitpause fällt. Anders als beim Jahresreferenzprofil ist neben der Spielzeitpause beim Jahresstromverbrauchsprofil auch eine Zweiteilung der Spielzeit zu erkennen. Mit Beginn der Spielzeit im September steigt auch der Monatsstromverbrauch stark an, bis dieser, nach einer kurzfristigen und dem Scharoun Theater Wolfsburg eigenen Reduzierung im Oktober, dann im Dezember seinen Jahreshöhepunkt erreicht. Wie auch in vielen anderen Spielstätten finden im Dezember die meisten Vorstellungen statt, da hier vermehrt Weihnachtsmärchen zur Aufführung kommen. Im Scharoun Theater Wolfsburg ist dies der einzige Zeitpunkt im Jahr, zu dem eine Eigenproduktion zur Aufführung kommt. Im Anschluss an diese sehr spielintensive Zeit fällt der Monatsstromverbrauch bis zum Februar ab. Anschließend beginnt die zweite Hälfte der Spielzeit, in der erneut monatlich ein kontinuierlich höherer Stromverbrauch besteht. Erst im Juni und somit zum Ende der Spielzeit, sinkt der Verbrauch erneut ab, bis er in den Monaten Juli und August aufgrund der Spielpause den niedrigsten Wert erreicht. Im Gegensatz zum Jahresreferenzprofil der Querschnittserhebung wird anhand des Jahresverbrauchsprofils die unterschiedliche Tagesanzahl gerade in den Monaten Januar bis Juni nicht direkt erkennbar.
Zur Überprüfung, ob dennoch ein Zusammenhang zwischen Tagesanzahl im Monat und dem Monatsstromverbrauch besteht, wurde der Tagesdurchschnittsverbrauch pro Monat ermittelt. Auch hier zeigt sich die bereits festgestellte Dreiteilung des Jahres. Vor allem der Juli und August weisen während der Spielpause im Verhältnis zu den restlichen Monaten einen besonders geringen Tagesdurchschnittsverbrauch auf. Einen vergleichbaren Tagesdurchschnittsverbrauch zeigen jedoch die Monate Januar, März, April, Mai und September, bei denen bei Betrachtung des Gesamtmonatsverbrauchs noch stärkere Unterschiede bestanden. Dies bestätigt die Vermutung, dass sich die Tagesanzahl des jeweiligen Monats im Jahresprofil während der Spielzeit wiederspiegelt und in diesen Monaten keine starken Nutzungsunterschiede zu bestehen scheinen. Einen geringeren Tagesdurchschnittsverbrauch zeigen die Monate Juni mit 1146 kWh/d und 1160 kWh/d im Oktober. Gegenüber den gerade beschriebenen Monaten ist der Tagesdurchschnittsverbrauch somit um etwa 240 kWh/d geringer. Auch der Monat Februar zeigt mit 1304 kWh einen etwas reduzierten Verbrauch. In den Monaten November und Dezember besteht dagegen ein deutlich erhöhter Tagesdurchschnittsverbrauch. Im Dezember

ist dieser auf die gesteigerte Vorstellungsanzahl und die damit einhergehende erhöhte Nutzungsfrequenz zurückzuführen. Der November zeigt gegenüber anderen Monaten allerdings keine gesteigerte Vorstellungsanzahl. Da zu diesem Zeitpunkt jedoch die intensive Produktion und Vorbereitung des Weihnachtsmärchens beginnt, werden vor allem Werkstattbereiche regelmäßig genutzt, was in den übrigen Monaten nicht der Fall ist. Durch welche Ursachen die unterschiedlichen Tagesdurchschnitts- und Monatsstromverbräuche entstehen, kann durch die genauere Analyse der Stromverbrauchszusammensetzung definiert werden.
Auch die Analyse des Wochenverbrauchsprofils kann Aufschluss über die Struktur des Stromverbrauchs im Scharoun Theater Wolfsburg geben. Bei einer getrennten Analyse diesbezüglich getrennt nach Spielzeit und Spielpause wird sichtbar, dass auch hier Parallelen zum Wochenreferenzprofil aus der Querschnittserhebung [siehe 5.3.2.1] bestehen.

Während der Spielzeit zeigt der Montag den geringsten Tagesverbrauch mit 1293 kWh/d und einem Anteil von 13,5%. Wie bereits bei der Querschnittserhebung ist dies damit zu erklären, dass an diesem Wochentag aufgrund der erhöhten Veranstaltungsanzahl am Wochenende weniger Veranstaltungen stattfinden als in der restlichen Woche. Nur wenig höher ist der Verbrauch samstags und sonntags mit 13,7%, bzw. 13,8%. Hier finden zwar tendenziell mehr Veranstaltungen statt, dafür entfällt die Arbeit in den Verwaltungsbereichen. Die Tage Mittwoch bis Freitag zeigen einen ähnlichen Verbrauch, der allerdings gegenüber dem Wochenende um ca. 140 kWh höher ist und zwischen einem prozentualen Anteil von 14,8% bis 15,0% variiert. Die Besonderheiten gegenüber dem Wochenreferenzprofil bestehen folglich hauptsächlich darin, dass sowohl geringere Abweichungen zwischen den Verbrauchsanteilen der einzelnen Wochentage vorliegen als auch zwischen den beiden Wochenendtagen keine Unterschiede

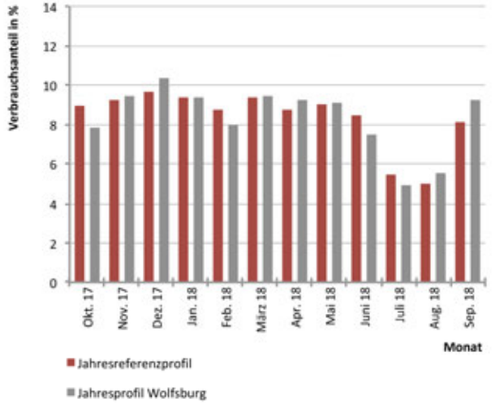

Abb. 262 Jahresreferenzprofils der Querschnittserhebung gegenüber dem Jahresstromverbrauch des Scharoun Theaters

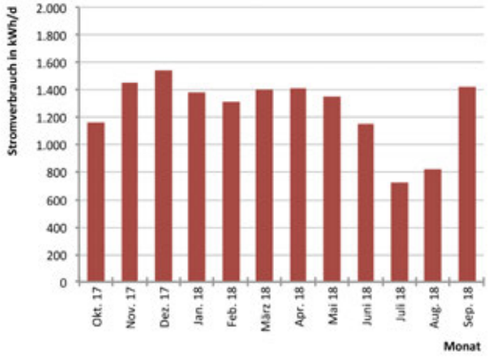

Abb. 263 Durchschnittlicher monatlicher Tagesstromverbrauch

erkennbar sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass an Wochentagen nur eine Nutzung des Verwaltungsbereichs regelmäßig stattfindet, nicht jedoch der Werkstätten, da es sich um einen Gastspielbetrieb handelt. Auch der Probebereich wird zwar durch Theatergruppen für Kinder, Jugendliche und Erwachsene an Wochentagen genutzt, jedoch findet dies nicht mit der gleichen Intensität wie bei einem Theater mit festem Ensemble statt.
Bei einer Betrachtung des Stromverbrauchsprofils während der Spielpause zeigen sich größere Unterschiede zum Wochenreferenzprofil. Im Gegensatz zu diesem, welches montags den geringsten Verbrauchsanteil zeigt, dann eine kontinuierliche Steigerung bis donnerstags erfährt, nach der wiederum ein beständiges Absinken bis zum Sonntag erfolgt, wird der geringste Verbrauch mit 779 kWh/d und einem Verbrauchsanteil von 14,6% beim Scharoun Theater mittwochs sichtbar. Der höchste Verbrauchsanteil wird bereits dienstags mit 16,4% und 876 kWh/d erreicht.

Die Wochentage Donnerstag und Freitag zeigen mit jeweils 15,4% den gleichen Verbrauchsanteil. Vergleichbar mit dem Wochenreferenzprofil ist jedoch der starke Unterschied zwischen dem Verbrauchsanteil an Wochentagen und am Wochenende im Vergleich zur Spielzeit. Dies lässt sich damit begründen, dass während der Spielpause am Wochenende weder Vorstellungen noch sonstige Arbeiten stattfinden. Nur an Wochentagen werden die Verwaltungsbereiche weiterhin regelmäßig frequentiert, auch wenn hier die Urlaubszeiten der Mitarbeiter zu berücksichtigen sind. Somit entstehen größere Verbrauchsunterschiede, die sich darin niederschlagen, dass sich der Verbrauch am Wochenende sogar durchschnittlich um die Hälfte reduziert, während er an Wochentagen etwa zwei Drittel beträgt. Beim Scharoun Theater Wolfsburg lässt sich der geringste Verbrauchsanteil der Woche am Samstag mit 10,8% und einem Verbrauch von 648 kWh/d feststellen. Sonntags liegt er mit 12,0% dagegen etwas höher.

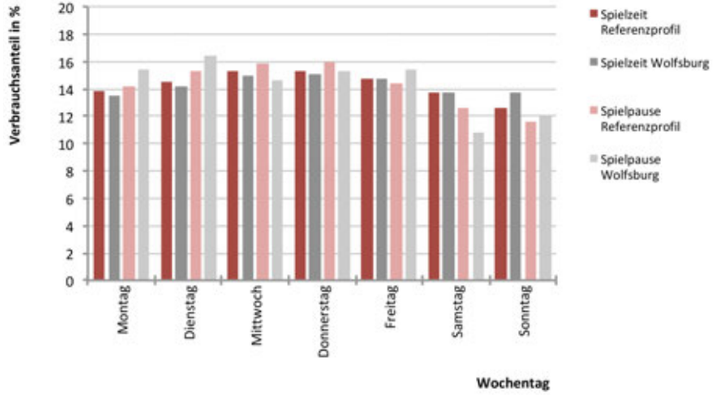

Abb. 264 Wochenreferenzprofil der Querschnittserhebung gegenüber dem Wochenstromverbrauch des Scharoun Theaters

11.2.1.2 Jährliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs

Nachdem in [11.2.1.1] der Gesamtstromverbrauch auf Jahres,- Monats- und Wochenebene analysiert worden ist, findet im Folgenden eine tiefere Analyse der Stromverteilung statt. Neben dem Gesamtverbrauch wurden auch Unterverteilungen der Stromversorgung messtechnisch erfasst, sodass eine Aufteilung des Stromverbrauchs auf einzelne Bereiche möglich war. Durch die Aufsummierung des an den Unterverteilungen gemessenen Stromverbrauchs und die Gegenüberstellung mit der Verbrauchserfassung des Energieversorgers konnte überprüft werden, ob der Verbrauch vollständig erhoben wurde. Während des gesamten Messzeitraums lag der gemessene Stromverbrauch jedoch unter der Verbrauchserfassung des Energieversorgers. Somit konnte nicht für alle Bereiche des Gebäudes nachvollzogen werden, wo der Energieverbrauch auftritt. Im gesamten Messzeitraum wurden 52,4% des Energieverbrauchs durch Messsensoren erfasst und konnten den verschiedenen Bereichen [siehe 10.2] zugeordnet werden. Der Anteil des erfassten Verbrauchs variierte über die Monate zwischen 48,4% im Mai 2018 und 58,2% im August 2018. Eine Erfassung von Verbrauchsanteilen über 55% wurden erst ab Juni 2018 verzeichnet, da Ende Juni die Nachrüstung von Messsensoren zur Aufnahme des Bereichs S03.26 NSHV-SV erfolgte. Diese umfasste in weiteren Unterverteilungen vor allem die sicherheitstechnischen Einrichtungen des Hauses sowie die Stromversorgung der Aufzüge und ließ somit Rückschlüsse auf die Grundlast des Gebäudes zu. Ohne die Nachrüstung der Messsensoren wären 56% des Stromverbrauchs in den Monaten Juli 2018 sowie August 2018 nicht erfasst worden. Gegenüber den anderen Monaten entspricht dies durchschnittlich einem um 8% höheren Anteil. Dies ist auf die dort stattfindende Spielpause zurückzuführen, während dieser die Verbräuche unter anderem für die Bespielung des Zuschauersaals geringer ausfielen und somit der Grundverbrauch des Hauses prozentual stärker ins Gewicht fällt. Über den gesamten Messzeitraum wurde durchschnittlich ein Verbrauchsanteil von 50,4% nicht erfasst, was einem Verbrauch in Höhe von 218.625 kWh entspricht. In diesem sind Stromverbräuche für die Holzwerkstatt, das Bühnenhaus, die Tontechnik, Sanitärbereiche sowie Heizungs- und Lüftungstechnik enthalten.

Nach Zuordnung des erfassten Verbrauchsanteils auf die einzelnen Bereiche zeigt sich, dass der größte Anteil am Jahresverbrauch mit 10,1% der Unterverteilung „S03.7 Zuschauerraum Z1“ zuzuordnen ist. Diese enthält unter anderem die Beleuchtung des Zuschauerraums mit den zahlreichen, in die Decke eingelassenen Spots, die vor Beginn einer Vorstellung sowie im Anschluss eingeschaltet werden. Darüber hinaus erfolgt eine Zuschaltung für Reinigungs- oder Einrichtungstätigkeiten, sofern das einfallende Tageslicht nicht ausreichend ist. Neben der Beleuchtung des Zuschauersaals umfasst die Unterverteilung außerdem um den Zuschauersaal herumlaufende Erschließungs- und Lagerbereiche.

Der nächsthöchste Verbrauch entsteht für „S03.6 Foyer“ mit einem Anteil von 7,3%. Hier sind die gesamte Foyerbeleuchtung sowie die Beleuchtung der WC- und Kassenbereiche inkludiert. Wie bereits der Zuschauersaal verfügt auch das Foyer über zahlreiche in die Decke eingelassene Spots. Hinzu kommen die Lichtkuppeln im Garderobenbereich [siehe 9.3.5] sowie die Leuchtschienen, auf denen LED-Strahler angebracht sind. Anders als im Zuschauerraum wird die Beleuchtung im Foyer während den Vorstellungen nicht abgeschaltet, sondern bleibt durchgängig angeschaltet. Darüberhinaus wird das Foyer zeitweise für weitere Veranstaltungen genutzt, bei denen die LED-Strahler eingesetzt werden.

Hinter den beiden größten Verbrauchern lassen sich die restlichen Unterverteilungen anhand ihres Verbrauchsanteils zu Gruppen zusammenfassen. Die erste Gruppe beinhaltet Unterverteilungen mit einem Verbrauchsanteil von mehr als 5%. Hierzu zählen „S03.5/S03.13 Verwaltung“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.8 Zuschauerraum 2“. Unter „S03.5/S03.13 Verwaltung“ fällt sowohl die Beleuchtung für Büro- und Garderobenräume, inklusive der zugehörigen Erschließungsflächen, als auch die hier benötigten Arbeitsgeräte.

In die zweite Gruppe werden Unterverteilungen einsortiert, die einen Verbrauchsanteil über 3% aufweisen. Hierzu zählen nur „S03.1 Dimmerschränke“ und „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“. Unterverteilungen mit einem Verbrauchsanteil über 2,5% gehören zur dritten Gruppe. Hierunter fallen „S01 Buffet“, „S02 Kantine“ und „S03.15 Kältemaschine“. Alle restlichen Unterverteilungen zeigen einen sehr geringen Verbrauchsanteil von weniger als 1%.

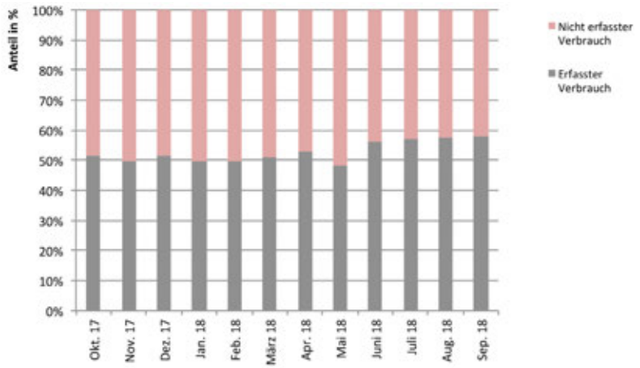

Abb. 265 Monatlicher Anteil des erfassten und nicht erfassten Stromverbrauchs

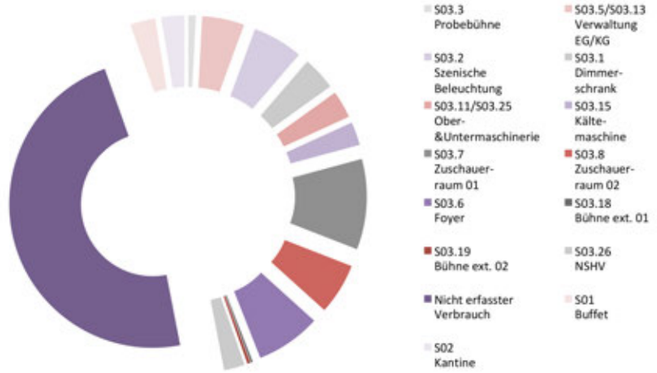

Abb. 266 Jährliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs nach Stromkreisen

11.2.1.3 Monatliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs

Nachdem eine Betrachtung der jährlichen Verbrauchszusammensetzung in [11.2.1.2] erfolgt ist, wurde als nächstes die monatliche Verteilung des Stromverbrauchs analysiert.
Wie unter [11.2.1.1] beschrieben, liegen in den Monaten Oktober, Februar und Juni die geringsten Verbrauchswerte während der Spielzeit vor. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zu dieser Zeit die absoluten Verbräuche von „S03.1 Dimmerschrank“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.6 Foyer“, die einen größeren Anteil am Jahresverbrauch stellen, unter den Monatsdurchschnittsverbräuchen liegen. Neben den Ähnlichkeiten sind aber auch Unterschiede bei den drei betrachteten Monaten zu beobachten. Diese zeigen sich in einem höheren Durchschnittsverbrauch für „S03.3 Probebühne“ in den Monaten Oktober und Juni, während er im Februar deutlich geringer ausfällt. Des Weiteren ist der Stromverbrauch im Juni für „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ sowie für „S01 Buffet“ und „S02 Kantine“ deutlich niedriger. Ausgeglichen wird diese Differenz gegenüber den beiden anderen Monaten jedoch durch einen gesteigerten Verbrauch für „S03.15 Kältemaschine“.
Besonders niedrig ist der Gesamtverbrauch in den Monaten Juli und August, die außerhalb der Spielzeit liegen. Hier lässt sich in allen Bereichen, mit Ausnahme von „S03.3 Probebühne“, in dem sich der Verbrauch stark erhöht, ein Absinken des Verbrauchs beobachten. Um mehr als 60% sinkt dieser für „S03.1 Dimmerschrank“, „S03.6 Foyer“ und „S02 Kantine“, aber auch im Bereich „S3.7 Zuschauerraum 01“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“ ist ein Rückgang des Verbrauchs um fast 40% zu beobachten. Der Stromverbrauch, welcher nicht weiter differenziert werden kann, aber den größten Anteil am Gesamtverbrauch stellt, sinkt ebenfalls um mehr als ein Viertel ab.
Ein besonders hoher monatlicher Gesamtverbrauch entsteht im Dezember. Hauptsächlich wird dies durch einen um über 80% erhöhten Verbrauch in den Bereichen „S03.1 Dimmerschrank“ und „S03.6 Foyer“ hervorgerufen. Auch für „S01 Buffet“ sowie „S02 Kantine“ und den nichterfassten Verbrauch zeigt sich ein deutlich höherer Wert, nur für „S03.3 Probebühne“ fällt dieser geringer aus.
Sonstige Auffälligkeiten in Jahresverlauf werden bei „S03.3 Probebühne“ in den Monaten Juni bis August sichtbar, in denen der Verbrauch gegenüber dem Durchschnitt durchgehend erhöht ist. Dagegen ist dieser im Februar und März eher gering. Des Weiteren zeigt sich ein gesteigerter Verbrauch des Bereichs „S03.15 Kältemaschine“, mit Ausnahme der Spielzeitpause, für April bis September. Darüber hinaus wird sichtbar, dass für „S03.1 Dimmerschrank“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“ im März ein besonders hoher Wert vorliegt. Dies deckt sich mit den Verbrauchswerten von „S03.6 Foyer“, die zusätzlich auch im Dezember ansteigen. Letzteres gilt ebenfalls für „S01 Buffet“, welcher zusätzlich im Januar erhöhte Werte aufweist.
Um die Zusammenhänge zwischen den Verbrauchsschwankungen und der Nutzung herzustellen, ist eine genauere Analyse der einzelnen Stromkreise notwendig. Anhand der Grafiken wird sichtbar, dass der Monatsstromverbrauch unter anderem an die Anzahl der Tage eines Monats gekoppelt ist. Besonders wird dies anhand des Monats Februar sichtbar, der im Jahr 2018 nur 28 Tage aufwies und daher einen deutlich geringeren Verbrauch für nahezu alle Stromkreise zeigt. Um also eine Betrachtung der Zusammenhänge

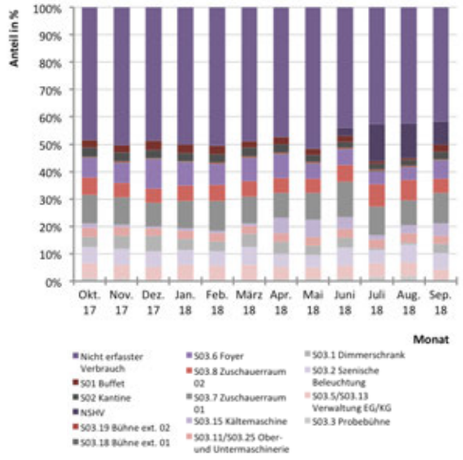

Abb. 267 Prozentuale monatliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs nach Stromkreisen

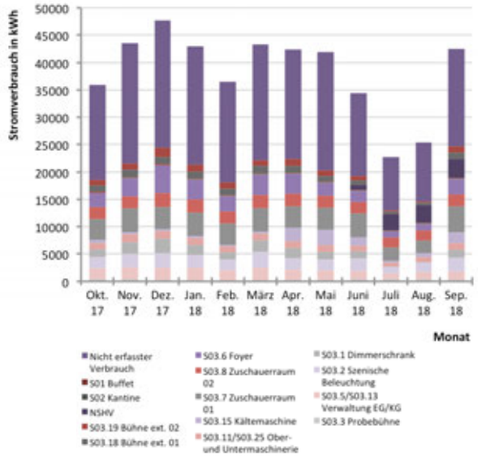

Abb. 268 Absolute monatliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs nach Stromkreisen

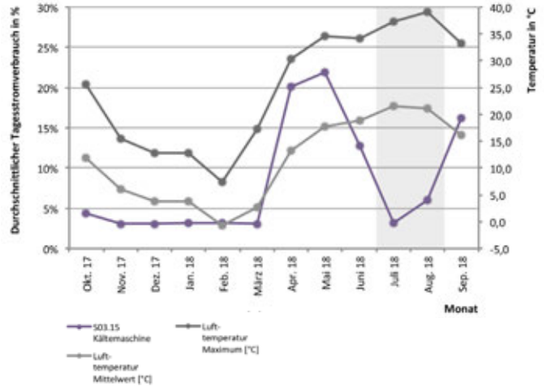

Abb. 269 Monatsstromverbrauchsanteile für S03.15 Kältemaschine gegenüber der Außenlufttemperatur

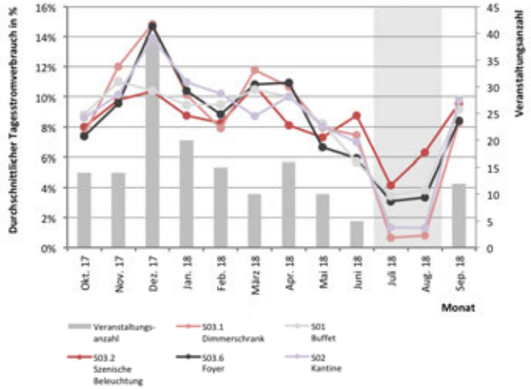

Abb. 270 Monatsstromverbrauchsanteile gegenüber der Veranstaltungsanzahl

zwischen Verbrauch und äußeren Einflüssen durchführen zu können, muss die Tagesanzahl eliminiert werden. Hierzu erfolgte eine Berechnung des durchschnittlichen Tagesverbrauchs je Monat. Darüber hinaus sollen auch die Verbräuche für die einzelnen Stromkreise miteinander vergleichbar sein. Da diese jedoch unterschiedlich hoch sind, wurden für die Verbrauchswerte prozentuale Monatsanteile ermittelt.

Besonders auffällig ist der Verlauf des Stromverbrauchs von „S03.15 Kältemaschine“, der sich über die Monate Oktober bis März sowie im Juli auf einem konstant niedrigen Verbrauchsniveau von unter 400 kWh/d verhält. Mit dem starken Anstieg der durchschnittlichen Außenlufttemperaturen auf über 10°C und dem Erreichen von Maximalwerten von mehr als 30°C steigt auch der Stromverbrauch auf bis zu 2707 kWh/d an. Obwohl die Temperaturen sich auch von Juni bis August in einem ähnlichen Bereich bewegen, sinkt hier der Verbrauch wieder auf sein Ausgangsniveau. Dies ist darauf zurückzuführen, dass lediglich bis Mitte Juni Vorstellungen stattfinden und anschließend die Spielpause beginnt. Im September, mit Beginn der Spielzeit, ist erneut ein Anstieg des Verbrauchs festzustellen, da auch zu diesem Zeitpunkt noch hohe Außenlufttemperaturen vorlagen.

Eine ähnliche Verbrauchsstruktur weisen „S03.1 Dimmerschrank“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.6 Foyer“, „S01 Buffet“, „S02 Kantine“ auf, welche in engem Zusammenhang mit der monatlich stattfindenden Vorstellungsanzahl steht. So spiegeln sich sowohl die hohe Vorstellungsdichte im Dezember aufgrund des Weihnachtsmärchens als auch die abfallende Vorstellungsanzahl von Januar bis Februar sowie die anschließend variierende Anzahl in den Verbräuchen wieder. Dies lässt sich darüber erklären, dass das Foyer hauptsächlich während der Vorstellungszeiten, genauso wie das „Buffet“, wie die Gastronomie im Foyerbereich bezeichnet wird, genutzt werden. Die Dimmerschränke dienen dagegen der Steuerung der Lichttechnik, die besonders zu Vorstellungszeiten und für die Einrichtung dieser benötigt wird und weisen zu diesen Zeiten folglich die größte Last und damit auch den höchsten Verbrauch auf [siehe 11.2.1.4]. Die Öffnungstage und –zeiten der Kantine sind ebenfalls an die Vorstellungen gekoppelt, da es in einem Gastspielbetrieb keinen täglichen Proben- oder Werkstattbetrieb gibt, bei dem eine gastronomische Versorgung der Mitarbeiter erforderlich ist und diese daher hauptsächlich an Vorstellungstagen erfolgt. So ist es zu erklären, dass „S02 Kantine“ als einziger Verbraucher auch im März einen Bezug zur Vorstellungsanzahl aufweist. Trotz geringerer Vorstellungsanzahl zeigen die Verbräuche von „S03.1 Dimmerschrank“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.6 Foyer“ und „S01 Buffet“ in diesem Monat einen hohen Verbrauchsanteil, welcher auf die Vorbereitung und Durchführung des Drehbühnenballs

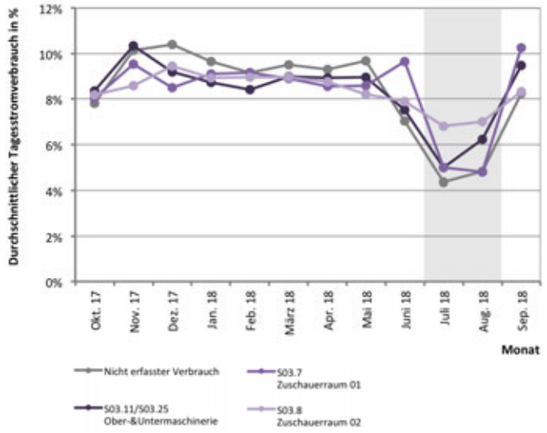

Abb. 271 Monatsstromverbrauchsanteile im Zuschauersaal und für die Bühnentechnik

zurückzuführen ist. Hierbei handelt es sich um eine jährlich stattfindende Tanz- und Shownacht, bei der das Theater eine Woche lang aufwändig umgebaut und eingeleuchtet wird. Da während der Vor- und Nachbereitungen für den Drehbühnenball sowie um Ostern herum keine Vorstellungen stattfinden und somit keine gastronomische Verpflegung benötigt wurde, fällt der Verbrauch hier geringer aus. Eine ähnliche Erklärung ist für die Monate November und Dezember heranzuziehen. Hier ist der Verbrauch für „S02 Kantine“ als einziger nicht an die Anzahl der Vorstellungen gekoppelt, was sich darin zeigt, dass im November gegenüber Dezember weniger Vorstellungen stattfinden, der Verbrauch aber dennoch zu diesem Zeitpunkt höher ist. Durch die intensive Vorbereitung des Weihnachtsmärchens im November findet durch die Nutzung der Werkstätten sowie die Proben eine stärkere Frequentierung des Hauses statt,

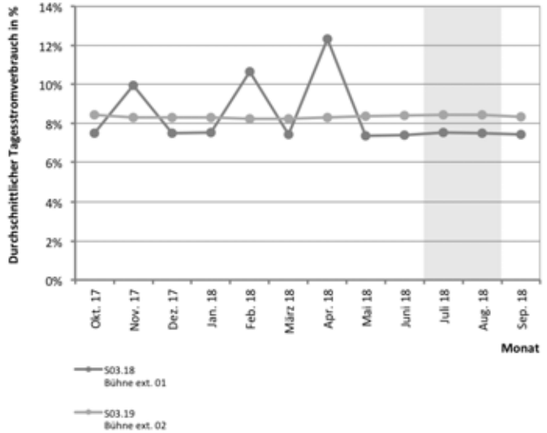

Abb. 272 Monatsstromverbrauchsanteile für die Bespielung der Bühne

sodass auch ein höherer Bedarf an gastronomischer Versorgung besteht. Im Dezember ist zwar die Anzahl der Vorstellungen höher, dennoch handelt es sich um nahezu gleich viele Vorstellungstage wie im Januar, da oftmals viele Vorstellungen hintereinander stattfinden. Allen vier betrachteten Stromkreisen ist gemeinsam, dass der Verbrauchsanteil während der Spielpause stark zurückgeht.

Ebenfalls gemeinsam betrachtet werden können „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“, „S03.7 Zuschauerraum 01“, „S03.8 Zuschauerraum 02“ und der nicht erfasste Verbrauch. Alle vier Bereiche zeigen während der Spielzeit von September bis Mai einen recht konstanten Verbrauchsanteil, welcher während der Spielpause deutlich absinkt. Bei „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“ ist der Verbrauchsanteil im November ein wenig stärker ausgeprägt, was über die Proben zum Weihnachtsmärchen zu begründen ist. Ebenfalls ist der Anteil des nichterfassten Verbrauchs im November, aber auch im Dezember etwas höher. Zur Einrichtung des Weihnachtsmärchens sind möglicherweise auch die Durchführung von Arbeiten in der Holzwerkstatt sowie eine stärkere Nutzung des Bühnenhauses erforderlich. Darüber hinaus wird die Heizungs- und Lüftungstechnik stärker benötigt. Diese können nicht durch die Messungen differenziert werden, sodass hier unter anderem die Begründung für den erhöhten Verbrauch zu suchen ist. Alle vier Verbrauchsbereiche zeigen ein starkes Absinken während der Spielpause.

Auch „S03.18 Bühne ext. 01“ und „S03.19 Bühne ext. 02“ weisen konstante Verbrauchsanteile auf. Im Gegensatz zu den vorherigen Verbrauchern zeigt die Spielpause jedoch keine Auswirkungen. Während Bühne ext. 02 durchgehend konstant verläuft, treten bei „S03.18 Bühne ext. 01“ im November, Februar und April Verbrauchsspitzen auf, die jeweils durch besondere Veranstaltungen einhergehen. Im November wird die Verbrauchsspitze durch

das Musical „Rent“ hervorgerufen, während im Februar das Ballett „Schwanensee“ und im April die Tanzaufführung „Shadows in Motion“ diese hervorruft. „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ enthält sowohl die Büroarbeitsräume als auch die Garderoben. Hierdurch erfolgt sowohl eine Kopplung an die Vorstellungen als auch an die Arbeitsgewohnheiten der Mitarbeiter in der Verwaltung und der technischen Leitung. Dies schlägt sich in den Monatsverbrauchsanteilen nieder, indem sich diese zwischen November und März recht konstant verhalten. Zwischen April und Juli sinken die Verbrauchsanteile stark ab, was zum einen über die sinkende Veranstaltungszahl, die mit einer geringeren Nutzung der Garderobenbereiche einhergeht, aber möglicherweise auch jahreszeitbedingt durch einen reduzierten Bedarf an künstlicher Beleuchtung in den Büroräumen zu erklären ist. Darüber hinaus sind vor allem im Juli und August auch Urlaubszeiten der Mitarbeiter zu berücksichtigen.
Da es sich beim Scharoun Theater Wolfsburg um ein Gastspieltheater handelt, wird die Probebühne hauptsächlich durch Theatergruppen am Nachmittag genutzt. Eine Ausnahme bildet die höhere Frequentierung während der Proben für die Eigenproduktion zur Weihnachtszeit, welche im Oktober sowie November stattfinden und durch eine Verbrauchssteigerung sichtbar werden. Mit Abschluss der Proben kommt es bis März zu einem Verbrauchsabfall. Anschließend ist ein erneuter Anstieg zu erkennen, welcher sich parallel zur Globalstrahlung am Standort entwickelt. Dies ist darüber zu erklären, dass die nach Nord-Westen ausgerichtete und vollverglaste Fassade durch einen strahlungsintensitätsgesteuerten Sonnenschutz verschattet wird, der in diesen Monaten und über die Spielpause hinweg besonders aktiv ist.

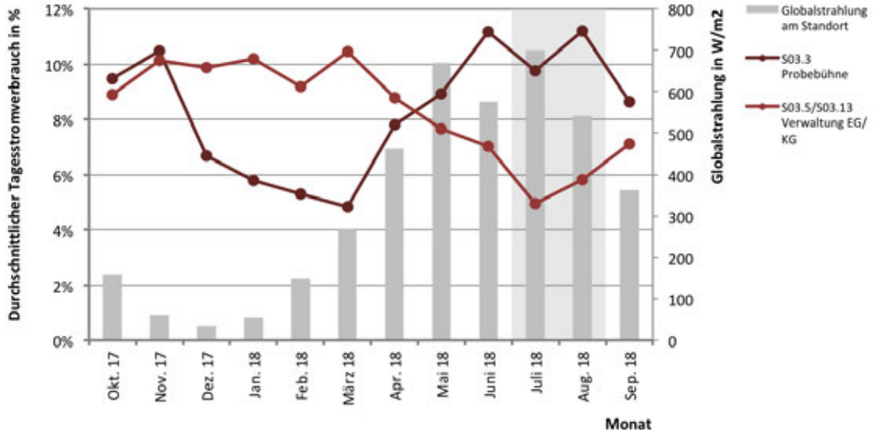

Abb. 273 Monatsstromverbrauchsanteile der Probebühne gegenüber der Globalstrahlung

11.2.1.4 Wöchentliche und tägliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs

Zur Ermittlung von Potentialen zur Verringerung des Stromverbrauchs muss zunächst der Zusammenhang zwischen Verbrauch und Nutzung detailliert analysiert werden. Neben der in [11.2.1.3] durchgeführten Analyse der Zusammensetzung des Jahres- und Monatsverbrauchs wird im Folgenden die Betrachtung des Wochen- und Tagesstromverbrauchs durchgeführt.
In [11.2.1.1] hat sich bereits gezeigt, dass im Wochenvergleich montags der geringste Tagesverbrauch auftritt. Nur wenig höher liegt dieser am Sonntag, während er insbesondere mittwochs, aber auch donnerstags Maximalwerte erreicht.
Betrachtet man die genannten Tage einzeln, so wird sichtbar, dass montags der Verbrauch bei nahezu allen Stromkreisen geringer ausfällt. Besonders deutlich wird dies anhand des um mehr als 20% reduzierten absoluten Verbrauchs gegenüber dem Tagesdurchschnitt von „S03.1 Dimmerschrank“, „S03.6 Foyer“ und „S02 Kantine“. Der in diesen Stromkreisen anfallende Verbrauch ist eng an die Durchführung von Theateraufführungen gebunden. Dies zeigt sich durch die Gegenüberstellung der Vorstellungsanzahl an den einzelnen Wochentagen mit den Verbrauchsanteilen des jeweiligen Stromkreises. Da montags nur 8% der Theateraufführungen stattfanden, ist hierüber auch der geringere Verbrauch zu erklären.
Sonntags ist der Verbrauch zwar ebenfalls geringer, jedoch sind die Stromkreise, für die ein reduzierter Verbrauch verzeichnet wird, anders verteilt. Hierbei handelt es sich um „S03.3 Probebühne“, „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“, die jeweils einen um knapp 20% verringerten Stromverbrauch zeigen. Erfolgt eine einzelne Betrachtung der drei Stromkreise, so zeigt sich bei „S03.3 Probebühne“ dienstags, mittwochs und donnerstags ein erhöhter Verbrauch. Die Höhe des Stromverbrauchs für diesen Stromkreis ist an das theaterpädagogische Angebot gekoppelt. Dienstags, mittwochs und donnerstags wird die Probebühne von verschiedenen Theatergruppen genutzt,

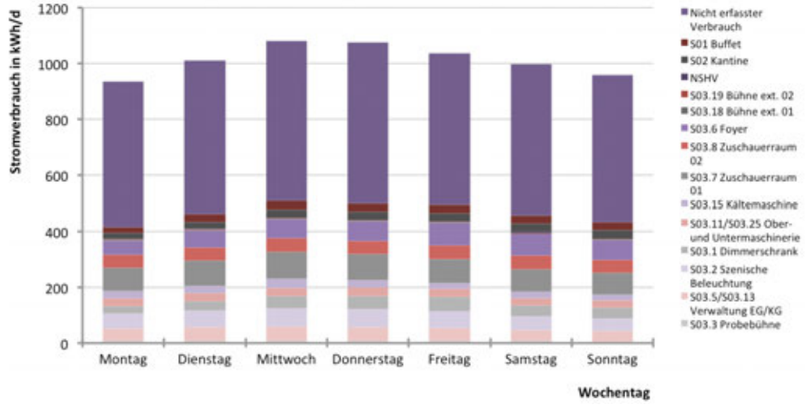

Abb. 274 Absolute wöchentliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs aus den Stromkreisen

was zu dem Verbrauchsanstieg führt. Dem gegenüber steht ein deutlich geringerer Verbrauch am Wochenende, wo die Probebühne weitestgehend ungenutzt bleibt. Die Betrachtung von „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ offenbart einen geringeren Verbrauch am Wochenende, da die Nutzung der Büroräume hauptsächlich unter der Woche stattfindet. Jedoch sind diesem Stromkreis neben den Büroräumen auch die Künstlergarderoben zugeordnet, welche während der Vorstellungen genutzt werden. Da aber am Wochenende weniger Vorstellungen stattfinden, trägt die geringere Nutzung der Künstlergarderoben ebenfalls zur Reduktion des Verbrauchs am Wochenende bei.
Ein erhöhter Verbrauch wird dagegen bei „S03.18 Bühne extern 01“ sichtbar. Allerdings ist hier zu beachten, dass der durch „S03.18 Bühne extern 01“ verursachte Verbrauch sowohl über das Jahr als auch über die Woche recht konstant verläuft. So hat die Analyse des Monatsverbrauchs lediglich in drei Monaten Ausschläge gezeigt, die auf bestimmte Veranstaltungen zurückgeführt werden konnten [siehe 11.2.1.3]. Die Veranstaltung „Shadows in Motion“, welche bereits im Monatsverlauf ein Maximum erzeugte, fand an einem Sonntag statt und ist somit auch beim Wochenverlauf für den Ausschlag verantwortlich.
An den Tagen mit dem höchsten absoluten Verbrauch, bei denen es sich um Mittwoch und Donnerstag handelt, zeigen vor allem „S03.3 Probebühne“, „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“ einen erhöhten Verbrauch, genauso wie „S03.15 Kältemaschine“. Für „S03.3 Probebühne“ und „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ wurden die Ursachen des Verbrauchs bereits erläutert: Der Stromverbrauch für die Probebühne ist an das theaterpädagogische Angebot gekoppelt, während im Verwaltungsbereich zum einen die Büroarbeitszeiten und zum anderen die Nutzung der Garderoben an Vorstellungstagen ausschlaggebend ist. Der erhöhte Verbrauch für „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“ ist auf die höhere Vorstellungsanzahl gegenüber anderen Tagen zurückzuführen.
Betrachtet man nur die Vorstellungsanzahl in Zusammenhang mit dem Verbrauchsanteil eines Wochentags, so ist auffällig, dass freitags zwar mehr Vorstellungen stattfinden als mittwochs oder donnerstags, dieser Tag aber dennoch einen geringeren Gesamtverbrauch aufweist. Dies ist sowohl darauf zurückzuführen, dass freitags die Büroräume über eine kürzere Zeitspanne genutzt werden und somit für „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ ein geringerer Verbrauch anfällt als auch auf der Probebühne keine theaterpädagogischen Veranstaltungen stattfinden.
Zusätzlich zu den mittwochs erhöhten Verbrauchswerten für „S03.3 Probebühne“, „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“, leistet auch „S03.15 Kältemaschine“ einen Beitrag. Da die Nutzung der Kältemaschine außentemperaturabhängig ist, besteht die Vermutung einer zufällig intensiveren Nutzung an diesem Wochentag. Aufgrund des zufälligen Zusammentreffens von klimatischen Bedingungen mit der Nutzungsstruktur der Theaterspielstätte wirkt sich der Energieverbrauch von „S03.15 Kältemaschine“ möglicherweise verzerrend auf den Wochenvergleich aus. Gleiches gilt für „S03.18 Bühne extern 01“. Werden diese beiden Stromkreise bei Gegenüberstellung des Gesamtstromverbrauchs der verschiedenen Wochentage nicht berücksichtigt, so verschiebt sich der Maximalwert von Mittwoch auf Donnerstag.
Nachdem durch die Gegenüberstellung der Verbrauchsstruktur einzelner Wochentage der große Einfluss der Vorstellungen auf die Energieverbrauchsstruktur bereits sichtbar geworden ist, wird dies im Folgenden nochmals durch den Vergleich zwischen dem durchschnittlichen Stromverbrauch an einem Tag mit und ohne Vorstellung während der Spielzeit aufgezeigt. An Tagen mit

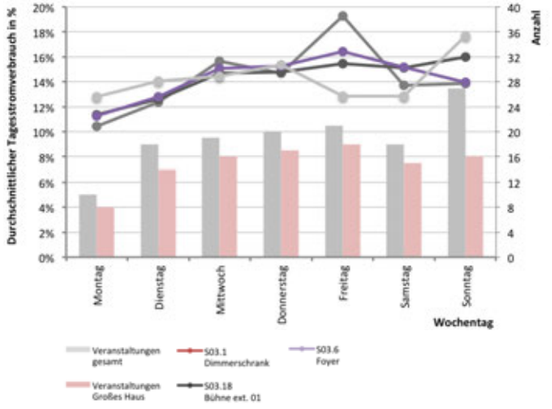

Abb. 275 Wochenstromverbrauchsanteile für S03.1 Dimmerschrank, S03.18 Bühne ext. 01 und S03.6 Foyer gegenüber der Vorstellungsanzahl

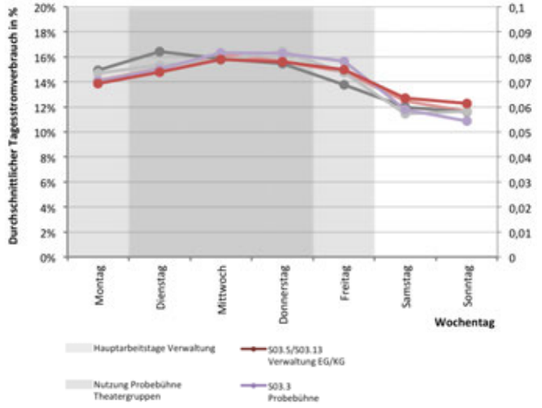

Abb. 276 Wochenstromverbrauchsanteile für S03.5/S03.13 Verwaltung sowie S03.3 Probebühne gegenüber der Nutzungszeit

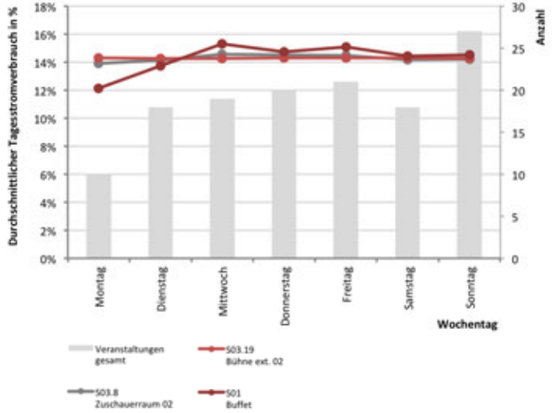

Abb. 277 Wochenstromverbrauchsanteil verschiedener Stromkreise gegenüber der Vorstellungsanzahl

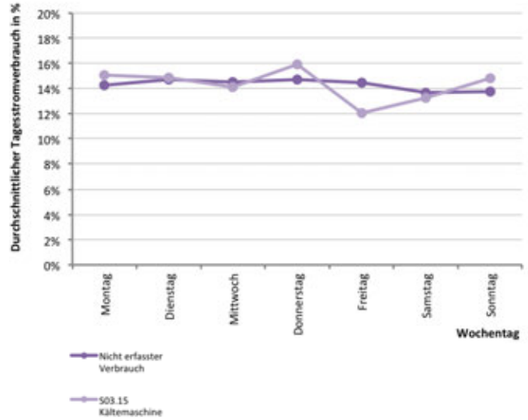

Abb. 278 Wochenstromverbrauchsanteil für S03.15 Kältemaschine und dem nicht erfassten Verbrauch

Vorstellung liegt der Durchschnittsverbrauch von 1693 kWh/d gegenüber 1279 kWh/d an Tagen ohne Vorstellung insgesamt höher. Eine Betrachtung der Verbrauchswerte der einzelnen Stromkreise zeigt, dass dies für diese ebenso gilt. Besonders groß fällt die Differenz bei Stromkreisen aus, die entweder in direkter Verbindung zur Durchführung der Vorstellung stehen, hierzu zählen „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.1 Dimmerschrank“ und „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“, oder zum anderen Zuschauerfrequentiert sind, wozu „S03.7 Zuschauerraum Z01“, „S03.8 Zuschauerraum Z02“, „S03.6 Foyer“ und mit „S01 Buffet“ die gastronomische Versorgung gehören. Aber auch Stromkreise, die Bereichen zugeordnet sind, welche vor und während der Vorstellung durch das künstlerische und technische Personal genutzt werden, zeigen einen erhöhten Verbrauch. Dies betrifft vor allem „S02 Kantine“ und „Stromkreis S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“, welcher die Garderobenräume einschließt. Geringer fällt die Differenz beim „Nicht erfassten Verbrauchsanteil“ aus. Er beinhaltet zum einen die Sicherheitsstromversorgung, die ebenso im ungenutzten Zustand eine Grundlast erzeugt, und zum anderen die Stromversorgung der technischen Einrichtungen zur Klimatisierung des Gebäudes. Auch diese Stromversorgung stellt außerhalb der Vorstellungstage eine Grundversorgung bereit, welche durch zusätzliche Klimatisierungs- und Lüftungsmaßnahmen während der Vorstellungen möglicherweise einen Mehrverbrauch verursacht. Kaum Differenzen zwischen Vorstellungs- und Nichtvorstellungstagen weisen „S03.3 Probebühne“, „S03.15 Kältemaschine“, „S03.18 Bühne ext. 01“ und „S03.19 Bühne ext. 02“ auf. Bei „S03.3 Probebühne“ ist dies darauf zurückzuführen, dass die Nutzung nicht an die Vorstellungstage gebunden ist und „S03.18 Bühne ext. 01“ sowie „S03.19 Bühne ext. 02“ zeigten bereits bei der monats- und wochenweisen Betrachtung, unabhängig des Tagestyps, einen recht konstanten Verlauf.

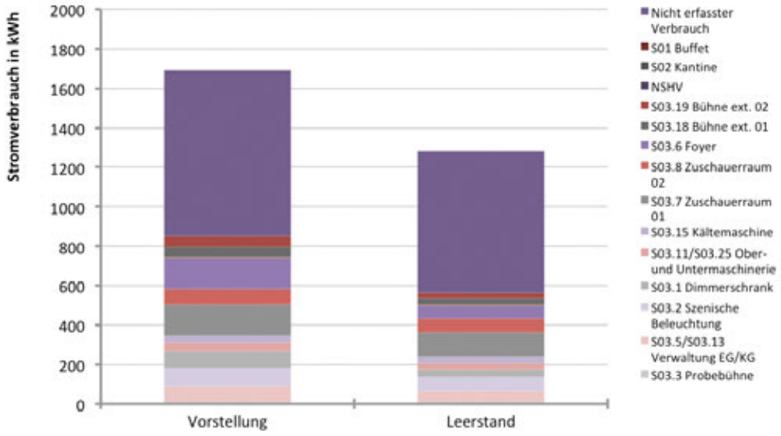

Abb. 279 Durchschnittlichen täglichen Stromverbrauchszusammensetzung aus den Stromkreisen für Vorstellungs- und Leerstandstage

11.2.1.5 Verbrauch für Heizung und Warmwasser

Im Scharoun Theater Wolfsburg wird der Bedarf der Heizung sowie ein Teilbedarf an Warmwasser über Fernwärme gedeckt. Der gesamte Verbrauch betrug im Zeitraum der Messungen über ein Jahr 1.087.020 kWh. Der niedrigste Monatsverbrauch lag bei lediglich 7.590 kWh und trat im August auf, während der höchste mit 213.050 kWh im Dezember erfasst wurde. Der Verbrauch im August macht im Verhältnis zum gesamten Jahr nur einen Anteil von 0,7% aus. Dagegen zeigt der Dezember einen Verbrauchsanteil von 19,6%, was einem 28-fach höheren Verbrauch gegenüber dem August entspricht.
Die Ermittlung des monatlichen Durchschnittsverbrauchs ergibt einen Wert von 90.585 kWh. Dieser Durchschnitt wird in den Monaten April bis Oktober unterschritten. Im restlichen Zeitraum tritt eine starke Überschreitung des Mittelwerts auf.
Eine weitere Einordnung des monatlichen Verlaufs des Fernwärmeverbrauchs durch eine Gegenüberstellung der Messwerte aus dem Intensivmonitoring mit einem Jahresreferenzprofil aus der Querschnittserhebung, wie unter [11.2.1.1] für den Stromverbrauch vorgenommen, erfolgt nicht. Im Rahmen der Querschnittserhebung wurden keine monatlichen Verbrauchswerte erfasst, sodass ein Vergleich nicht möglich ist.
Wie auch der Stromverbrauch zeigt das Jahresverbrauchsprofil des Scharoun Theaters Wolfsburg für Fernwärme starke monatliche Schwankungen. Beim Stromverbrauch waren diese teilweise auf die unterschiedliche Dauer der Monate zurückzuführen, sodass diese durch die Berechnung von durchschnittlichen monatlichen Tagesverbräuchen eliminiert wurde, um andere Einflussfaktoren identifizieren zu können. Die Berechnung des mittleren Tagesverbrauchs für Fernwärme ergibt einen Wert von 3001 kWh/d. Es zeigt sich jedoch, dass dieser in den gleichen Monaten über- und unterschritten wird wie bei

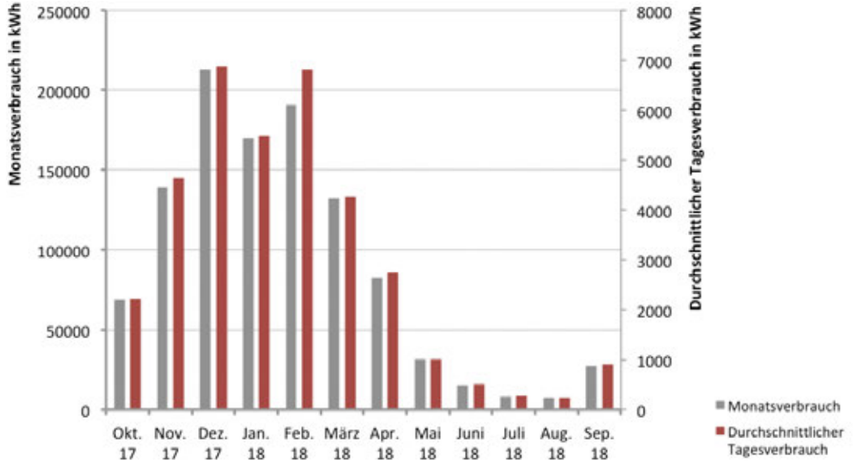

Abb. 280 Monatliche Gesamtfernwärmeverbräuche und durchschnittliche Tagesverbräuche

Betrachtung der gesamtmonatlichen Verbräuche.
Der Verbrauch zur Beheizung eines Gebäudes ist durch die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste stark an die Außentemperatur gekoppelt. Stellt man die mittleren Außenlufttemperaturen den Monatsverbräuchen gegenüber, so wird der sehr starke lineare Zusammenhang deutlich. Die Korrelation von -0,96 bestätigt, dass bei sinkenden mittleren Außenlufttemperaturen gleichzeitig der Fernwärmeverbrauch steigt. Eine Korrelation in ähnlicher Ausprägung zeigt sich zwischen den Heizgradtagen für Wolfsburg und dem Fernwärmeverbrauch.
Im Scharoun Theater Wolfsburg wird die Fernwärme sowohl für die Beheizung des Gebäudes als auch für die Warmwasserbereitstellung im zentralen Duschbereich für die Künstler benötigt. So ist es zu erklären, dass auch in den Monaten Juli und August ein Fernwärmeverbrauch anfällt. Ziel der Sanierung im Bereich des Verbrauchs für Heizung und Warmwasser war es unter anderemw, die hohe Wärmegrundlast, resultierend aus den Netzwärmeverlusten durch die zentrale Trinkwarmwasserbereitung [siehe 9.2.1], zu reduzieren. Gegenüber der sommerlichen Grundlast in Höhe von durchschnittlich 50.000 kWh vor der Sanierung hat sich diese stark verringert und beträgt für die Monate Juli bis August noch 10.480 kWh.
Da sich auch beim Scharoun Theater Wolfsburg die starke Abhängigkeit des Fernwärmeverbrauchs vom Außenklima gezeigt hat, muss auch hier für den Messzeitraum eine Klimabereinigung durchgeführt werden, da nur so ein Vergleich mit den Verbräuchen anderer Gebäude möglich ist. Der Klimafaktor für den Standort Wolfsburg beträgt 1,16. Dies zeigt, dass die Temperaturen gegenüber dem Referenzklima am Standort Potsdam in Wolfsburg durchschnittlich höher waren. Aus der Multiplikation des Klimafaktors mit dem gemessenen Fernwärmeverbrauch und unter Berücksichtigung des klimaunabhängigen Verbrauchsabteils für die Warmwasserbereitung ergibt sich ein witterungsbereinigter Verbrauchswert von 1.252.247 kWh.
Eine tiefergreifende Analyse der Messwerte zum Fernwärmeverbrauch auf wöchentlicher, täglicher und stündlicher Ebene sowie eine Betrachtung der Zusammensetzung des Verbrauchs kann nicht erfolgen. Während der Messungen sind durch die angebrachten Messsensoren durch Rückströmungen in den Leitungen regelmäßig hohe negative Werte erfasst worden, die zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen. Die Analysen zum Fernwärmeverbrauch können sich folglich nur auf die vorliegenden Abrechnungsdaten des Energieversorgers zum Gesamtverbrauch stützen.[13],[29],[40]

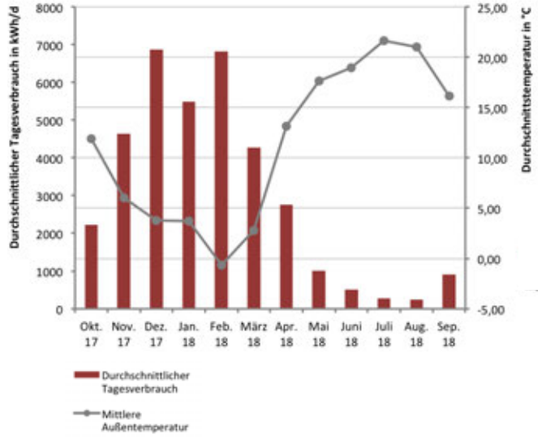

Abb. 281 Durchschnittlicher Tagesverbrauch für Heizung/ Warmwasser gegenüber der mittleren Außentemperatur

Literatur:
[13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009a)
[29] Deutscher Wetterdienst (2019)
[40] energydesign braunschweig GmbH (2013)

11.2.2 Lastprofilanalyse

11.2.2.1 Elektrische Gesamtlast

Damit ein Vergleich der auftretenden Lasten mit den Ergebnissen der Querschnittserhebung möglich ist [siehe 5.3.3.2] wurde zunächst der Gesamtlastgang des Scharoun Theaters Wolfsburg analysiert. Die Grundlast betrug im Messzeitraum 14,19 kW und liegt somit, genauso wie die Mittellast in Höhe von 52,40 kW, im Verhältnis zur Querschnittserhebung im unteren Bereich. Die Spitzenlast, welche 247,33 kW beträgt, tendiert dagegen eher Richtung Mittelfeld. Bei der Querschnittserhebung waren gerade bei Häusern mit geringer Nettogrundfläche oder mit einem niedrigen Technisierungsgrad, der sich vor allem auf eine geringe Anschlussleistung der Lüftungs- und Kälteanlagen bezieht, geringe Lasten zu beobachten. Das Scharoun Theater Wolfsburg verfügt im Verhältnis zu den innerhalb der Querschnittserhebung betrachteten Theaterspielstätten eine Nettogrundfläche, die leicht unter dem ermittelten Durchschnitt liegt, weist aber durch die zahlreichen Lüftungsanlagen einen eher hohen Technisierungsgrad auf. Somit lässt sich hier in den Ergebnissen eine Abweichung zur Querschnittserhebung feststellen, die durch die Unterschiede in der Nutzung aufgrund des Gastspielbetriebs zu erklären ist.
Um die Konstanz der Last beurteilen zu können, wurde der Belastungsfaktor untersucht. Dieser beträgt für das Scharoun Theaters Wolfsburg 0,21 und ist somit geringer als in den anderen Spielstätten. Somit liegt eine geringere Konstanz der auftretenden Lasten vor.
Auch das Lastverhältnis ist ein Indikator für die Schwankung der Last. Dieses wurde mit 0,06 ermittelt und zeigt, dass sehr große Unterschiede zwischen Grund- und Spitzenlast bestehen. Auch hier ist das Scharoun Theater Wolfsburg eine der untersuchten Theaterspielstätten mit den größten Differenzen.
Um die auftretenden Lasten klassifizieren zu können, werden diese in drei Bereiche einsortiert, die sich an der Grund-, Mittel- und Spitzenlast orientieren. Im Grundlastbereich lassen sich 40,4% der Messwerte einordnen, während die Anteile für den Mittellastbereich mit 29,7% und den Spitzenlastbereich mit 29,9% nahezu gleichmäßig verteilt sind. Wird auch hier ein Vergleich zur Querschnittserhebung vorgenommen, so lassen sich Unterschiede bei der Klassifizierung erkennen. Für Theaterspielstätten im Repertoirebetrieb war der größte Anteil der Messwerte im Mittellastbereich zu beobachten. Lediglich T05, das im EnSuite-Betrieb bespielt wird, zeigt einen charakteristischen Unterschied, indem sich die Messwerte nur auf den Mittel- und Spitzenbereich verteilen. Im Gegensatz dazu wird beim Scharoun Theater Wolfsburg, das als Gastspielbetrieb geführt wird, der größte Anteil der Messwerte im Grundlastbereich sichtbar. Die Betriebsform der Theaterspielstätten scheint somit ausschlaggebend für das Auftreten und die Verteilung der Lasten zu sein.
Die Analyse der Lastgänge in [5.3.3.2] ergab, dass der Tagesablauf von Theaterspielstätten anhand der Nutzungszeiten in drei Zeitabschnitte gegliedert

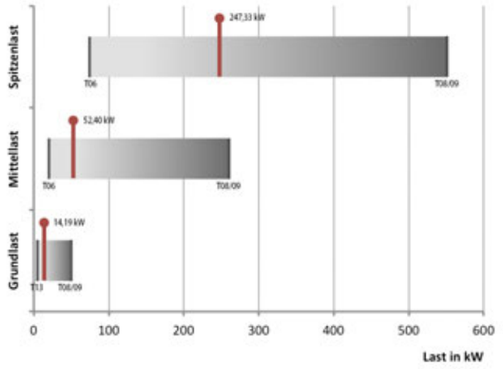

Abb. 282 Grund-, Mittel-, und Spitzenlast des Scharoun Theaters Wolfsburg im Verhältnis zur Querschnittserhebung

werden kann. Während der Nachtzeit traten in den Theaterspielstätten der Querschnittserhebung deutlich geringere Durchschnittslasten als zur Tagzeit auf. Mit einer Durchschnittslast von 29,65 kW während der Nachtzeit gegenüber 55,24 kW zur Tagzeit ohne Vorstellung trifft dies auch auf das Scharoun Theater Wolfsburg zu. Es lässt sich somit festhalten, dass sich die Last während der Nachtzeit im Verhältnis zur Tagzeit auf 53,7% reduziert. Darüber hinaus wurde bereits festgestellt, dass die Lasten während der Vorstellungszeiten meist höher ausfallen, als wenn der Zuschauersaal sowie die Bühne ungenutzt sind. Dies wurde ebenfalls für das Scharoun Theater Wolfsburg untersucht und für die Tagzeit zwischen Leerstands- und Vorstellungszeiten differenziert. Mit einer Durchschnittslast während Zeiten ohne Vorstellungen von 55,24 kW gegenüber Zeiten mit Vorstellungen in Höhe von 58,84 kW liegt diese auch hier höher.

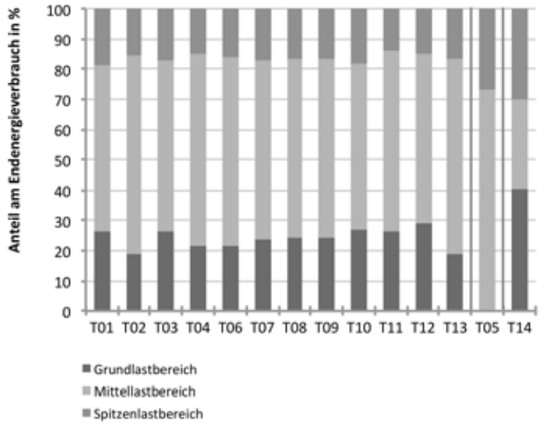

Abb. 283 Klassifizierung der auftretenden Lasten im Verhältnis zur Betriebsform

Nachdem in [11.2.2.1] die Analyse der Gesamtlast stattgefunden hat, werden im Folgenden die durch einzelne Stromkreise verursachten Lasten näher beschrieben.

Untersucht man die Stromkreise zunächst bezüglich ihrer Grundlast, so zeigt sich mit 1,80 kW der höchste Wert beim „Nicht gemessenen Verbrauch“, gefolgt von „S03.8 Zuschauerraum 02“ mit 1,51 kW und „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ mit 1,09 kW. Zur Reduzierung der Grundlast sollten besonders die an diese Stromkreise angeschlossenen Verbraucher identifiziert und ihre Nutzungszeiten überprüft werden. Insbesondere gilt es, den „Nicht gemessenen Verbrauch“ genauer zu differenzieren, da dieser die höchste Grundlast verursacht. Sehr gering ist die Grundlast dagegen bei „S03.19 Bühne ext. 02“ mit 0,02 kW und „S03.8 Probebühne“ mit 0,03 kW. An dieser Stelle zeigen sich bereits die großen Differenzen zwischen der Belastung der einzelnen Stromkreise.

Die anschließende Betrachtung der Spitzenlasten zeigt ebenfalls große Unterschiede. Die höchsten Werte treten hier neben dem „Nicht gemessenen Verbrauch“ bei „S03.1 Dimmerschrank“ mit 78,13 kW, „S03.6 Foyer“ mit 61,17 kW und „S03.15 Kältemaschine“ mit 48,73 kW auf. Betrachtet man die Gemeinsamkeiten der Stromkreise, so zeigt sich, dass sowohl „S03.1 Dimmerschrank“ als auch „S03.6 Foyer“ hauptsächlich während Vorstellungen angesteuert werden. Hierbei erfolgt über „S03.1 Dimmerschrank“ die Steuerung der szenischen Beleuchtung, dagegen wird über „S03.6 Foyer“ die Beleuchtung des Foyers abgesichert. Ein anderes Belastungsprofil zeigt „S03.15 Kältemaschine“, da hierüber nur außenklimaabhängig die Kühlung der Zuluft erfolgt. Es ist daher zu vermuten, dass nur kurzzeitig, oder über einen geringen Zeitraum hinweg, hohe Lasten auftreten.

Wie bereits bei Betrachtung der Grundlasten, werden die geringsten Spitzenlasten in bei den Stromkreisen „S03.19 Bühne ext. 02“ und „S03.8 Probebühne“ sichtbar. Beide Stromkreise unterliegen einer von den Vorstellungen unabhängigen Belastung.

Findet neben Analyse der Grund- und Spitzenlasten auch eine Gegenüberstellung der Mittellasten statt, so werden hier, wiederum neben dem „Nicht gemessenen Verbrauch“, die höchsten Werte für „S03.7 Zuschauerraum 01“ mit 5,31 kW und „S03.6 Foyer“ mit 3,84 kW festgestellt. Beide Stromkreise wurden bereits unter [11.2.1.2] als Verursacher des höchsten Stromverbrauchsanteils identifiziert. Sehr gering sind die Mittellasten mit 0,12 kW, bzw. 0,17 kW dagegen bei „S03.18 Bühne ext. 01“ und „S03.19 Bühne ext. 02“. Beide zeigen auch eine geringe Grund- und Spitzenlast und fallen so gegenüber den anderen Stromkreisen nur wenig ins Gewicht.

Um Lastveränderungen zu untersuchen und in Zusammenhang mit Nutzungsabläufen sowie Laufzeiten der technischen Gebäudeausrüstung zu beurteilen, wird die Gleichmäßigkeit der Last über Belastungsfaktor und Lastverhältnis [siehe 5.3.3.2] bewertet. Der Belastungsfaktor liegt für die betrachteten Stromkreise zwischen 0,01 bei „S03.18 Bühne ext. 01“ und 0,75 bei „S03.19 Bühne ext. 02“. Somit zeigt „S03.19 Bühne ext. 02“ ein eher durchgängiges Lastprofil ohne große Schwankungen, während „S03.19 Bühne ext. 02“ zwischen Mittellast und Spitzenlast große Differenzen aufweist. Im Falle von „S03.19 Bühne ext. 02“ sind diese Differenzen jedoch auf wenige Tage im Jahr [siehe 11.2.1.3] zurückzuführen, an denen, verursacht durch besondere Vorstellungsereignisse, höhere Lasten als gewöhnlich auftraten.

Erfolgt anschließend eine Betrachtung des Lastverhältnisses, so zeigen sich für alle Stromkreise sehr niedrige Werte, die auf eine geringe Konstanz der Lasten hinweisen. Bei „S03.8 Zuschauerraum 02“ besteht mit 0,08 noch die größte Konstanz. Mit Ausnahme von „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“, „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ und „S03.19 Bühne ext. 02“, die ein Lastverhältnis von 0,07 aufweisen, liegen die Lastverhältnisse bei den restlichen Stromkreisen deutlich darunter und zeigen somit große Differenzen zwischen Grund- und Spitzenlast. Begründen lässt sich dieses Lastverhalten über das Nutzungsprofil von Theaterspielstätten. Dieses beinhaltet durch die Vorstellungen über geringe Zeiträume eine intensive Nutzung, die sowohl Beleuchtung und Gebäudetechnik stark beansprucht als auch temporäre Dienstleistungen wie die Gastronomie erfordert und so hohe Lasten hervorruft. Im Folgenden wird daher untersucht, in welcher Häufigkeit die Lastschwankungen auftreten.

Durch die Bildung von Summenhäufigkeiten lassen sich die Höhe der Lasten und die Häufigkeit ihres Auftretens für die einzelnen Stromkreise bestimmen. Eine Betrachtung der Stromkreise zeigt, dass mehrere Gruppen gebildet werden können, bei denen der Verlauf der Summenhäufigkeiten vergleichbar sind. Die erste Gruppe beinhaltet „S01 Buffet“, „S02 Kantine“, „S03.8 Zuschauerraum 02“ und „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“. Charakteristisch ist, dass mit einem Anteil von über

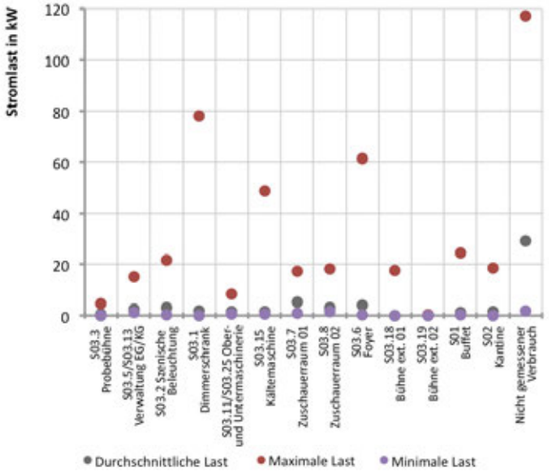

Abb. 284 Maximale, minimale und durchschnittliche Lasten in den einzelnen Stromkreisen

80% geringe Lasten in Höhe von 2kW, bzw. für „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ und „S03.8 Zuschauerraum 02“ 4 kW, nicht überschritten werden. Anschließend erfolgt eine nahezu exponentielle Abnahme der prozentualen Anteile bis keine Lasten mehr über 16 kW zu beobachten sind. Bei den Spitzenlasten, die für diese Stromkreise gemessen wurden, handelt es sich somit um Einzelwerte. In die zweite Gruppe können „S03.3 Probebühne“, „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“, „S03.18 Bühne ext. 01“ und „S03.19 Bühne ext. 02“ eingeordnet werden. Diese Gruppe zeichnet sich dadurch aus, dass sich die Lasten fast vollständig im Bereich bis 2 kW bewegen und damit noch geringer als in der ersten Gruppe ausfallen. Die dritte Gruppe enthält die Stromkreise „S03.15 Kältemaschine“ und „S03.6 Foyer“. Der Verlauf beider Kurven ist durch das stufenhafte Erscheinungsbild geprägt, welches insbesondere bei der Kältemaschine auf unterschiedliche Nutzungsintensitäten zurückzuführen ist. Für „S03.6 Foyer“ zeigen etwa 75% der Messwerte Lasten von unter 2 kW, während dieser Anteil bei „S03.15 Kältemaschine“ sogar über 93% beträgt. Anschließend ist ein kontinuierliches Absinken der Anteile zu beobachten bis bei einer Last von 14 kW eine Halbierung des Ausgangswerts stattgefunden hat. Lasten von mehr als 16 kW treten nur noch sehr vereinzelt auf. Die Stromkreise „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“ bilden die vierte Gruppe. Wie bereits bei der vorherigen Gruppe tritt auch hier ein abgestufter Kurvenverlauf auf. Es lässt sich feststellen, dass ein großer Teil der Lasten mit etwa zwei Drittel, bzw. der Hälfte für „S03.7 Zuschauerraum 01“ 2 kW nicht überschreitet. Anschließend findet eine kontinuierliche Verringerung der Anteile bis zu einer Last von 8 kW, bzw. 12 kW statt, auf die ein sprunghafter Abfall der Häufigkeiten folgt, sodass über 18 kW keine Werte mehr auftreten. Hier lässt sich der Verlauf der Kurve auf die Nutzung der Beleuchtung im Zuschauersaal und auf der Bühne zurückführen. Während zu Einrichtungszwecken tagsüber oft eine Grundbeleuchtung in den entsprechenden Bereichen vorliegt, erfolgt während den Vorstellungszeiten eine Zuschaltung weiterer Leuchtmittel, die für die kurzzeitigeren Anteile höherer Lasten sorgen. Kein vergleichbares Lastverhalten konnte für „S03.1 Dimmerschrank“ und den „Nicht gemessenen Verbrauch“ festgestellt werden, sodass diese einzeln betrachtet werden müssen. Die Verlaufskurve von „S03.1 Dimmerschrank“ ist durch einen hohen Anteil im Lastbereich unter 2 kW geprägt. Anschließend ist ein kontinuierliches Absinken der Anteile zu beobachten, bis schließlich über 68 kW keine Lasten mehr auftreten. Unter den „Nicht gemessenen Verbrauch“ fallen weitere Stromkreise, an die neben der Beleuchtung auch Teile der technischen Gebäudeeinrichtung angeschlossen sind, durch die eine kontinuierliche Last verursacht wird. So ist es zu erklären, dass fast über die gesamte Zeit Lasten über 8 kW anfallen. Ein exponentielles Absinken der Anteile liegt bis Lasten in Höhe von 20 kW vor. Anschließend fallen die Anteile kontinuierlich ab, bis über 96 kW keine Lasten mehr verzeichnet werden.

Nachdem die Untersuchung der Lastbereiche stattgefunden hat, wird deutlich, dass die Verteilung der Lasten und auch die Lastschwankungen noch genauer betrachtet werden sollten. In Abhängigkeit der Durchschnittslast und der Standardabweichung erfolgt daher für alle Stromkreise eine Berechnung der Grenzwerte für Grund-, Mittel- und Spitzenlastbereiche [siehe 5.3.3.2] und eine Zuordnung der jeweiligen Messwerte. Auch mithilfe dieses Vorgehens ergeben sich mehrere Gruppierungen von Stromkreisen. Die erste Gruppe, zu der „S03.15 Kältemaschine“, „S03.1 Dimmerschrank“ und „S03.18 Bühne ext. 01“ zählen, zeigt fast ausschließlich Lasten im mittleren Bereich. Ein geringer Anteil der Messwerte befindet sich zusätzlich im Spitzenlastbereich. Dies ist darüber zu erklären, dass diese drei Stromkreise überwiegend einer kontinuierlichen Last im niedrigen Lastbereich ausgesetzt sind und nur kurzzeitig hohe Lasten ausgelöst werden. Der Auslöser für die kurzzeitig hohen Lasten ist je nach Stromkreis entweder klimaabhängig oder an die Lichtkonzeption der Vorstellung gebunden. Der zweiten Gruppe, die nur einen sehr geringen Anteil der Messwerte im Mittellastbereich aufweist, sind „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“ zuzuordnen. Hier sind die meisten Messwerte dem Grundlastbereich zuzuordnen. Alle drei Stromkreise stehen in direkter Verbindung mit der Durchführung von Vorstellungen, sodass entweder eine starke Beanspruchung oder ein niedriger Grundbetrieb stattfindet. „S03.3 Probebühne“, „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ und „S03.8 Zuschauerraum 02“ haben den größten Anteil der Messwerte im Grundlastbereich, einen etwas kleineren Anteil im Mittellastbereich sowie den geringsten Anteil im Spitzenlastbereich und bilden somit die dritte Gruppe. Alle drei Stromkreise werden durch Bereiche des Theaters angesteuert, die keine Abhängigkeit von den Vorstellungen zeigen, sondern gleichmäßige täglich und wöchentlich wiederkehrende Nutzungen aufweisen. Die Belastungen der Stromkreise bewegt sich in engen Lastbereichen, sodass eher hohe Belastungsfaktoren gegeben sind. Die vierte und letzte Gruppe beinhaltet mit „S03.6 Foyer“, „S03.19 Bühne ext. 02“, „S01 Buffet“ und „S02 Kantine“ die meisten Stromkreise und zeichnet sich durch die Zuordnung der meisten Messwerte im Mittellastbereich und eine gleichmäßige Verteilung der verbleibenden Anteile auf Spitzen- und Grundlastbereich aus. Alle Stromkreise stehen in Verbindung mit der Anzahl und Dauer der stattfindenden Vorstellungen. Auch an dieser Stelle lässt sich der „Nicht gemessene Verbrauch“ keiner Gruppe eindeutig zuordnen, da hier zu viele weitere Stromkreise integriert sind, die jeweils technische Einrichtungen beinhalten. Da sie jeweils unterschiedliche Lasten und Laufzeiten erfordern, konnten keine Einflussfaktoren bezüglich der Nutzung festgestellt werden.

Um Aussagen über das zeitliche Auftreten der Lasten treffen zu können, wurden neben der Mittellast für

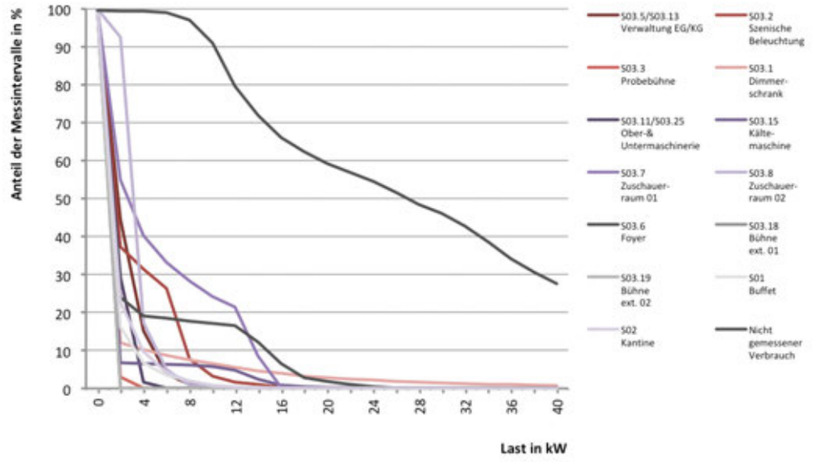

Abb. 285 Summenhäufigkeit von Lasten in den einzelnen Stromkreisen

den gesamten Messzeitraum tageszeitabhängige Durchschnittslasten bestimmt, sodass Stromkreise identifiziert werden konnten, in denen durchgängig Lasten entstehen. Der Tag- und Nachtzeitraum wurde in Abhängigkeit der Nutzung sowie anhand des Standardlastprofils aus [5.3.2.3] festgelegt. Hieraus ergab sich für die Nacht ein Zeitraum zwischen 0.00 Uhr und 8.00 Uhr. Als Tag wurde der verbliebene Zeitraum definiert. Erfolgt eine Gegenüberstellung der Durchschnittslasten für die unterschiedlichen Tageszeiträume, so lassen sich bei „S03.18 Bühne ext. 01“, „S03.19 Bühne ext. 02“ und „S03.8 Zuschauerraum 02“ eher geringe Unterschiede feststellen. Während des Nachtzeitraums ist der Durchschnittsverbrauch gegenüber dem Tagzeitraum um weniger als 20% reduziert. Bereits größere Unterschiede wurden bei „S03.7 Zuschauerraum 01“, „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ und bei „S03.6 Foyer“ sichtbar, dennoch liegt das Verhältnis zwischen dem Durchschnittsverbrauch zur Nacht- und zur Tagzeit noch bei 65%, obwohl in diesen Bereichen zur Nachtzeit weder Beleuchtung noch Arbeitsgeräte benötigt werden. Dies weist darauf hin, dass an diese Stromkreise Geräte oder technische Einrichtungen angeschlossen sind, die einen kontinuierlichen Stromverbrauch aufweisen. Nur noch um 50% erreichen dagegen „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.3 Probebühne“. Extreme Unterschiede werden bei „S03.1 Dimmerschrank“ und „S03.15 Kältemaschine“ sichtbar. Hierbei handelt es sich um Stromkreise, an die hauptsächlich Geräte oder technische Einrichtungen angeschlossen sind, die auf Anforderung laufen. Dennoch ist zu überprüfen, ob der Durchschnittsverbrauch außerhalb der Kernnutzungszeiten des Gebäudes weiter reduziert werden kann. Zur weiteren Analyse kann der Tagbereich in Zeiträume ohne Vorstellung und mit Vorstellungen unterteilt werden. Werden hier die Durchschnittslasten miteinander verglichen, so ist bei nahezu allen Stromkreisen die Last während der Vorstellungen erhöht. Ausnahmen bilden „S03.3 Probebühne“, „S03.18 Bühne ext. 01“, „S03.8 Zuschauerraum 02“ und „S03.19 Bühne ext. 02“, bei denen die Lasten nur minimal höher ausfallen. Dies verdeutlicht, dass das Auftreten der Lasten nicht in Abhängigkeit der Vorstellungen erfolgt. Insbesondere die Nutzung der Probebühne ist eher an die festen Zeiten der Theatergruppen gebunden. Die Stromkreise „S03.13 Verwaltung EG/KG“, „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“, „S03.15 Kältemaschine“ und „S02 Kantine“ zeigen im Verhältnis zu den anderen Stromkreisen eine etwas höhere Durchschnittslast während den Vorstellungszeiten. Die vorliegenden Stromkreise werden aufgrund der angeschlossenen Nutzungsbereiche auch außerhalb der Vorstellungszeiten regelmäßig angesteuert. Jedoch findet während der Vorstellungen eine höhere Frequentierung der Bereiche statt, indem beispielsweise die Künstlergarderoben, welche dem Verwaltungsbereich zugeordnet sind, zusätzlich zu den Büroräumen genutzt werden. Deutlich erhöht ist die Durchschnittslast dagegen bei „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.1 Dimmerschrank“, „S03.7 Zuschauerraum 01“, „S03.6 Foyer“ und „S01 Buffet“. Diese Bereiche zeigen somit eine starke Abhängigkeit von den Vorstellungszeiten, da sie in direktem Zusammenhang mit der Durchführung der Vorstellungen stehen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die betrachteten Stromkreise zwar sehr unterschiedliche Anschlussleistungen zeigen, aber alle während der Messungen ein sehr inkonstantes Lastverhalten aufweisen, welches in vielen Bereichen auf die Abhängigkeit zu den Vorstellungszeiten zurückzuführen ist.

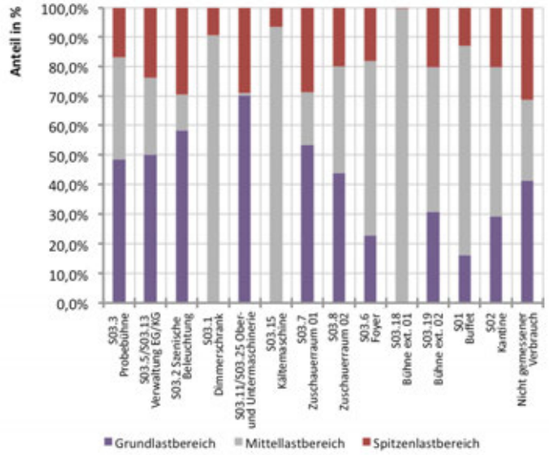

Abb. 286 Anteilige Lastverteilung auf Grund-, Mittel- und Spitzenlastbereich für die einzelnen Stromkreise

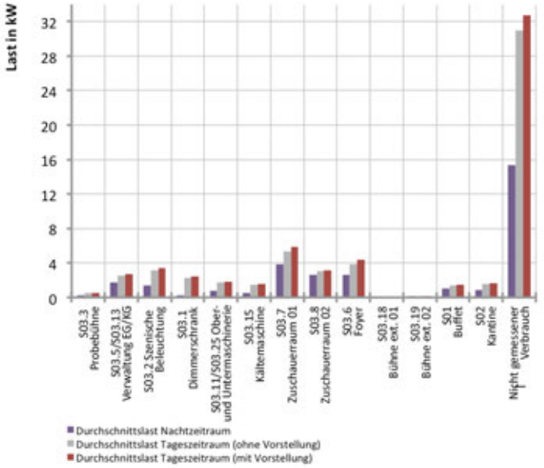

Abb. 287 Durchschnittslasten zu verschiedenen Tageszeiträumen für die einzelnen Stromkreise

Zur detaillierten Analyse des Stromverbrauchs sowie den auftretenden Lasten im Scharoun Theater Wolfsburg wurden Referenzlastgänge nach dem in [5.3.2.3] beschriebenen Vorgehen und für die jeweiligen Tage ermittelt. Für den Typtag 09 – WF, bei dem es sich um Tage handelt, die im Winterhalbjahr als Spielpause einzustufen sind, liegen jedoch keine Lastgangsdaten vor, sodass in diesem Fall kein Referenzlastgang ermittelt werden konnte. Hier hätten lediglich die Tage zwischen Weihnachten bis Sylvester sowie von Neujahr bis zum Ende der ersten Neujahrswoche als solche eingestuft werden können. Da es sich jedoch nur um wenig zusammenhängende Tage handelt, ist eine Abgrenzung zu den „Leerstandstagen“ nicht nachvollziehbar vorzunehmen. Zu den zehn definierten Typtagen wurden im Scharoun Theater Wolfsburg zwei weitere hinzugefügt, da zwischen Vorstellungen unterschieden wird, bei denen der gesamte Vorstellungssaal genutzt und bei denen lediglich die Hinterbühne bestuhlt und bespielt wird.
Zwischen den elf ermittelten Referenzlastprofilen für das Scharoun Theater Wolfsburg bestehen mit Ausnahme von Typtag 10, welcher einen typischen Lastverlauf während der Spielpause abbildet, charakteristische Ähnlichkeiten. Zwischen 0.15 Uhr und 4.45 Uhr ist über die Nacht ein konstanter Lastverlauf zu beobachten. Bei den meisten Typtagen wird ab 4.45 Uhr der erste Lastanstieg sichtbar, welcher bis 7.45 Uhr andauert und möglicherweise auf das automatische Einschalten technischer Anlagen zurückzuführen ist. Lediglich für die Typtage 03, 07, 08, und 11 tritt der Verbrauchsanstieg erst eine Stunde später und damit um 5.45 Uhr auf. Mit Ausnahme von Typtag 03 handelt es sich bei den vier aufgeführten Typtagen um Tage, an denen keine Vorstellungen stattfinden. Nach 7.45 folgt der zweite, höhere Lastanstieg des Tages, in dessen Anschluss sich der Lastverlauf in Abhängigkeit der Typtage stärker unterscheidet. Zwischen 19.00 Uhr und 22.00

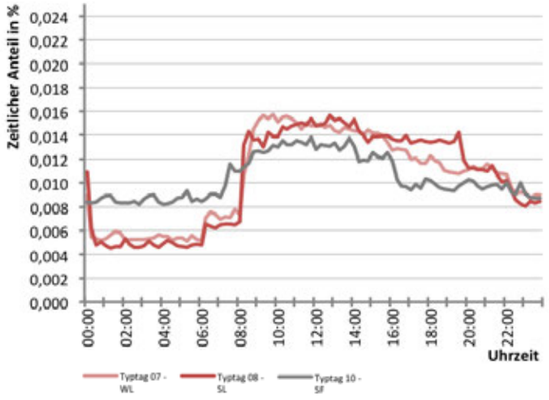

Abb. 288 Referenzlastprofil für Tage ohne Vorstellungen

Abb. 289 Referenzlastprofil für Tage mit Vorstellungen auf der Hinterbühne

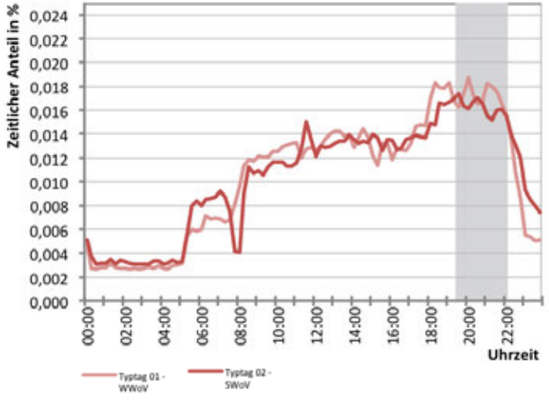

Abb. 290 Referenzlastprofils für Tage mit Vorstellungen unter der Woche

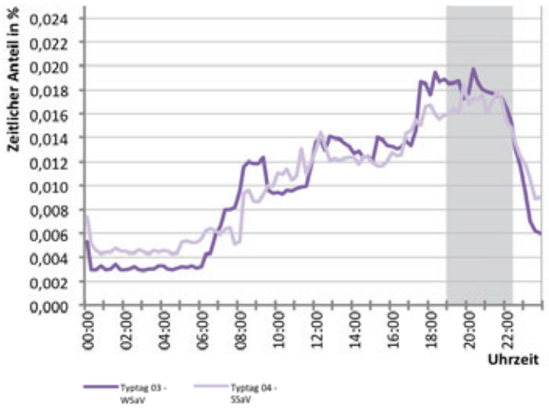

Abb. 291 Referenzlastprofil für Tage mit Vorstellungen an Samstagen

Uhr ist dann je nach Typtag und in Zusammenhang mit den Endzeiten der Vorstellungen ein rapides Absinken der Last zu beobachten, welches bis 22.30 Uhr, bzw. 23.00 Uhr andauert. Bis zu dem Zeitpunkt, ab dem der konstante Nachtverlauf beginnt, sinkt die Last weiter ab.
Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die Verlaufskurven während des Tages stärker, aber auch hier können verschiedene Typtage zusammengefasst werden. So zeigen die Typtage 07, 08, 10, 11 und 12 Parallelen im Kurvenverlauf. Nachdem zwischen 7.45 bis 8.30 Uhr der zweite starke Lastanstieg des Tages verzeichnet wird, ist anschließend ein recht konstanter Tagesverlauf zu beobachten, der sich dennoch in zwei Tagesabschnitte gliedern lässt. Der erste Abschnitt, welcher bis 14.30 Uhr andauert, ist durch einen leicht parabelförmigen Lastverlauf gekennzeichnet, der um 11.30 Uhr zur Mittagszeit seinen Scheitelpunkt erreicht. Besonders bei Typtag 11 ist der Scheitelpunkt durch einen sprunghaften Lastanstieg gekennzeichnet, welcher auch bei genauer Beobachtung für die anderen Typtage identifiziert werden kann, jedoch nicht so markant ausfällt. Der zweite Tagesabschnitt zeigt bei den betrachteten Typtagen Unterschiede. Zunächst erfolgt ab 14.30 Uhr ein leichter Abfall der Last, in dessen Anschluss sich diese bis etwa 15.30 Uhr auf einem gleichbleibenden Niveau stabilisiert. Während die Last nachfolgend bei Typtag 10 sprunghaft und bei Typtag 07 sowie 08 konstant auf das nächtliche Lastniveau absinkt, verharrt diese bei Typtag 11 und 12 auf dem vorherigen Niveau, um ab 17.30 Uhr erneut rapide, bis zum Erreichen eines andauernden hohen Niveaus um 18.15 Uhr, anzusteigen. Dieses dauert bis Ende der Vorstellung an.
Ebenfalls untereinander vergleichbar sind die Typtage 01, 02, 03, 04, 05 und 06. Nach dem zweiten morgendlichen Lastanstieg, welcher bereits für die Typtage 07, 08, 10 und 11 beschrieben worden ist, zeigt sich hier ab 8.30 Uhr und mit Beginn der

Arbeitszeit nur noch ein leichte Steigerung der Last. Auch für diese Typtage lässt sich der Zeitraum in die bereits identifizierten Tagesabschnitte unterteilen. Während sich der erste Abschnitt mit den vorangegangenen Beschreibungen größtenteils deckt und lediglich einen geneigten Verlauf der Parabel aufweist, zeigen sich im zweiten Tagesabschnitt größere Unterschiede. Für Typtag 01, 02, 03 und 04 beginnt dieser mit einem neuerlichen Lastanstieg, welcher um 18.15 Uhr seinen Hochpunkt erreicht. Ab diesem Zeitpunkt verharrt die Last bis zum Ende der Vorstellung auf einem gleichbleibenden Niveau, welches dem Tagesmaximum entspricht. Bei Typtag 05 und 06 endet der erste Tagesabschnitt mit 13.30 Uhr bereits ein wenig früher. Auch hier ist in Anschluss an den ersten Abschnitt wieder ein Anstieg der Last zu beobachten, der schon ab 16.30 Uhr das konstant hohe Niveau erreicht. Dies ist damit zu erklären, dass sonntags die Vorstellungen früher beginnen und enden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei Gegenüberstellung der Lastgänge aus dem Winter- und dem Sommerzeitraum wie bereits bei [5.3.2.3] keine charakteristischen jahreszeitlich bedingten Unterschiede festgestellt werden konnten. Darüber hinaus ist das Lastprofil des Scharoun Theaters Wolfsburg im Vergleich mit den Referenzlastprofilen, die im Rahmen der Querschnittserhebung ermittelt wurden, ebenfalls in zwei große, an den Vorstellungszeiten orientierte, Tagesabschnitte gegliedert. Jedoch weisen diese unterschiedliche Start- und Endzeitpunkte auf.

Um die Referenzlastprofile genauer analysieren und die Verursacher der Lasten identifizieren zu können, müssen in einem weiteren Schritt die Lasten der einzelnen Stromkreise untersucht werden.

Abb. 292 Referenzlastprofils für Tage mit Vorstellungen an Sonntagen

11.2.2.4 Analyse der Standartlastprofile

Nachdem in [11.2.2.3] bereits eine Beschreibung des Tagesverlaufs der Referenzlastprofile vorgenommen wurde, werden im Folgenden die Auswirkungen der einzelnen Stromkreise auf den Tagesverlauf untersucht. Insgesamt wurden für 12 Typtage Referenzlastprofile gebildet. Eine Zuordnung von Tagen im Messzeitraum zu Typtag 09_WF konnte jedoch nicht erfolgen, sodass dieser Typtag nicht Bestandteil der nachfolgenden Betrachtung ist.

Allen Referenzlastprofilen ist gemein, dass die Lasten der gesamten Stromkreise nachts im Zeitraum von 0.15 Uhr bis mindestens 5.00 Uhr einen sehr konstanten Verlauf aufweisen. Mit Ausnahme von 08_SL erzeugt der „nicht gemessene Verbrauch“ mindestens die Hälfte der Gesamtlast. Darüber hinaus erfolgt nach unterschiedlichen Lastverläufen während des Tages ohne Berücksichtigung von 07_WL, 08_SL und 10_SF, den Typtagen, an denen keine Vorstellungen stattfinden, im Zeitraum von 21.15 Uhr bis 23.30 Uhr ein starkes Absinken der Gesamtlast. Dieses wird vor allem durch die schlagartig verringerten Lasten der Stromkreise „S01 Buffet“, „S03.1 Dimmerschrank“, „S03.6 Foyer“, „03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ und „S03.18 Bühne ext. 01“ ausgelöst und ist auf das Ende der Vorstellungen zurückzuführen. Auch bei den Stromkreisen „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“ sinken die Lasten in diesem Zeitraum, jedoch erfolgt dieses weniger rapide. Bei den Typtagen 07_WL, 08_SL und 10_SF ist die maximale Last des Tages dagegen spätestens zur Mittagszeit erreicht, sodass anschließend ein kontinuierliches Absinken der Lasten erfolgt. Während die meisten Stromkreise bereits nach dem starken Abfall der Gesamtlast ihr nächtliches konstantes Niveau erreicht haben, ist beim „Nicht gemessenen Verbrauch“ nochmals um 0.15 Uhr ein deutliches, rapides Absinken zu beobachten. Der „Nicht gemessene Verbrauch“ beinhaltet auch gebäudetechnische Anlagen, welche zu diesem Zeitpunkt möglicherweise abgeschaltet oder auf

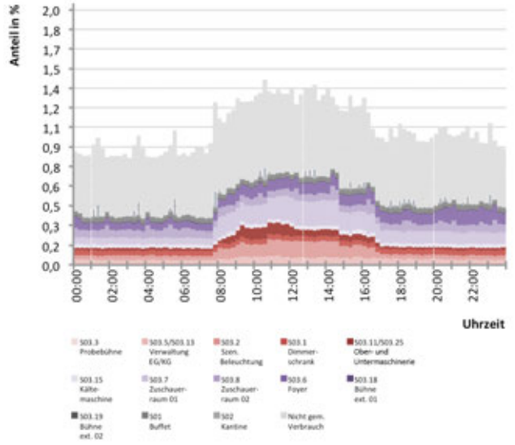

Abb. 293 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 10_SF

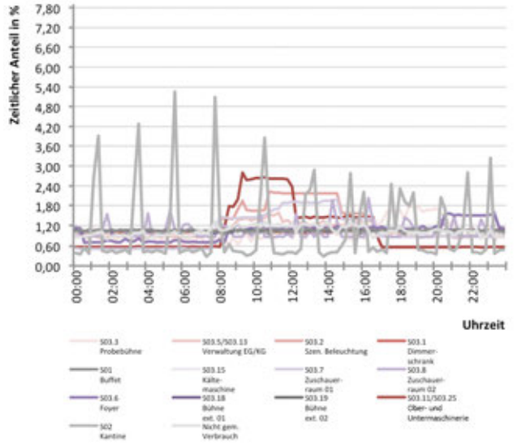

Abb. 294 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 10_SF

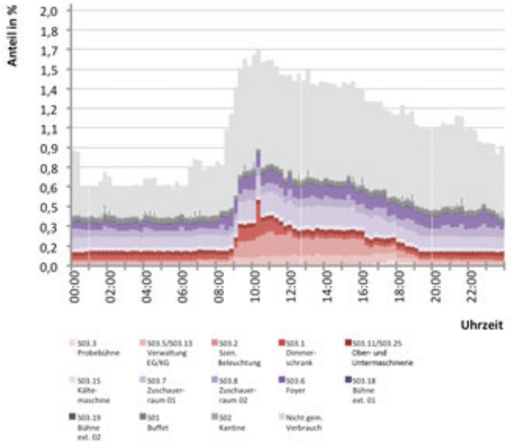

Abb. 295 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 07_WL

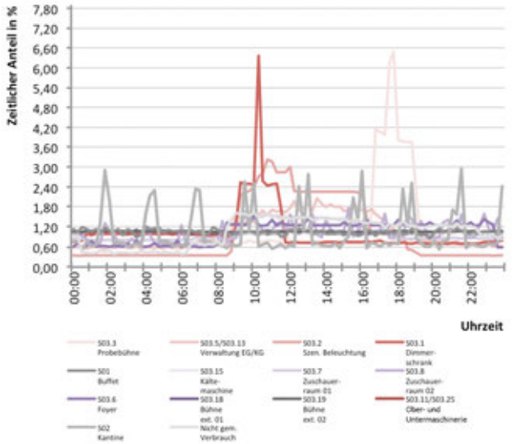

Abb. 296 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 07_WL

Nachtbetrieb umgeschaltet werden. Ein einheitlicher und über den gesamten Tag konstanter Lastverlauf, unabhängig vom Typtag, ist beim Stromkreis „S03.19 Bühne ext. 02“ zu beobachten. Die durch den Stromkreis verursachten Lasten sind sehr gering und weisen bei den meisten Typtagen dauerhaft einen Anteil an der Gesamtlast unter 1,0% auf. Die restlichen Stromkreise zeigen im Abhängigkeit der Typtage unterschiedliche Lastverläufe und tragen dazu bei, dass die Referenzlastprofile durch unterschiedliche Hoch- und Tiefpunkte geprägt sind. Geringe Lastschwankungen für die einzelnen Stromkreise sind bei 07_WL, 08_SL und 10_SF zu beobachten, sodass ein starker Einfluss der Vorstellungen sowie deren Vorbereitung auf den Lastverlauf festgestellt werden kann.

Das Referenzlastprofil SF_10 beinhaltet Tage in den Sommermonaten, die innerhalb der Spielpause liegen. Hier erfolgt nach dem konstanten nächtlichen Verlauf erst gegen 7.30 Uhr und damit gegenüber anderen Typtagen deutlich später ein starker Lastanstieg. Dieser wird vor allem durch die große Steigerung der Last in Stromkreis „S03.7 Zuschauerraum 01“ ausgelöst. Ebenfalls eine Lasterhöhung erfolgt zu diesem Zeitpunkt in den Stromkreisen „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ und „S03.6 Foyer“. Die dort erzeugten Lasten erreichen ihren Höhepunkt, vor allem in „S03.2 Szenische Beleuchtung“, zur Mittagszeit. Anschließend sinken sie wieder leicht ab, was ebenfalls zu einer Verringerung der Gesamtlast führt. Um 16.15 Uhr fällt die Gesamtlast rapide, vor allem da die Lasten für „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“ stark zurückgehen. Der „Nicht gemessene Verbrauch“ verläuft über den gesamten Tag recht konstant, da in den Sommerferien eine Gesamtabschaltung vieler gebäudetechnischer Anlagen, wie der Lüftungs- und Kälteanlage, erfolgt.

Im Gegensatz zu 10_SF erfolgt bei 07_WL

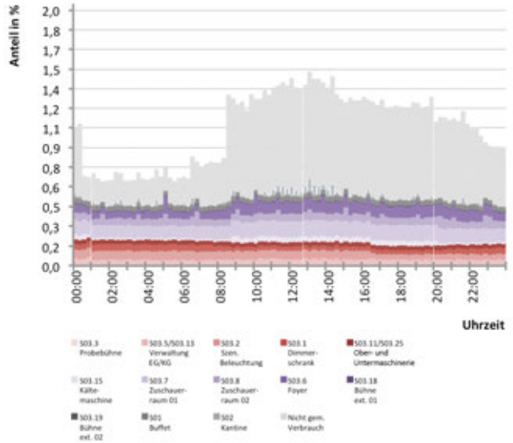

Abb. 297 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 08_SL

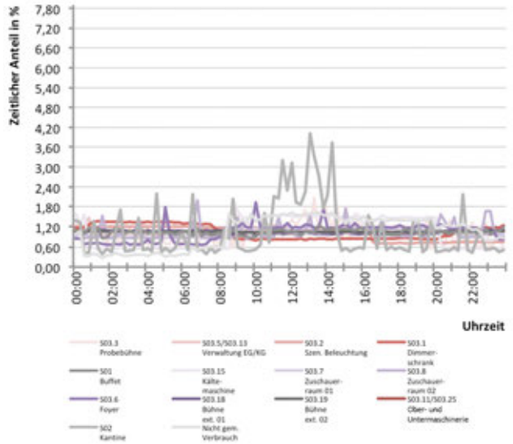

Abb. 298 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 08_SL

(Leerstandstage im Winter) bereits um 6.30 Uhr und damit eine Stunde früher der erste Lastanstieg des Tages, welcher vollständig auf den „Nicht gemessenen Verbrauch“ zurückzuführen ist. Es ist zu vermuten, dass zu diesem Zeitpunkt eine automatische Einschaltung gebäudetechnischer Anlagen stattfindet. Ein weiterer Lastanstieg ist ab 8.30 Uhr zu beobachten. Auch zu diesem Zeitpunkt erfolgt eine starke Erhöhung der Last, die dem „Nicht gemessenen Verbrauch“ zugeordnet werden kann und möglicherweise auf die Aktivierung der Lüftungsanlagen zurückzuführen ist. Darüber hinaus steigen, bedingt durch den Arbeitsbeginn der am Scharoun Theater Wolfsburg Beschäftigten, auch die Lasten in „S03.1 Dimmerschrank“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.7 Zuschauerraum 01“, „S03.5/S03.13, Verwaltung EG/KG“ und „S03.6 Foyer“ stark an. Ein Maximum der Last wird kurz vor Mittag gegen 11.45 Uhr erreicht, welches vor allen durch „S03.1 Dimmerschrank“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“ hervorgerufen wird. Es ist daher zu vermuten, dass in der Vormittagszeit Arbeiten auf der Bühne stattfinden. Unmittelbar im Anschluss an das Maximum verringern sich die Lasten wieder und der Lastverlauf aller Stromkreise, mit Ausnahme des „Nicht gemessenen Verbrauchs“, der dauerhaft minimal sinkt, stabilisiert sich weitestgehend bis 16.15 Uhr. Ab 19.15 Uhr fallen in allen Stromkreisen konstante Lasten an, nachdem sich hauptsächlich die Lasten von „S03.7 Zuschauerraum 01“, „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“ seit 16.5 Uhr reduziert haben. Lediglich die Last des „Nicht gemessenen Verbrauchs“ verringert sich weiterhin kontinuierlich bis sie um 0.15 Uhr mit Abschalten der letzten gebäudetechnischen Anlagen ihr nächtliches Niveau erreicht hat.

Verglichen mit 07_WL unterscheidet sich der Tagesverlauf für 08_SL (Leerstandstage im Sommer), da das Gesamtlastprofil hauptsächlich durch die Schwankungen des „Nicht gemessenen Verbrauchs“ geprägt ist. Alle übrigen Stromkreise zeigen, mit

Ausnahme von „S02 Kantine“, einen nahezu konstanten Verlauf ohne große Lastausschläge. „S02 Kantine“ zeigt zur Mittagszeit zwischen 11.15 Uhr und 14.15 Uhr Lastschwankungen, sodass auf die Nutzung der Kantine zu diesem Zweitpunkt geschlossen werden kann. Obwohl sich die Tagestypen 08_SL und 07_WL nur in der Jahreszeit unterscheiden, ist ihr Verlauf sehr unterschiedlich. Zur Bildung der Referenzlastprofile [siehe 5.3.2.3] werden zwei repräsentative Lastgänge ermittelt. Für 07_WL handelt es sich in beiden Fällen um einen Montag, während für 08_SL ein Freitag und ein Donnerstag zu Grunde gelegt wurden. In [11.2.1.4] hat sich bereits gezeigt, dass je nach Wochentag unterschiedliche durchschnittliche Energieverbräuche in den verschiedenen Stromkreisen bestehen, sodass der Unterschied zwischen den beiden Tagestypen möglicherweise auf die Verwendung verschiedener Wochentage zurückgeführt werden kann.

Deutlich größere Lastschwankungen sind jedoch generell an Tagen mit Vorstellungen festzustellen. Hierzu zählen die Typtage 01_WWoV und 02_SWoV, bei denen es sich um Wochentage mit Vorstellungen handelt, 03_WSaV und 04_SSaV, die Samstage mit Vorstellungen umfassen und 05_WSoV und 06_SSoV, welche sonntägliche Vorstellungstage beinhalten. Darüber hinaus wurden mit den Typtagen 11_WVV und 12_SVV auch Tage mit Vorstellungen auf der Hinterbühne untersucht.

Verglichen mit den bisher betrachteten Typtagen ist sowohl bei 06_SSoV als auch bei 05_WSoV ein erster Lastanstieg bereits um 5.45 Uhr zu beobachten. Ursächlich für diesen Lastanstieg bei 06_SSoV sind vor allem die Verbraucher in „S03.6 Foyer“. Auch die durch den „nicht gemessenen Verbrauch“ entstehenden Lasten, die ab diesem Zeitpunkt kontinuierlich bis zum Abend steigen, tragen zum Lastanstieg bei. Einen weiteren, jedoch verhältnismäßig geringeren, Beitrag leisten „S03.18 Bühne ext. 01“, „S01 Buffet“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“, da sich bei diesen Stromkreisen ein sprunghafter Lastanstieg zeigt. Bis

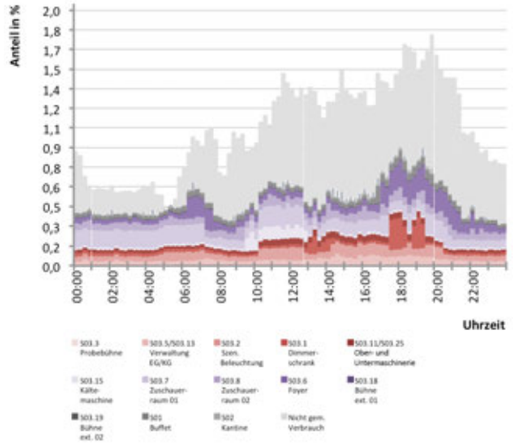

Abb. 299 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 06_SSoV

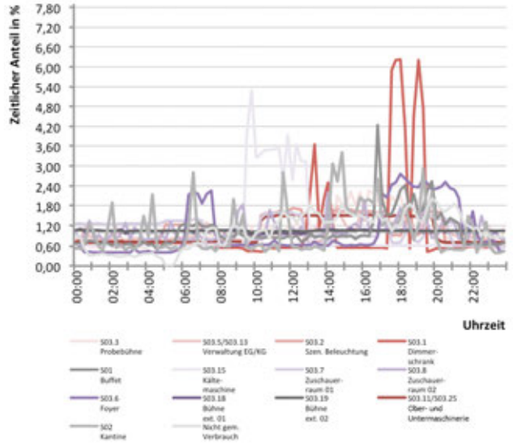

Abb. 300 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 06_SSoV

8.00 Uhr bleibt die Last konstant, bevor sie anschließend stark abfällt. Dieser starke Lastabfall lässt sich auch für „S03.6 Foyer“ und „S03.18 Bühne ext. 01“ beobachten und führt insgesamt für die Dauer einer halben Stunde zu einer deutlich verringerten Gesamtlast. Der anschließende Lastanstieg ist zunächst auf den „nicht gemessenen Verbrauch“ zurückzuführen. Zwischen 10.00 Uhr und 12.45 Uhr erhöhen sich auch die Lasten in den Stromkreisen „S03.7 Zuschauerraum 01“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ wieder. Auch die Kältemaschine erzeugt zu diesem Zeitpunkt eine Last. Dieses Lastverhalten zeigt sich in ähnlicher Weise auch bei 07_WL und wurde mit Arbeiten auf der Bühne und im Zuschauersaal assoziiert. Während einer etwa einstündiger Unterbrechung zur Mittagszeit, reduzieren sich die Lasten dieser Stromkreise mit Ausnahme von „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“, was ebenfalls für den Zusammenhang mit Arbeiten in diesem Bereich spricht. Während des Mittagszeitraums sind dafür gesteigerte Lasten bei „S03.1 Dimmerschrank“ zu beobachten, sodass der Abfall der Gesamtlast nicht so stark ausgeprägt ist. Im Anschluss an die Mittagszeit verlaufen die Lasten recht konstant, bis ab 16.30 Uhr die Vorbereitung auf die Vorstellung beginnen und besonders die Lasten von „S03.6 Foyer“, „S03.18 Bühne ext. 01“, „S01 Buffet“ und „S03.1 Dimmerschrank“ zeigt während der Vorstellungszeit Lastspitzen, was durch die szenische Beleuchtung zu erklären ist. Auch „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ zeigt einen leichten, aber kontinuierlichen Lastanstieg zur Vorstellungszeit, welcher auf die Nutzung der Garderoben zurückzuführen ist. Erst gegen 21.00 Uhr, nach Ende der Vorstellung, ist ein starker Lastabfall zu beobachten, der nahezu alle Stromkreise betrifft.

Der Tagesverlauf für 05_WSoV ist teilweise vergleichbar mit 06_SSoV. Ein Unterschied besteht jedoch darin, dass beim ersten Lastanstieg des Tages eine parallele Laststeigerung in den Stromkreisen

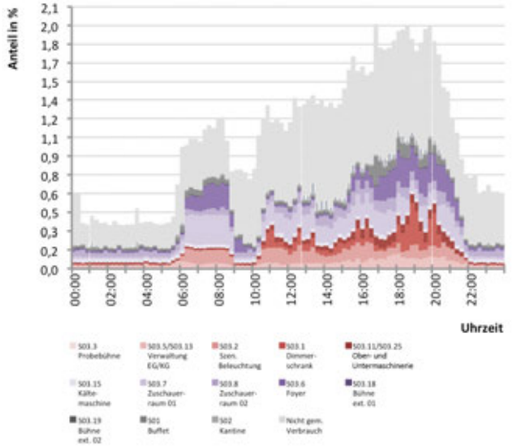

Abb. 301 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 05_WSoV

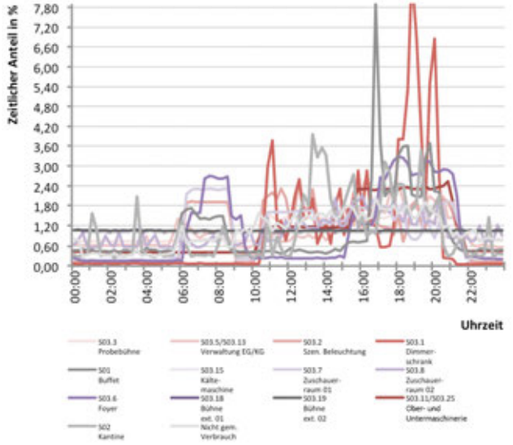

Abb. 302 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 05_WSoV

„S03.6 Foyer“, „S03.18 Bühne ext. 01“, „S01 Buffet“, „S03.7 Zuschauerraum 01“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“ erfolgt. Anders als bei 06_SSoV wird der Lastanstieg maßgeblich durch „S03.7 Zuschauerraum 01“ verursacht. Im Zeitraum von 8.30 Uhr bis 10.15 Uhr reduzieren sich die Lasten in diesen Stromkreisen erheblich, um sich anschließend wieder auf das Niveau des ersten Lastanstiegs zu steigern. Eine Ausnahme bilden hier nur „S03.6 Foyer“ und „S03.18 Bühne ext. 01“, bei denen die Last bis 14.45 Uhr konstant niedrig bleibt. Durch die Laststeigerung in diesen beiden Stromkreisen um 14.45 Uhr kommt es erneut zu einem starken Lastanstieg, zu dem auch „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ und „S03.8 Zuschauerraum 02“ einen Beitrag leisten. Wie bereits bei 06_SSoV beginnen wenig später weitere Vorbereitungen für die Vorstellung, sodass auch „S01 Buffet“ und „S03.1 Dimmerschrank“ einen starken Lastanstieg erfahren

Die beiden nachfolgend dargestellten Referenzlastprofile basieren auf Samstagen, an denen Vorstellungen stattfanden. Wie bei den bereits beschriebenen Referenzlastprofilen erfolgt nach einem konstanten nächtlichen Verlauf auch bei 04_SSaV morgens ein sprunghafter Lastanstieg. In diesem Fall findet der Lastanstieg jedoch bereits um 5.15 Uhr, aufgrund der erhöhten Last in den Stromkreisen „S03.6 Foyer“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.8 Zuschauerraum 02“, statt. Wie schon bei den Referenzlastprofilen 05_WSoV und 06_SSoV beobachtet, ist nach dem ersten Lastanstieg ein starker Lastrückgang festzustellen. Der Lastrückgang zwischen 7.45 Uhr und 8.15 Uhr ist in diesem Fall jedoch auf eine erheblich reduzierte Last beim „nicht gemessenen Verbrauch“ zurückzuführen, da die Lasten in den Stromkreisen „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“ sogar nochmals sprunghaft ansteigen. Der anschließend weitere Anstieg der Last ist durch das Wiedereinsetzen des „Nicht gemessenen

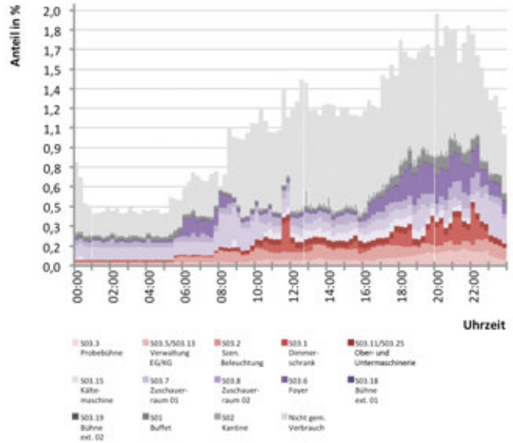

Abb. 303 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 04_SSaV

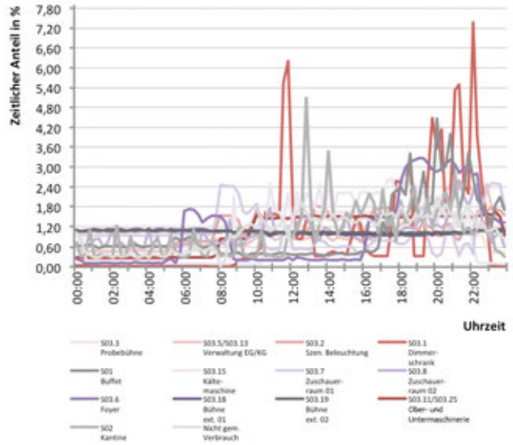

Abb. 304 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 04_SSaV

Verbrauchs“ zu erklären. Bis 16.30 Uhr verhält sich die Last mit Ausnahme kleiner Schwankungen in „S03.1 Dimmerschrank“ kurz vor Mittag und „S02 Kantine“ während der Mittagszeit recht konstant. Ab 16.30 Uhr beginnt ein kontinuierlicher Anstieg der Gesamtlast durch die Erhöhung der Lasten in den Stromkreisen „S01 Buffet“, „S03.1 Dimmerschrank“, „S03.6 Foyer“, „S03.18 Bühne ext. 01“. Diese ist, wie bereits bei SSoV beschrieben, auf die Vorbereitung und Durchführung der Vorstellung zurückzuführen. Um 23.30 Uhr, später als bei 05_WSoV und 06_SSoV, sinkt die Last in den beschriebenen Stromkreisen erheblich. Der spätere Zeitpunkt des Absinkens der Lasten sowie das Auftreten des Maximums der Gesamtlast um 20.00 Uhr verdeutlichen die Auswirkungen des durchschnittlich späteren Beginns und Endes der samstäglichen gegenüber den sonntäglichen Vorstellungen auf den Lastverlauf.

Ebenso wie bei 04_SSaV setzt bei 03_WSaV morgens ein starker Lastanstieg ein, der durch „S03.6 Foyer“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“ ausgelöst wird. Darüber hinaus tragen auch „S03.7 Zuschauerraum 01“, „S03.18 Bühne ext. 01“ und der „Nicht gemessene Verbrauch“ zum Lastanstieg bei. Anders als bei 04_SSaV beginnt der Lastanstieg mit 6.30 Uhr jedoch erst 1,25 h später. Zwischen 9.30 Uhr und 12.00 Uhr ist ein starkes Absinken der Last zu beobachten, da in den Stromkreisen „S03.6 Foyer“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.18 Bühne ext. 01“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“ ein starker Rückgang der Last vorliegt. Ab 12.00 Uhr steigen die Lasten in „S03.7 Zuschauerraum 01“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“ wieder an. Eine weitere Steigerung der Gesamtlast wird durch die Lasten in „S02 Kantine“ über die Mittagszeit begünstigt. Auch bei Typtag 03_WSaV erfolgen die Vorbereitungen auf die Vorstellung am Nachmittag. Ab 17.00 Uhr, ebenfalls ein wenig später als bei 04_SSaV, wird ein starker Lastanstieg durch „S01 Buffet“, „S03.1 Dimmerschrank“, „S03.6 Foyer“ und „S03.18 Bühne ext. 01“ verursacht. Besonders

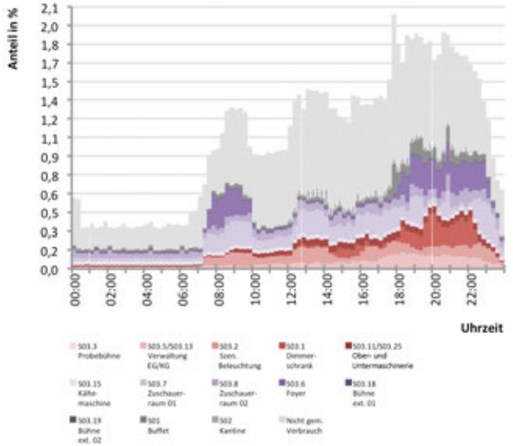

Abb. 305 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 03_WSaV

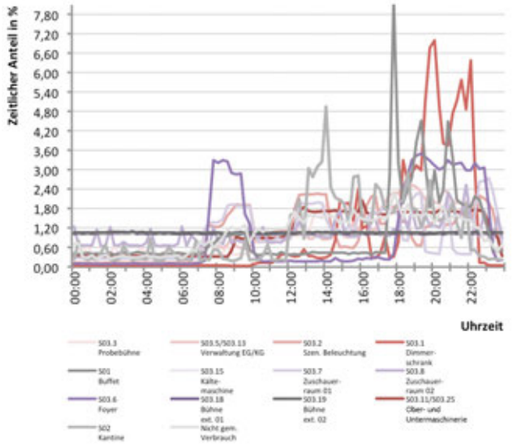

Abb. 306 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 03_WSaV

„S03.1 Dimmerschrank“ und „S03.6 Foyer“ tragen neben dem „Nicht gemessenen Verbrauch“ während der Vorstellung einen großen Anteil von mehr als 10% an der Gesamtlast.
Die Typtage 01_WWoV und 02_SWoV stellen Wochentage mit Vorstellung dar. Der Beginn der Vorstellungen ist jeweils vergleichbar mit den Uhrzeiten an Samstagen. Wie bereits eingangs beschrieben, zeigt auch 02_SWoV nachts einen konstanten Verlauf, bis um 5.30 Uhr ein starker Anstieg der Last erfolgt. Dieser Lastanstieg wird maßgeblich durch „S03.6 Foyer“ und „S03.7 Zuschauerraum 01“ verursacht. Ebenso findet ein Anstieg der Last im Stromkreis „S02 Buffet“ statt, der sich aufgrund des geringen Lastanteils nicht erheblich auf die Gesamtlast auswirkt. Auch im Bereich des „Nicht gemessenen Verbrauchs“ findet eine Lasterhöhung statt. Darüber hinaus beginnt eine kontinuierliche Steigerung der Lasten von „S03.2 Szenische Beleuchtung“ und „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“. Im Zeitraum zwischen 7.45 Uhr und 8.30 Uhr lässt sich eine sprunghafte Verringerung der Last beobachten, da hier der „Nicht gemessene Verbrauch“ so gut wie keine Last verursacht. Der anschließende Lastverlauf verhält sich bis etwa 18.00 Uhr recht konstant. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt aufgrund der Vorbereitung und Durchführung der Vorstellung ein starker Lastanstieg, der wie bereits bei vorherigen Typtagen auf die gesteigerten Lasten von „S03.6 Foyer“, „S01 Buffet“ und vor allem auch „S03.1 Dimmerschrank“ zurückzuführen ist. Gegenüber den Vorstellungstagen am Wochenende beginnen die Vorbereitungen auf die Vorstellung jedoch etwas später. Auch hier ist der Anteil an der Gesamtlast für „S03.1 Dimmerschrank“ während der Vorstellungen besonders hoch. Zwischen 19.45 Uhr und 21.30 Uhr liegt dieser fast konstant über 10%. Der stark erhöhte Lastanteil von „S03.6 Foyer“ erstreckt sich über einen längeren Zeitraum, welcher auch die Öffnungszeiten des Foyers vor und nach der Vorstellung umfasst. Von 18.30 Uhr bis 23.15 Uhr beträgt dieser ebenfalls mehr

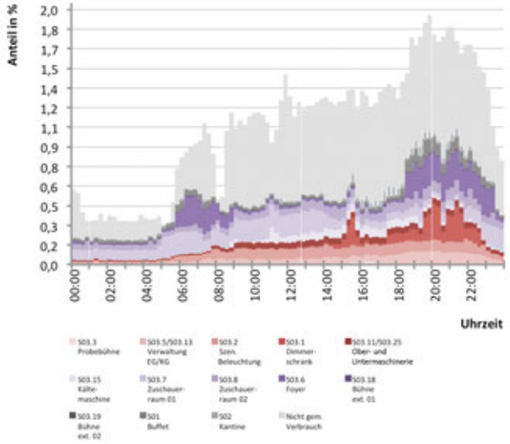

Abb. 307 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 02_SWoV

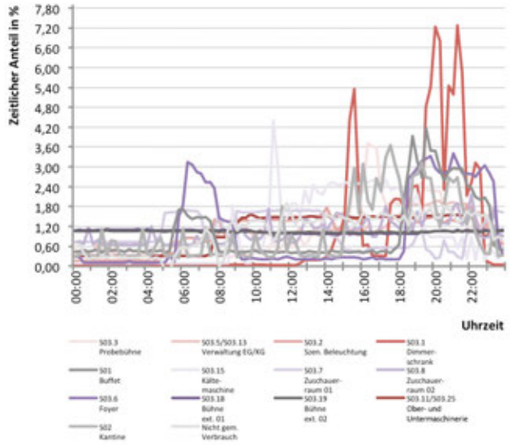

Abb. 308 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 02_SWoV

als 10% an der Gesamtlast. Die erhöhte Last im Bereich „S01 Buffet“ deckt sich mit dem Zeitraum der erhöhten Last in „S03.6 Foyer“, da auf diesen Stromkreis Verbraucher zur gastronomischen Versorgung der Zuschauer aufgeschaltet sind. Weniger stark im Verhältnis zur Gesamtlast fällt die Lasterhöhung in „S03.18 Bühne ext. 01“ ins Gewicht. Ebenso zeigen „S01 Kantine“, aufgrund der Verpflegung der Schauspieler sowie des technischen Personals und „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“, wegen der Nutzung des Garderobenbereichs, leicht erhöhte Lasten.
Für 01_WWoV ist der Zeitpunkt des Beginns des Tages mit 02_SWoV identisch. Der erste starke Lastanstieg um 5.30 Uhr wird wiederum maßgeblich durch „S03.7 Zuschauerraum 01“ geprägt. Zusätzlich erfolgt ein weiterer Lastanstieg bei „S03.2 Szenische Beleuchtung“. Eine Steigerung der Last im Bereich „S03.6 Foyer“ bleibt jedoch zunächst aus. Ein erneuter Anstieg der Gesamtlast ab 7.30 Uhr wird durch „S03.6 Foyer“ sowie den „Nicht gemessenen Verbrauch“ geprägt. Im weiteren Tagesverlauf erfolgt ab ca. 8.00 Uhr mit Beginn der Arbeitszeiten in den Büros eine Erhöhung der Last im Bereich „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“. Auch für „S03.1 Dimmerschrank“ und „03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ werden ab diesem Zeitpunkt sichtbar Lasten verzeichnet. Bis zur Mittagszeit um 12.45 Uhr erfolgt eine leichte Steigerung der Gesamtlast. Im Anschluss daran sinkt diese bis 15.45 Uhr kontinuierlich und stagniert bis 18.15 Uhr auf einem Niveau. Ab dann beginnt, wie bei 01_SWoV, die Vorbereitung auf die Vorstellung mit einem starken Lastanstieg.
Bei den beiden letzten verbleibenden Typtagen handelt es sich um Tage, an denen kleinere Vorstellungen auf der Hinterbühne stattfinden. Auch für 12_SVV erfolgt ein konstanter nächtlicher Verlauf, der sich jedoch bereits um 4.15 Uhr und damit früher als bei den restlichen Typtagen ändert. Zurückzuführen ist dies auf die Lasterhöhung in den Stromkreisen „S03.7 Zuschauerraum 01“, „S03.2 Szenische Beleuchtung“

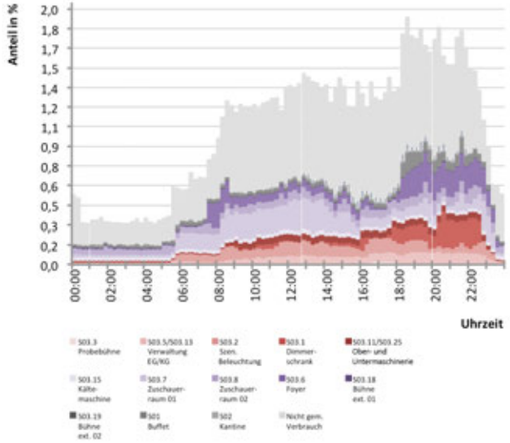

Abb. 309 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 01_WWoV

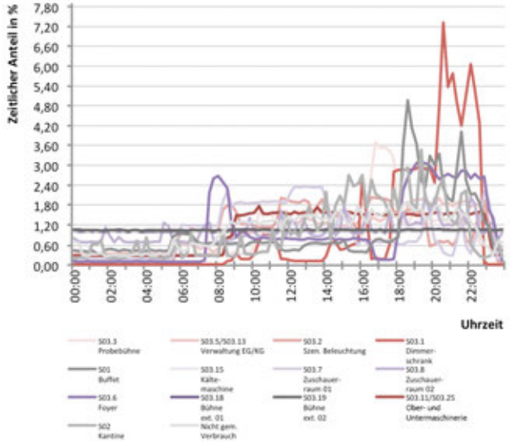

Abb. 310 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 01_WWoV

und „S03.6 Foyer“. Eine Last für den „Nicht gemessenen Verbrauch“ ist zu diesem Zeitpunkt kaum zu verzeichnen. Erst ab 5.45 Uhr erfolgt ein erneut starker Lastanstieg, der vor allem durch das Wiedereinsetzen des „Nicht gemessenen Verbrauchs“ hervorgerufen wird. Ebenso ist eine weitere Steigerung der Lasten „S03.7 Zuschauerraum 01“ festzustellen. Gegen 7.30 Uhr sinkt die Gesamtlast aufgrund des „Nicht gemessenen Verbrauchs“ nochmals bis 8.15 Uhr ab. Durch die sich erhöhenden Lasten bei „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.6 Foyer“ und „S03.1 Dimmerschrank“ findet anschließend ein starker Lastanstieg statt. Danach bleiben die Lasten mit Ausnahme des „Nicht gemessenen Verbrauchs“ und „S03.6 Foyer“ bis 18.15 Uhr recht konstant. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt nochmals ein größerer Anstieg, welcher durch hohe Lasten in „S03.1 Dimmerschrank“ entsteht. Einhergehend mit der Vorstellungszeit erhöhen sich außerdem die Lasten für die gastronomische Versorgung der Zuschauer sowie des künstlerischen und technischen Personals, wie anhand „S01 Buffet“ und „S02 Kantine“ zu sehen ist. Vergleichen mit den anderen Typtagen, an denen Vorstellungen unter Nutzung des Zuschauersaals stattfanden, hebt sich die Vorstellungszeit weniger deutlich vom Lastverlauf des restlichen Tags ab, da die Laststeigerung vor allem für den „Nicht gemessenen Verbrauch“ und „S03.6 Foyer“ weniger ausgeprägt ist. Begründet werden kann dies mit einem geringeren technischen Aufwand, beispielsweise für die Klimatisierung, da Vorstellungen auf der Hinterbühne von maximal 200 Personen besucht werden können.

Gegenüber 12_SVV ist bei 11_WVV der erste Lastanstieg des Tages zur gewöhnlichen Uhrzeit von 5.15 Uhr festzustellen. Wie auch an anderen Typtagen ist ein maßgeblicher Auslöser „S03.6 Foyer“. Ein weiterer starker Lastanstieg erfolgt um 7.15 Uhr, da hier bei „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.7 Zuschauerraum 01“, „S01 Buffet“, „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ und dem „Nicht gemessenen

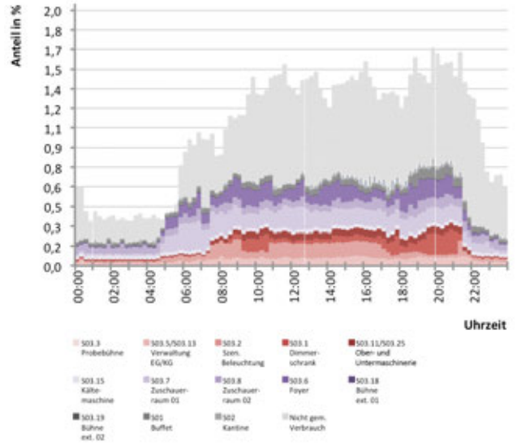

Abb. 312 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 12_SVV

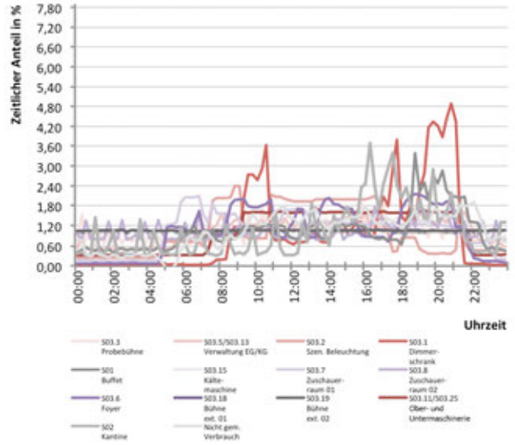

Abb. 311 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 12_SVV

Verbrauch“ ein paralleler Anstieg zu beobachten ist. Um 9.00 Uhr wird ein kurzes Absinken der Gesamtlast sichtbar, da die Last von „S03.6 Foyer“ fast vollständig zurückgeht. Anschließend erfolgt ein neuerlicher leichter Lastanstieg, nach dem sich die Lasten in den meisten Stromkreisen auf einem gleichbleibenden Niveau verharren. Zur Mittagszeit setzen jedoch größere Lasten in „S03.1 Dimmerschrank“ ein, die eine kontinuierliche Steigerung erfahren. Hierdurch kommt es ebenfalls zu einer Erhöhung der Gesamtlast. Wie bereits bei 12_SVV erfolgt gegen Abend mit Vorbereitung auf die Vorstellung nochmals ein starker Lastanstieg, der jedoch bereits um 17.30 Uhr und somit 45min früher einsetzt. Hervorgerufen wird der Lastanstieg durch die gleichen, unter 12_SVV aufgeführten, Stromkreise.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich der Lastverlauf der Tage mit und ohne Vorstellungen deutlich voneinander unterscheidet, da der Einfluss der Vorstellungen deutlich sichtbar ist, indem zu diesem Zeitpunkt eine maximale Gesamtlast erreicht wird. Den größten Einfluss auf den Gesamtlastverlauf üben der „Nicht gemessene Verbrauch“, „S03.6 Foyer“, „S03.7 Zuschauerraum 01“ und „S03.1 Dimmerschrank“ aus, da hier die größten Lasten auftreten, welche während der Vorstellungen besonders hoch sind. Kaum Auswirkungen haben dagegen „S03.3 Probebühne“, „S03.18 Bühne ext. 01“ und „S03.19 Bühne ext. 02“ aufgrund der verhältnismäßig sehr geringen Lasten. Aber auch „S03.15“ Kältemaschine sowie „S02 Kantine“ üben nur einen geringen Einfluss auf, da vor allem bei der Kältemaschine nur in den Sommermonaten temporär höhere Lasten auftreten. Ebenfalls kommt es bei „S02 Kantine“ nutzungsbedingt nur zeitweise zu etwas höheren Lasten. Lasten, die sich auf die Höhe der Gesamtlast auswirken, jedoch aufgrund ihrer Konstanz nicht zu großen Lastschwankungen führen, treten bei „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“, „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ und „S03.8 Zuschauerraum 02“ auf.

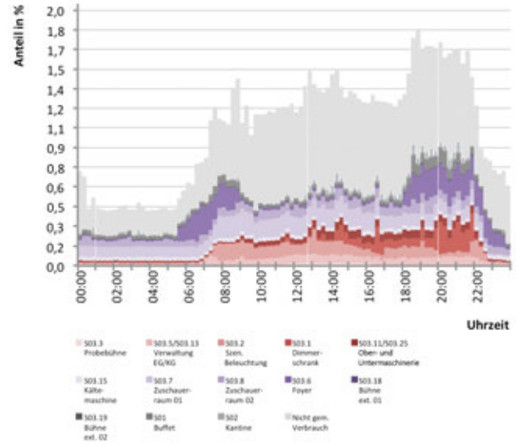

Abb. 313 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 11_WVV

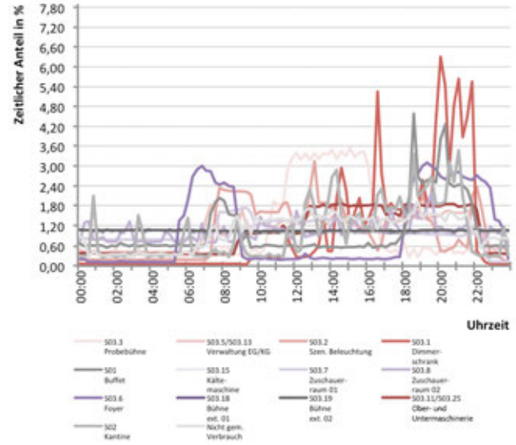

Abb. 314 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 11_WVV

11.2.2.5 Analyse des Lastverlaufs einzelner Stromkreise

In [11.2.2.4] wurde bereits eine Analyse der Standardlastprofile vorgenommen, indem die Zusammensetzung der Gesamtlast im Tagesverlauf untersucht wurde. Hierbei wurde festgestellt, dass die Lasten der einzelnen Stromkreise unterschiedliche Auswirkungen auf die Gesamtlast zeigen und sich die Zusammenhänge mit den Nutzungszuständen unterscheiden. Nachdem bei der dortigen Betrachtung der Fokus auf der Analyse der einzelnen Typtage lag, wird im Folgenden das Augenmerk auf den Lastverlauf der der einzelnen Stromkreise gelegt, um Abhängigkeiten und Verlaufsmuster identifizieren zu können.

Die größten Lasten treten in den Stromkreisen „S03.6 Foyer“, „S03.7 Zuschauerraum 01“, „S03.1 Dimmerschrank“ sowie für den „Nicht gemessenen Verbrauch“ auf.

Es lässt sich festhalten, dass der „Nicht gemessene Verbrauch“ fast während des gesamten Tages den größten Anteil der Last verursacht. Geprägt wird der Lastverlauf durch mehrere Abschnitte im Lauf des Tages. Besonders ausgeprägt ist der stufenweise Lastanstieg an Tagen ohne Vorstellung. Gegen 5.30 Uhr erfolgt ein erster leichter Lastanstieg, welcher vermutlich auf das Einsetzen erster technischer Anlagen zurückzuführen ist. Im weiteren Verlauf findet um 8.00 Uhr ein stärkerer Anstieg, unter anderem bedingt durch die Laufzeiten der Lüftungsanlagen, statt. Nach dem zweiten Lastanstieg des Tages ist ein unterschiedliches Lastverhalten für Tage mit und ohne Vorstellungen zu beobachten. An Tagen ohne Vorstellungen ist die maximale Last bereits kurz nach dem starken Lastanstieg erreicht. Anschließend sinkt die Last bis 0.15 Uhr kontinuierlich ab. Zu diesem Zeitpunkt ist ein starker Lastabfall zu verzeichnen, in dessen Anschluss die sich die Lasten bis zum Morgen konstant verhalten. An Tagen mit Vorstellung erfolgt zwischen 8.00 Uhr und 0.15 Uhr ein parabelförmiger Verlauf, welcher während der Vorstellungen in den Abendstunden das Maximum erreicht. Zur Vorstellungszeit erzeugt vermutlich die Anlagentechnik große Lasten, da die Klimatisierung sowie die Belüftung der zuschauerfrequentierten Bereiche sichergestellt werden müssen. Ein stark abweichender Lastverlauf des „Nicht gemessenen Verbrauchs“ kann an „Ferientagen“ festgestellt werden. Hier entfällt der stufenweise Anstieg der Lasten weitestgehend, sodass ein recht konstanter Verlauf entsteht. Nur im Zeitraum von 6.00 Uhr bis 16.30 Uhr, in den auch die Arbeitszeiten in den Büroräumen integriert sind, gestaltet sich der Verlauf leicht parabelförmig. Dieser abweichende Verlauf ist auf das Abschalten aller technischen Anlagen zurückzuführen. Es lässt sich festhalten, dass der „Nicht gemessene Verbrauch“ hauptsächlich auf feste Laufzeiten der Anlagentechnik reagiert, jedoch auch auf erhöhte Anforderungen während der Vorstellungszeiten anspricht.

Die Lasten des Stromkreises „S03.1 Dimmerschrank“ zeigen eine besonders starke Abhängigkeit

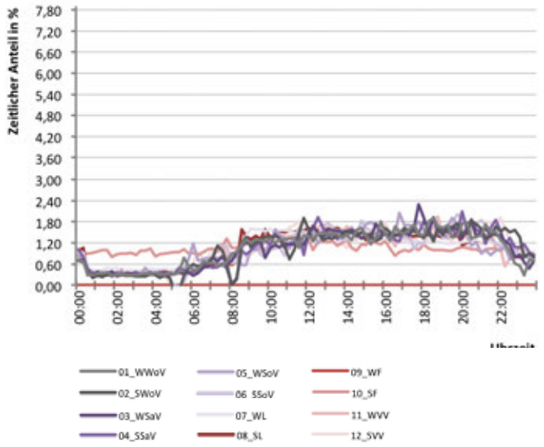

Abb. 315 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für den „Nicht gemessenen Verbrauch“

zu den Vorstellungen, da es sich hierbei um Steuerungseinrichtungen zur szenischen Beleuchtung handelt. An Tagen ohne Vorstellungen ist ein nahezu konstanter Verlauf über den gesamten Tag zu beobachten. Lediglich für den Typtag 07_WL erfolgt am Vormittag über einen Zeitraum von etwa 3h ein starker Lastanstieg, welcher möglicherweise auf Beleuchtungstests zurückzuführen ist. Für Tage mit Vorstellungen verhält sich die Last zwischen 22.00 Uhr abends und 8.00 Uhr morgens sehr konstant auf einem niedrigen Niveau. Im Laufe des Tages werden zwei Zeiträume sichtbar, während derer es zu großen Ausschlägen der Last kommt. Der erste Zeitraum ist einer Vorstellung vorgelagert und erstreckt sich über die Dauer von etwa 2h. In dieser Zeit wird die Beleuchtungseinrichtung für die Vorstellung vorgenommen. Der zweite Zeitraum bildet sich um die Vorstellung herum und umfasst eine Dauer von 3h bis

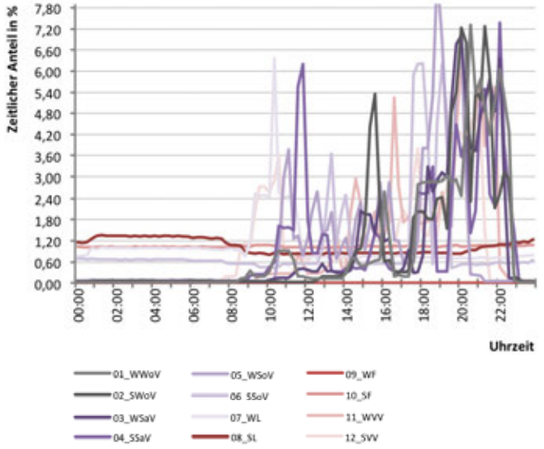

Abb. 316 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.1 Dimmerschrank

6h. Zunächst erfolgt ein kleinerer Lastausschlag, der sich für ein bis zwei Stunden auf einem konstanten Niveau bewegt. Im Anschluss daran ist mit Beginn der Vorstellungen eine starke Lasterhöhung sichtbar, die auch das Tagesmaximum einschließt. Im Vergleich zu Vorstellungen im großen Haus sind die Lastausschläge bei Vorstellungen auf der Hinterbühne weniger ausgeprägt.

Der Lastverlauf des Stromkreises „S03.7 Zuschauerraum 01“ weist für die meisten Typtage mit Vorstellungen mehrere Lastphasen auf. Lediglich 11_WVV und 12_SVV zeigen bis etwa 9.30 Uhr einen verhältnismäßig konstanten Verlauf, nachdem morgens um 7.00 Uhr, bzw. 4.15 Uhr ein starker Lastanstieg erfolgt. Anschließend sinkt die Last rapide ab und verbleibt auf einem konstanten Niveau, bis sich um 22.00 Uhr ein starker Lastabfall zeigt. Die restlichen Typtage, an denen Vorstellungen stattfinden, verfügen dagegen über verschiedene Lastphasen. Besonders auffällig ist die erste Lastphase des Tages, die in Abhängigkeit des Typtags zwischen 4.15 Uhr und 6.45 Uhr mit einem sprunghaften Lastanstieg beginnt und anschließend bis mindestens 7.15 Uhr und maximal bis 10.00 Uhr andauert. Darüber hinaus treten samstags sowie wochentags abends zwischen 18.15 Uhr und 23.30 Uhr sowie sonntags zwischen 17.45 Uhr und 21.45 Uhr drei Lastspitzen auf, welche auf einen Zeitraum im unmittelbaren Vorfeld der Vorstellung, gegen Ende dieser und im Anschluss daran entfallen. Unterschiede im Lastverlauf sind für die Typtage zwischen Ende der ersten Lastphase und Auftreten der ersten Lastspitze zu beobachten. Samstags befinden sich in diesem Zeitraum tendenziell zwei weitere Lastphasen, die jedoch bei 03_WSaV gegenüber 04_SSaV weniger stark ausgeprägt sind. Sonntags treten für 05_WSoV genauso wie samstags drei Lastphasen auf. Der Zeitraum der ersten und dritten Phase stimmt mit dem der Samstage überein, während die zweite Phase früher erfolgt. Bei 06_SSoV ist vor allem die zweite Lastphase zu erkennen, während des restlichen Tages verhält sich die Last eher

konstant. Wochentags ist zwischen 8.30 Uhr und 13.30 Uhr nach der ersten Lastphase ein zweiter ausgedehnter Lastbereich zu erkennen. Im Anschluss daran ist bis 15.30 Uhr ein Lastabfall bis auf das morgendliche Ausgangsniveau zu beobachten. Bis zum Auftreten der Lastspitzen verhält sich der Lastverlauf dann konstant. Bei 01_WWoV ist innerhalb der zweiten Lastphase ein weiterer Lastbereich zu erkennen, der sich mit der zweiten Lastphase des samstäglichen Verlaufs deckt. Für Tage ohne Vorstellungen entfällt der phasenweise Lastverlauf über den Tag hinweg. 08_SL zeigt einen fast vollständig konstanten Verlauf. Lediglich im Zeitraum von 8.30 Uhr bis 20.15 Uhr ist die Last gegenüber dem restlichen Zeitraum minimal erhöht. 07_WL und 10_SF weisen einen ähnlichen Tagesverlauf wie die Stromkreise „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“auf. Es lässt sich somit festhalten, dass auch „S03.7 Zuschauerraum 01“ in großer Abhängigkeit zu den Vorstellungen steht.
Ebenso zeigt auch „S03.6 Foyer“ eine starke Abhängigkeit zu den Vorstellungen. An Tagen ohne Vorstellungen ist ein recht konstanter Lastverlauf zu beobachten, der sich in zwei Stufen gliedert. Zwischen 0.15 Uhr und 8.00 Uhr in der Nacht fällt eine gleichmäßig geringe Last an. Um 8.00 Uhr steigt die Last sprunghaft an und fällt während des Tageszeitraums konstant höher aus. Im Gegensatz Leerstandstagen zeigt sich an Vorstellungstagen ein vierstufiger Verlauf. Nach dem konstanten nächtlichen Verlauf erfolgt der erste sprunghafte Lastanstieg bereits gegen 6.00 Uhr. Spätestens um ca. 9.45 Uhr ist ein nahezu ähnlich starker Lastabfall zu beobachten. Im Anschluss daran verhält sich die Last bis ca. 18.00 Uhr, an Sonntagen aufgrund des früheren Vorstellungsbeginns bis 16.00 Uhr, gleichmäßig. Danach erfolgt ein starker Lastanstieg, welcher in den Tageshöchstwerten mündet, die bis etwa 23.00 Uhr konstant andauern. Dieser zweite starke Anstieg gruppiert sich um die Vorstellungszeit und beginnt mit Öffnung des Foyers etwa 1h vor Vorstellungsbeginn und hört mit dessen Schließung ca. 1h nach Vorstellungsende auf. Die erhöhten Lasten während dieses Zeitraums sind mit der Beleuchtung sowie der Klimatisierung des Foyers in Verbindung zu bringen.
Im Vergleich zu den bisher betrachteten Stromkreisen führen die Lasten von „S03.2 Szenische Beleuchtung“, „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“, „S03.11/ S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ und „S03.8 Zuschauerraum 02“ im Gesamtlastverlauf nicht zu großen Lastschwankungen, wirken sich aufgrund ihrer konstanten Last aber dennoch auf die Höhe der Gesamtlast aus.
Für „S03.8 Zuschauerraum 02“ sind für keinen Typtag große Lastspitzen zu beobachten, dennoch ist der Einfluss der Vorstellungen sichtbar. An Tagen ohne Vorstellungen verläuft die Last über den gesamten Tag konstant. Charakteristisch hierbei ist die Schwingung der Last mit einer Amplitude von maximal 0,005% zwischen

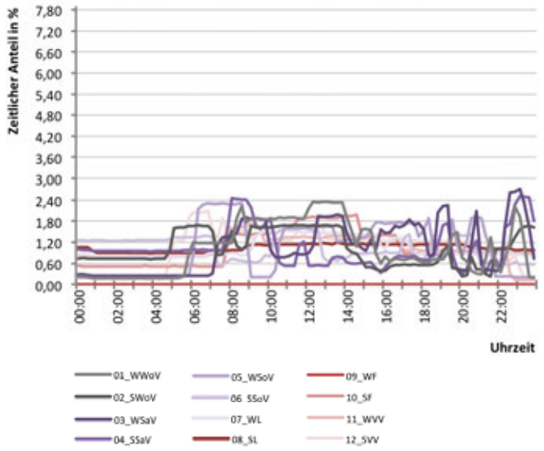

Abb. 317 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.7 Zuschauerraum 01

zwei Messintervallen. Im Gegensatz zu Leerstandstagen erfolgt an Vorstellungstagen ein kontinuierlicher Anstieg der Last ab etwa 8.00 Uhr morgens bis zum Maximum, welches zum Ende der Vorstellung auftritt. Entsprechend der unterschiedlichen Vorstellungszeiten wird das Tagesmaximum an Sonntagen früher als an Sams- oder Wochentagen erreicht. Nach Auftreten des Tagesmaximums sinkt die Last bis 0.00 Uhr auf das morgendliche Ausgangsniveau zurück. An Typtagen, die Vorstellungen auf der Hinterbühne beinhalten, ist der Lastanstieg insgesamt flacher.
Der Tageslastverlauf von „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“ ist durch ein Stufenprofil geprägt. Eine Ausnahme bilden die Typtage 08_SL und 07_WL, die einen gleichmäßigen Verlauf ohne Ausschläge aufweisen, da die Ober- und Untermaschinerie an Leerstandstagen nicht genutzt wird. An den verbleibenden Typtagen erfolgt gegen 8.00 Uhr

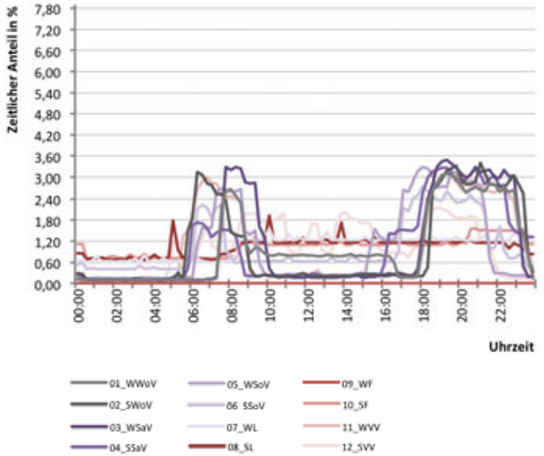

Abb. 318 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.6 Foyer

morgens mit Beginn der Arbeitszeiten im Gebäude ein sprunghafter Anstieg der Last, an den sich ein Zeitraum mit konstantem Lastverlauf anschließt. Für 01_WWoV, 02_SWoV, 04_SSaV und 12_SVV steigt die Last ein zweites Mal bereits gegen 9.00 Uhr rapide an, während dies für 03_WSaV und 11_WVV erst um 12.00 Uhr zu beobachten ist. In beiden Fällen folgt anschließend erneut ein Zeitraum mit gleichmäßigem Lastverlauf, welcher mindestens bis 22.00 Uhr und dem Ende der Nutzungszeit des Gebäudes andauert, bis danach ein rapider Abfall auf das morgendliche Ausgangsniveau erfolgt. Beide Typtage, die Sonntage umfassen, zeigen erst gegen 10.00 Uhr und damit 2h später als an den übrigen Tagen ihren ersten sprunghaften Lastanstieg. Für 05_WSoV lässt sich genauso wie bei den übrigen Typtagen ein zweistufiger Verlauf feststellen, da nach dem ersten Lastanstieg zunächst ein konstanter Verlauf festzustellen ist. Um 15.00 Uhr erfolgt dann der zweite sprunghafte Anstieg mit anschließend gleichmäßiger Last. Im Fall von 05_WSoV verläuft die Last nach dem ersten rapiden Anstieg jedoch über den gesamten restlichen Tageszeitraum konstant. Für beide sonntäglichen Typtage ist ein rapider Lastabfall bereits um 20.30 Uhr sichtbar, da auch die Vorstellungen und damit die Nutzungszeit des Gebäudes früher enden als an den übrigen Tagen. Der einzige verbleibende Typtag 10_SF, der die Spielpause in der Sommerzeit umfasst, zeigt einen umgekehrten zweistufigen Tagesverlauf. Wie bei den anderen Tagen, mit Ausnahme der Sonntage, ist auch hier um 8.00 Uhr ein starker Lastanstieg mit anschließend konstanten Verlauf zu beobachten. Um kurz vor 12.00 Uhr sinkt die Last jedoch bereits um die Hälfte ab und verläuft auf diesem Niveau bis etwa 16.30 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt fällt die Last rapide auf das die Grundlast zurück. Vergleichbar sind die Zeiträume des Lastverlaufs mit „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ sowie dem „Nicht gemessenen Verbrauch“.
Ebenso wie viele der anderen Stromkreise zeigt auch „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ einen Zusammenhang mit den Vorstellungen. Wie unter

anderem bei „S03.8 Zuschauerraum 02“ ist der Lastverlauf an Leerstandstagen über den gesamten Tag konstant. Eine Ausnahme bildet 07_WL, da gegen 8.30 Uhr mit Beginn der Arbeitszeiten in den Bürobereichen ein Anstieg der Last zu verzeichnen ist. Ausgelöst wird dieser vermutlich durch die künstliche Beleuchtung der genutzten Bereiche sowie der eingeschalteten Arbeitshilfsmittel. Anschließend ist ein parabelförmiger Lastverlauf vorhanden, der um 13.30 Uhr zur Mittagszeit sein Maximum erreicht und daraufhin bis 18.00 Uhr zum Ende der Arbeitszeiten das morgendliche Ausgangsniveau erreicht. An Tagen mit Vorstellungen auf der Hinterbühne findet bereits um 6.00 Uhr ein sprunghafter Lastanstieg statt. Nachfolgend ist ein leichter parabelförmiger Verlauf sichtbar, der vergleichbar mit dem des Typtags 07_WL und auf die Büroarbeitszeiten zurückzuführen ist. Jedoch sinkt die Last nicht um 18.00 Uhr auf das morgendliche Ausgangsniveau, sondern es erfolgt gegen 16.00 Uhr ein neuerlicher leichter Anstieg. „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ umfasst neben den Büros auch die Künstlergarderoben, sodass der neuerliche Anstieg mit der Garderobennutzung zur Vorbereitungen auf die Vorstellungen durch die Künstler zu erklären ist. Erst um 22.30 Uhr, nach Ende der Vorstellungen, sinkt die Last dann auf das morgendliche Ausgangsniveau zurück. Ein vergleichbarer Verlauf ist für Typtage sichtbar, an denen Vorstellungen unter der Woche stattfinden. Hier ist der Anstieg der Lasten im Rahmen der Vorbereitung auf die Vorstellungen jedoch stärker ausgeprägt und überschreitet die Maximallasten während der Büroarbeitszeit deutlich. Möglicherweise lässt sich dies über die Anzahl der mitwirkenden Künstler begründen. Es ist anzunehmen, dass Vorstellungen auf der Hinterbühne nicht so aufwändig inszeniert werden, wie im Großen Haus, sodass der Garderobenbereich

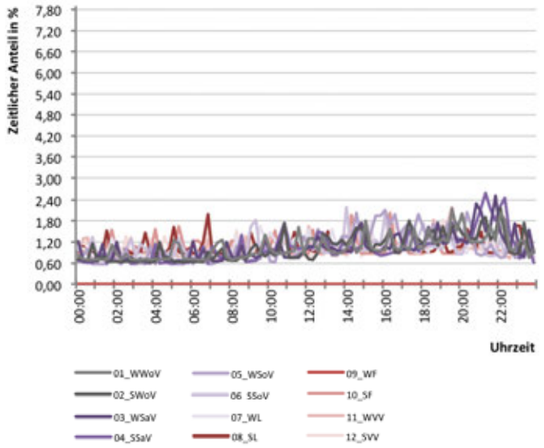

Abb. 319 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.8 Zuschauerraum 02

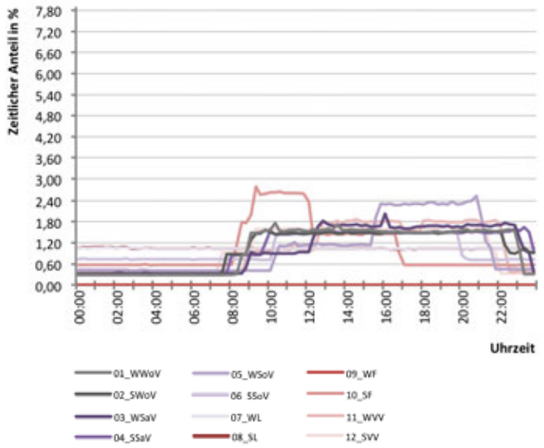

Abb. 320 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.11/ S03.25 Maschinerie

durch eine geringere Anzahl an Personen frequentiert wird und einige der Garderoben ungenutzt bleiben. Am Wochenende findet überwiegend keine Nutzung der Bürobereiche statt. Dies schlägt sich auch im Tageslastverlauf wieder, da ab 6.00 Uhr morgens nur ein leichter Anstieg der Last erfolgt. Erst mit Nutzung der Garderobenbereiche ist ein starker Lastanstieg zu verzeichnen. An Samstagen, die einen ähnlichen Vorstellungsbeginn aufweisen wie die Wochentage, beginnt der starke Lastanstieg ebenfalls gegen 16.00 Uhr. Auch hier fällt die Last erst gegen 22.30 Uhr wieder auf ihr ursprüngliches Niveau zurück. Lediglich an Sonntagen findet der Lastanstieg aufgrund des vorgezogenen Vorstellungsbeginns bereits früher statt.
Der Stromkreis „S03.2 Szenische Beleuchtung“ zeigt für Tage mit Vorstellungen für die entsprechenden Typtage einen vergleichbaren Lastverlauf während des Tages. Morgens zwischen 5.15 Uhr und 6.45 Uhr beginnt das Auftreten von Lasten während sich diese zwischen 22.45 Uhr und 23.30 Uhr wieder auf ihr morgendliches Ausgangsniveau reduzieren. In der Zwischenzeit treten gewöhnlich vier Phasen mit höherer Last auf, die sowohl im Tagesverlauf selbst als auch zwischen den Typtagen in ihrer Dauer und Ausprägung variieren. Charakteristisch für die Lastphasen ist der steile Lastanstieg, in dessen Anschluss die Last bis Phasenende auf einem hohen Niveau verbleibt, um anschließend rapide abzufallen. Die vier Phasen höherer Last bewegen sich im Bereich von ca. 6.00 Uhr bis 10.00 Uhr, 12.00 Uhr bis 14.00 Uhr, 16.00 Uhr bis 20.00 Uhr und 21.00 Uhr bis 23.00 Uhr. Die letzten beiden Phasen umfassen zum einen die Vorbereitung auf die Vorstellung und zum anderen das Ende dieser. Auch hier ist zu beobachten, dass an Sonntagen eine Verschiebung der Lastphasen nach vorne stattfindet, da ein Bezug zur Durchführung der Vorstellungen besteht. An Tagen ohne Vorstellung zeigt

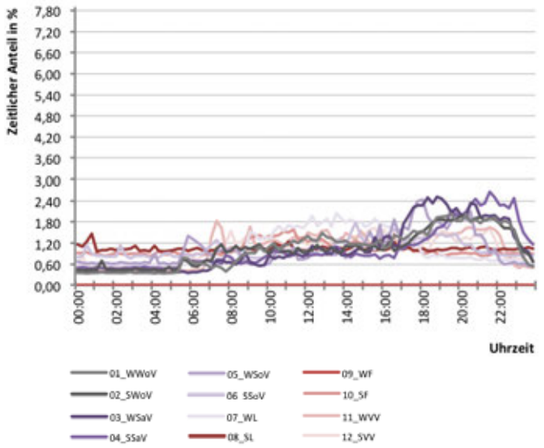

Abb. 321 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG

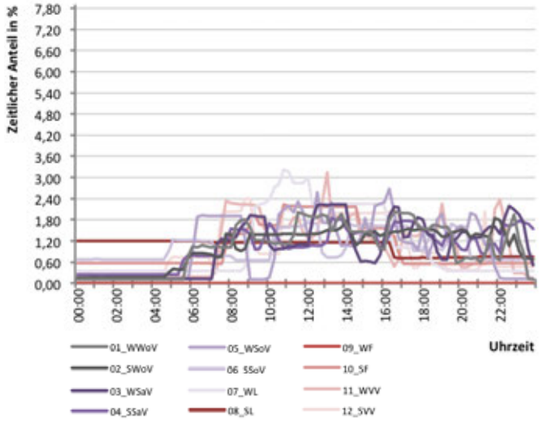

Abb. 322 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.2 Szenische Beleuchtung

sich ein anderer Tageslastverlauf. Für die Typtage 09_WF und 07_WL tritt im Zeitraum von 7.15 Uhr und 17.00 Uhr, bzw. 8.30 Uhr bis 18.30 Uhr eine stark höhte Last auf. Tendenziell sind die Lasten im Vormittags- und Mittagsbereich am höchsten. Dieser Verlauf sowie der Zeitraum sind vergleichbar mit den auftretenden Lasten in „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“. Auch der Lastverlauf von 08_SL korrespondiert mit dem genannten Stromkreis, da in beiden Fällen ein recht gleichmäßiger Lastverlauf auftritt. Es wird daher vermutet, dass an den Stromkreis „S03.2 Szenische Beleuchtung“ sowohl die szenische Beleuchtung selbst als auch die Arbeitsbeleuchtung der Bühne angeschlossen ist, sodass eine Inanspruchnahme des Stromkreises erfolgt, wenn Einrichtungen, Wartungen und Vorstellungen im Bühnenbereich stattfinden. Da dies nur während der Arbeitszeiten der technischen Mitarbeiter zutrifft, die gleichzeitig auch den Verwaltungsbereich mit Büro- und Aufenthaltsräumen nutzen, besteht zwischen der Belastung der beiden Stromkreise ein Zusammenhang. Besonders geringe Lasten treten bei „S03.3 Probebühne“, „S03.18 Bühne ext. 01“, „S03.19 Bühne ext. 02“, aber auch bei „S03.15 Kältemaschine“ sowie „S01 Buffet“ und „S02 Kantine“ auf und fallen somit bei der Gesamtlast kaum ins Gewicht.

Charakteristisch für den Lastverlauf von „S02 Kantine“ sind die regelmäßigen Lastausschläge in vergleichbarer Höhe, welche alle 2 bis 3h auftreten und möglicherweise durch angeschlossene Kühlgeräte verursacht werden. Auch der Lastverlauf von „S02 Kantine“ wird durch die Vorstellungszeiten beeinflusst, da die Nutzung der Kantine hauptsächlich an Vorstellungstagen zur Vorbereitung von Speisen für künstlerisches und technisches Personal, aber vor allem auch für die gastronomische Verpflegung der Zuschauer erfolgt. An Leerstandstagen ist der Lastverlauf daher

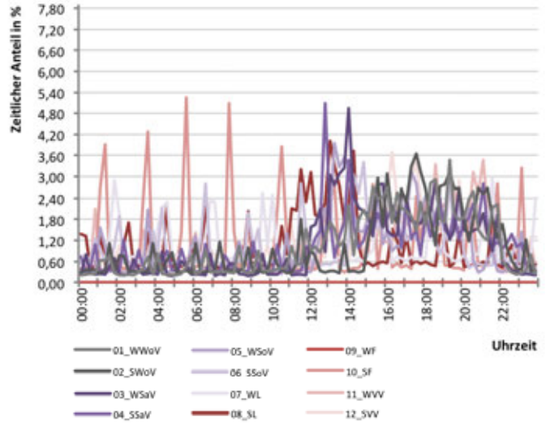

Abb. 323 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S02 Kantine

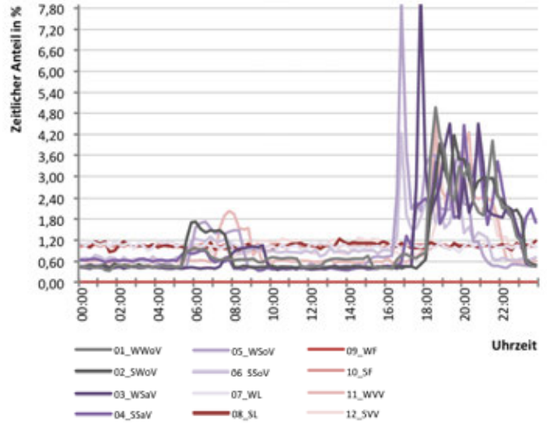

Abb. 324 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S01 Buffet

weitestgehend konstant. Eine Ausnahme bildet 08_SL, da im Mittagszeitraum von 10.45 Uhr bis 14.30 Uhr ein höheres Lastniveau auftritt. An Tagen mit Vorstellungen ist der Verlauf der Last bis 12.00 Uhr recht konstant, anschließend erfolgt ein Lastanstieg, der gegen 17.30 Uhr, kurz vor Öffnung des Foyerbereichs für die Zuschauer, seinen höchsten Punkt erreicht. Danach sinkt die Last bis etwa 22.00 Uhr mit Schließen des Foyers auf das Ausgangsniveau zurück. Auch im Fall von „S02 Kantine“ beginnt die Vorbereitungszeit an Sonntagen aufgrund des früheren Vorstellungsbeginns eher als an Wochentagen.

An „S01 Buffet“ sind Verbraucher angeschlossen, die eine gastronomische Versorgung im Foyer des Scharoun Theaters Wolfsburg ermöglichen. Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen der gastronomischen Versorgung der Zuschauer und den Vorstellungszeiten, bestehen hier starke Parallelen. Somit ist es zu erklären, dass an Leerstandstagen ausnahmslos ein konstanter Lastverlauf ohne Ausschläge vorhanden ist. Dagegen ist der Lastverlauf an Vorstellungstagen vergleichbar mit „S03.6 Foyer“. Zwischen 5.15 Uhr und 6.45 Uhr erfolgt morgens ein erster sprunghafter Lastanstieg, der etwa 3h anhält und dann wieder auf das Ursprungsniveau fällt. Erst gegen 18.00 Uhr mit Öffnung des Foyers für die Zuschauer wird ein weiterer, erheblicher Lastanstieg sichtbar. Dieser ist auf die Nutzung der Kaffeemaschine sowie ggf. Kühlgeräte und Warmhalteplatten im Barbereich zurückzuführen. Bereits während der Vorstellungszeit ist ein Rückgang der Last zu beobachten. Gegen 22.00 Uhr findet dann ein starker Abfall der Lasten statt, sodass nach kurzer Zeit das morgendliche Ausgangsniveau erreicht wird.

Für „S03.15 Kältemaschine“ fallen nur Lastspitzen in den Sommermonaten an, da in den Wintermonaten keine Kühlung des Zuschauersaals benötigt wird und somit ein

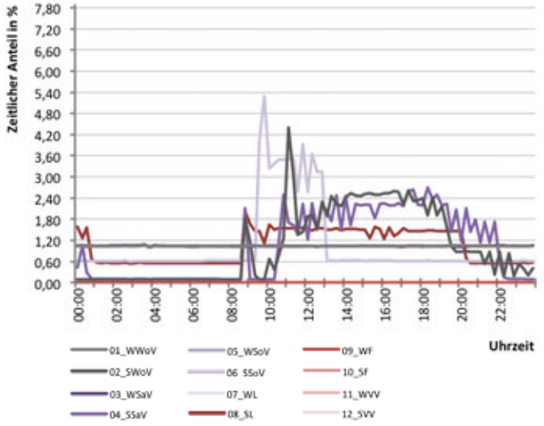

Abb. 325 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.15 Kältemaschine

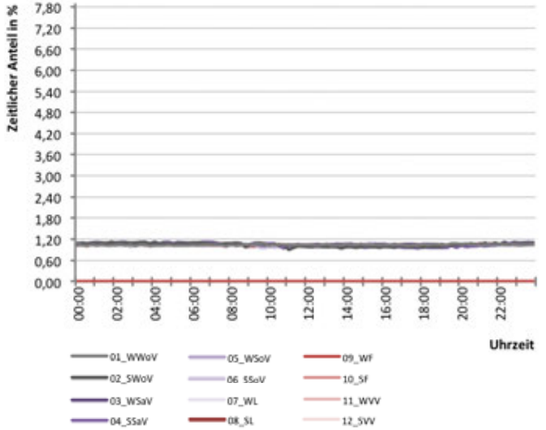

Abb. 326 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.18 Bühne ext. 01

konstanter Lastverlauf vorliegt. Auch in der Spielpause ist der Lastverlauf konstant, da keine Vorstellungen im Zuschauersaal stattfinden und daher weitestgehend eine Abschaltung der Gebäudetechnik erfolgt. Obwohl an Typtag 08_SL keine Vorstellung durchgeführt wird, steigt die Last um 8.15 Uhr sprunghaft an und verharrt anschließend auf dem gleichen Niveau, bis sie um 10.15 Uhr wieder den Ausgangszustand erreicht. Für den Typtag 06_SSoV erfolgt um 9.15 Uhr ein ebenfalls sprunghafter Lastanstieg, welcher bis 13.00 Uhr andauert. An allen anderen Tagen wird zwischen 9.45 Uhr und 22.00 Uhr ein parabelförmiger Verlauf sichtbar, der seinen Höhepunkt um 18.00 Uhr im Vorfeld der Vorstellungen erreicht. Während der Vorstellungen erfolgt bereits ein Rückgang der Last. Es ist zu vermuten, dass eine Vorkühlung des Zuschauersaals erfolgt, um den Zuschauern bei Beginn der Vorstellung ein angenehmes Temperaturniveau zu bieten.

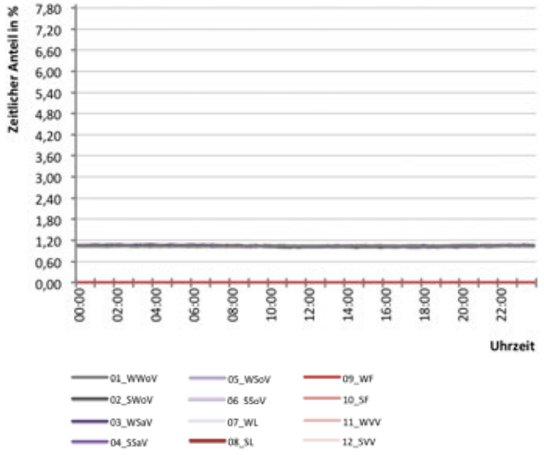

Abb. 327 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.19 Bühne ext. 02

An die Stromkreise „S03.19 Bühne ext. 02“ und „S03.18 Bühne ext. 01“ kann durch Gastensembles weiteres Equipment angeschlossen werden. Dies erfolgt jedoch nur in Ausnahmefällen, sodass sich unabhängig der Typtage für beide Stromkreise ein absolut konstanter Verlauf mit sehr geringen Lasten zeigt.

Die Nutzung der Probebühne, welche in „S03.3 Probebühne“ Lasten verursacht, ist weniger an das Stattfinden von Vorstellungen als vielmehr an Wochentage geknüpft, da auch an Leerstandstagen eine Nutzung durch Theatergruppen erfolgen kann. Mit Ausnahme von 01_WWoV, 04_SSaV, 05_WSoV und 07_WL ist der Lastverlauf an den übrigen Typtagen durch gleichmäßig auftretende, aber verhältnismäßig kleine Lastausschläge, besonders während der Nachtzeit, geprägt. Tendenziell lässt sich jedoch festhalten, dass die Lastausschläge eher für die Typtage im Sommer auftreten. Nahezu alle Typtage haben gemeinsam, dass ab 10.00 Uhr zumindest ein leichter Lastanstieg erfolgt. Im Anschluss daran sind sehr unterschiedliche Lastverläufe zu beobachten. Zusammenfassen lassen sich 01_WWoV, 02_SWoV und 03_SSaV, da sie einen vergleichbaren Verlauf aufweisen. Nach dem morgendlichen Lastanstieg treten besonders hohe Lasten zwischen 15.30 Uhr und 18.00 Uhr auf, was in etwa dem Nutzungszeitraum durch Theatergruppen entspricht. Für 03_WSaV ist der Bereich besonders hoher Lasten etwas nach hinten verschoben und umfasst den Zeitraum zwischen 17.00 Uhr und 19.00 Uhr. Auch der Lastverlauf von 07_WL lässt auf die Nutzung der Probebühne durch Theatergruppen schließen, da bis 16.00 Uhr lediglich eine leicht erhöhte Last auftritt und anschließend zwischen bis 19.00 Uhr eine weitaus höhere Last besteht. Ebenso miteinander vergleichbar sind 04_SSaV und 05_WSoV. Nach dem Lastanstieg um 8.00 Uhr ist der weitere Verlauf konstant, bis um 22.00 Uhr, bzw. 20.30 Uhr ein Rückgang auf die Grundlast stattfindet. Einen ähnlichen Verlauf, jedoch mit abweichenden Zeiträumen zeigt Typtag 11_WVV. Hier treten zwischen 10.00 Uhr und 16.30 Uhr erhöhte Lasten auf. Gleichmäßigere Lastverläufe ohne hohe Lastspitzen sind bei den verbleibenden Typtagen zu beobachten. Sowohl 08_SL als auch 12_SVV zeigen über den gesamten Zeitraum einen leicht parabelförmigen Verlauf. Während 08_SL zur Mittagszeit stärkere Lastamplituden aufweist, besitzt 12_SVV besonders zu diesem Zeitpunkt keine Ausschläge. Bei 10_SF ist ein kontinuierlicher Lastanstieg zu beobachten, der gegen 18.30 Uhr sein Maximum erreicht. Im Anschluss daran erfolgt eine kontinuierliche Reduzierung der Last. 06_SSoV zeigt über den Tag einen zweigeteilten Lastverlauf. Nach dem ersten Lastanstieg verhält sich die Last bis ca. 14.00 Uhr recht konstant. Anschließend findet ein weiterer Lastanstieg statt, dem ebenfalls bis 19.00 Uhr eine gleichmäßige Last nachfolgt. Bis 20.00 Uhr sinkt die Last auf ihr Grundniveau zurück. Die unterschiedlichen Lastverläufe der Typtage lassen kein Nutzungsmuster erkennen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Stromkreise mit ihren angeschlossenen Verbrauchern in unterschiedlich starker Abhängigkeit zur Durchführung von Vorstellungen stehen. Der Lastverlauf für „S03.18 Bühne ext. 01“ und „S03.19 Bühne ext. 02“ ist identisch und zeigt keinen Zusammenhang mit den Vorstellungen. Diese Feststellung ist jedoch nur indirekt richtig, da an beide Stromkreise zusätzliches Equipment angeschlossen werden kann, welches für die Durchführung von Licht- oder Technikaufwändigen Gastspielen benötigt wird. Kaum eine Beziehung besteht zu „S03.3 Probebühne“, da hier hauptsächlich bei Nutzung der Probebühne durch Theatergruppen Lasten auftreten. Eine indirekte Abhängigkeit besteht für „S03.15 Kältemaschine“ und „S03.11/S03.25 Ober- und Untermaschinerie“. Für beide Stromkreise treten vor allem Lasten an Vorstellungstagen auf, jedoch besteht für „S03.15 Kältemaschine“ aufgrund der Klimatisierung des Zuschauersaals auch eine enge Beziehung zur Jahreszeit. Zwischen „S03.8 Zuschauerraum 02“, „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ und „Nicht gemessenen Verbrauch“ ist jeweils tendenziell eine Abhängigkeit zu den Vorstellungen zu erkennen, da sich die Lasten während den Vorstellungen erhöhen. Bei „S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG“ besteht zusätzlich eine Beziehung zu den Arbeitszeiten der Mitarbeiter in der Verwaltung und beim „Nicht gemessenen Verbrauch“ zu den Laufzeiten der Anlagentechnik. Ein ähnliches Lastprofil, welches in Teilen auch mit den Vorstellungszeiten korrespondiert, zeigen „S03.7 Zuschauerraum 01“ und „S03.2 Szenische Beleuchtung“. Einen sehr ähnlichen Lastverlauf weisen „S03.6 Foyer“ und „S01 Buffet“ auf. Beide Stromkreise zeigen einen unmittelbaren Zusammenhang mit den Vorstellungen, da beide Stromkreise Bereiche, die dem Aufenthalt der Zuschauer dienen, umfassen. Gleiches gilt für „S02 Kantine“, da im angeschlossenen Küchenbereich im Vorfeld der Vorstellungen die Vorbereitung für die gastronomische Versorgung der Zuschauer erfolgt. Auch „S03.1 Dimmerschrank“ steht in direkter Beziehung zu den Vorstellungen, da hier die szenische Beleuchtungssteuerung angeschlossen ist.

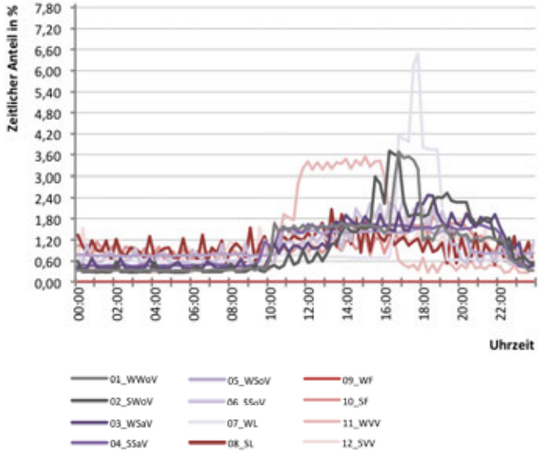

Abb. 328 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.3 Probebühne

11.2.3 Energetische Analyse

11.2.3.1 Lüftungsanlage im Zuschauerraum

Im Zuge der TEK-Tool-Berechnungen [siehe 11.3.1] wurde die Luftförderung mit einem Anteil von 44,8% als größter Stromverbraucher ermittelt. Eine weitere Betrachtung des Strombedarfs der Zonen für die Luftförderung hat gezeigt, dass der größte spezifische Bedarf im Zuschauersaal entsteht. Da es sich auch um einen großen Bereich des Theaters handelt, fällt nahezu die Hälfte des Strombedarfs für die Luftförderung im Zuschauersaal an, was auf die große Anschlussleistung der beiden gekoppelten Lüftungsanlagen zurückzuführen ist [siehe 9.3.4.3]. Ab April 2018 bis September 2018 wurden Daten zu Volumenströmen und Temperaturen erfasst, die im Folgenden im Mittel für beide Lüftungsanlagen beschrieben und ausgewertet werden.

Anhand der Temperaturen im Nacherhitzer der Zuluft lassen sich die Betriebszeiten der Lüftungsanlage feststellen, da beim Einschalten der Lüftungsanlage eine starke Temperaturänderung festzustellen ist. Darüber hinaus verbleiben die Nacherhitzertemperaturen unter den Temperaturen außerhalb der Betriebszeiten, die sehr konstant verlaufen. Im gesamten Betrachtungszeitraum sind mit einer Laufzeit von 16h pro Tag im Zeitraum von 8.15 Uhr bis 0.15 Uhr überwiegend gleichmäßige Betriebszeiten festzustellen. Neben der Sommerpause, in der eine Abschaltung der Lüftungsanlage über einen längeren Zeitraum erfolgt, fand im Zeitraum von Mitte bis Ende Juni 2018 für etwa 11 Tage überhaupt kein mechanischer Luftaustausch statt. In der Sommerpause im Juli 2018 und August 2018 war die Lüftungsanlage die meiste Zeit über ausgeschaltet. Nur über kurze Zeiträume im August 2018 wurde über kurze Zeiträume temporär ein mechanischer Luftaustausch vorgenommen. Im Anschluss an die Sommerpause tritt erneut die regelmäßige Steuerung der Lüftungsanlage ein. Der Messzeitraum umfasst insgesamt 151 Betriebsstunden der Lüftungsanlage, von denen der größte Anteil auf September 2018 entfällt. Im Verhältnis zum gesamten Messzeitraum zeigte die Lüftungsanlage zu 20,6% der Zeit eine Aktivität.

Durch den Einbau einer Strömungsmessung im Abluftschacht der Lüftungsanlage konnte der Volumenstrom ermittelt werden. Der Volumenstrom je Messintervall betrug zwischen 0,0m³/l und 2870 m³/l. Der Durchschnitt wurde mit 1200 m³/s berechnet. Ein Vergleich zwischen dem mittleren Volumenstrom während des gesamten Betriebszeitraums und einer Beschränkung auf den Vorstellungszeitraum zeigt, dass dieser während den Vorstellungen mit 1647 m³/l höher ausfällt. Dies lässt sich darüber begründen, dass der Außenluftvolumenstrom in Abhängigkeit der CO_2-Raumluftkonzentration gesteuert wird. Da die Zuschauer während den Vorstellungen durch die Atemluft CO_2 emittieren, wird der Außenluftvolumenstrom dementsprechend nach oben geregelt.

Die Überprüfung des Zusammenhangs zwischen CO_2-Konzentration in der Raumluft und dem Frischluftvolumenstrom spiegelt dies jedoch nur bedingt wieder. Die vorliegende Korrelation von 0,12 bestätigt

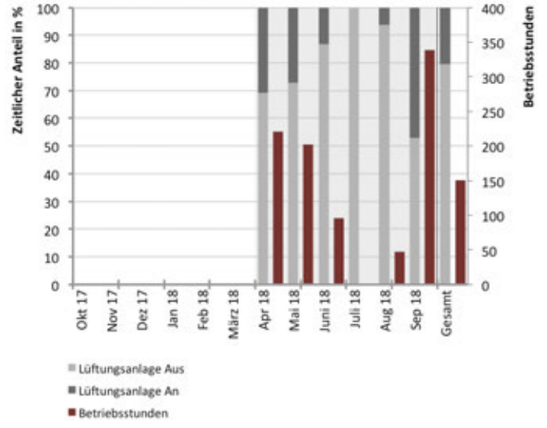

Abb. 329 Monatliche Betriebsstunden und Einschaltdauer der Lüftungsanlage

lediglich einen sehr schwachen linearen Zusammenhang. In der Systemsteuerung der Lüftungsanlage ist für die CO_2-Konzentration ein Sollwert von 350 ppm hinterlegt. Dies entspricht in den meisten Fällen einer Unterschreitung der Außenluftkonzentration, die in Stadtzentren üblicherweise bei durchschnittlich 400 ppm liegt [siehe 5.5.1.1]. Aufgrund des niedrigen Sollwerts besteht auch während der Vorstellungszeiten eine hohe Luftqualität im Zuschauersaal des Scharoun Theaters Wolfsburg [siehe 11.4.1.1]. Im Gegensatz zu den positiven Auswirkungen des niedrigen Sollwerts auf die Raumluftqualität, führt die Einstellung zu einem beständigen Außenluftvolumenstrom zu Betriebszeiten der Lüftungsanlage und bedingt so einen erhöhten Stromverbrauch. Darüber hinaus ist aufgrund des niedrigen Sollwerts ein geringer Umluftanteil zu erwarten, was wiederum Folgen für den Verbrauch für Heizung/Warmwasser hat, da erhöhte Lüftungswärmeverluste entstehen.

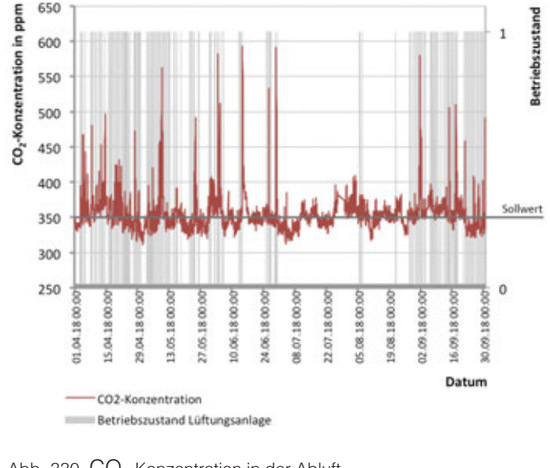

Abb. 330 CO_2-Konzentration in der Abluft

Die CO_2-Konzentration, anhand derer die Steuerung des Außenluftvolumens erfolgt, wird in der Abluft gemessen. Im gesamten Betriebszeitraum der Lüftungsanlage lag die CO_2-Konzentration zwischen 316 ppm und 593 ppm, wobei das Maximum während der Vorstellungszeiten auftrat. Der Mittelwert von 362 ppm ist gegenüber dem Sollwert von 350 ppm nur leicht erhöht.

Am häufigsten bewegt sich die CO_2-Konzentration im Rahmen von 300 ppm bis 400 ppm und der Sollwert wird im gesamten Betrachtungszeitraum lediglich zu 57,7% der Zeit überschritten. Während des Vorstellungszeitraums ist mit 91,1% der Zeit eine höhere Überschreitung sichtbar und die CO_2-Konzentration erhöht sich auf durchschnittlich 427 ppm. Auch hier zeigt sich ein Wert in der Abluft, der weiterhin nahezu der üblichen Außenluftkonzentration entspricht. Die erhöhte Lage des Scharoun Theaters Wolfsburg sowie der angrenzende Wald begünstigen möglicherweise eine geringe CO_2-Konzentration der Außenluft, sodass der Sollwert zumindest temporär sogar im Innenraum erreicht werden kann.

Nicht nur die CO_2-Konzentration in der Abluft wird zur Steuerung der Lüftungsanlage verwendet, sondern auch die Mischlufttemperatur, die sich als Mittelwert aus Umluft- und Außenlufttemperatur ergibt, gibt Impulse für die Steuerung der Heizungs- und Kühlungsfunktionen. Im Betriebszeitraum der Lüftungsanlage wurde ein Minimum von 9,24°C erfasst, welches im September 2018 auftrat. Das Maximum, welches bei 27,37°C lag, wurde im Juni 2018 gemessen. Unter Einbeziehung des gesamten Messzeitraums liegt der Mittelwert bei 20,60°C und sinkt während des Vorstellungszeitraums auf 17,97°C ab. Da die Außenlufttemperaturen größtenteils unter den Fortlufttemperaturen liegen, welche den Temperaturen des Umluftanteils entsprechen, lässt sich die Reduzierung des Mittelwerts im Vorstellungszeitraum über den erhöhten Außenluftvolumenstrom währenddessen erklären.

Während für die CO_2-Konzentration ein fester Sollwert definiert ist, besteht für die Raumlufttemperatur zwar ein Auslegungswert in Höhe von 22°C, dennoch erfolgt die Steuerung des Nacherhitzers sowie des Kühlers

in Abhängigkeit von minimal und maximal zulässigen Werten. Es wird davon ausgegangen, dass hier die Grenzwerte der Kategorie II [siehe 11.4.1.1] zu Grunde gelegt werden. Eine Temperatur über 26°C, was dem oberen Grenzwert für die Kühlperiode entspricht, erreichen die Mischlufttemperaturen im gesamten Betrachtungszeitraum nur zu 0,7% der Zeit. Während den Vorstellungen sind dagegen keine Übertemperaturen festzustellen. Die Zuführung der Außenluft scheint im Betrachtungszeitraum zur Abführung der Wärmelasten ausreichend zu sein. Eine Unterschreitung des unteren Grenzwerts von 20°C für die Heizperiode liegt bei den Mischlufttemperaturen während des gesamten Messzeitraums zu einem Anteil von 40,2% vor. Zu Vorstellungszeiten erhöht sich der Anteil auf 69,5%, sodass zeitweise vor der Einbringung der Zuluft in den Zuschauersaal eine Zuführung von Wärmeenergie notwendig ist.

Die Menge der Wärmeenergie, die mittels Nacherhitzer zugeführt werden muss, kann durch die installierte Wärmerückgewinnung reduziert werden. Über die Betriebszeiten der Wärmerückgewinnung liegen keine Daten vor. Jedoch kann anhand der Differenzen zwischen Ab- und Fortlufttemperatur festgestellt werden, zu welchem Zeitpunkt der Fortluft Wärme entzogen wurde. Bei der Bewertung der Temperaturdifferenzen ist zu beachten, dass nur dann eine Wärmerückgewinnung sinnvoll ist, wenn zum einen die Außen- und zum anderen die Mischlufttemperatur unter dem Minimum der Raumlufttemperatur liegt. Sind diese Bedingungen erfüllt, so betrug die größte Differenz zwischen Ab- und Fortlufttemperatur 5,7 K und wurde Ende September 2018 erfasst. Im Durchschnitt ist diese für den gesamten Betrachtungszeitraum jedoch viel geringer und beträgt 0,85 K, während sie im Vorstellungszeitraum nochmals leicht auf 0,78 K absinkt. Dies deutet bereits darauf hin, dass eine Wärmerückgewinnung im Betrachtungszeitraum nur bedingt notwendig war, da dieser außerhalb der Heizperiode liegt.

Diese Vermutung bestätigt sich bei der Betrachtung des zeitlichen Anteils zu dem eine Wärmerückgewinnung erfolgte. Im gesamten Betrachtungszeitraum liegt dieser bei 1,2%. Findet darüber hinaus eine Beschränkung der Betrachtung auf den Vorstellungszeitraum statt, so erhöht sich der zeitliche Anteil mit Wärmerückgewinnung auf 9,3%. Der größte Anteil wurde für den Vorstellungszeitraum im September 2018 mit 27,0% erfasst, wohingegen in den restlichen Monaten, mit Ausnahme von Mai 2018 mit 4,3% so gut wie keine Notwendigkeit zur Wärmerückgewinnung bestand.

Neben den bisherigen Aussagen zur Wärmerückgewinnung kann auch die fortluftbezogene Rückwärmzahl, die das Verhältnis von übertragener Temperatur zur Temperaturdifferenz von Ab- und Außenluft angibt, betrachtet werden. Diese betrug maximal 39,3% und liegt durchschnittlich bei 6,7%. Aufgrund der Wärmerückgewinnung konnte der Abluft im Betrachtungszeitraum durchschnittlich eine Wärmeleistung von 0,51 kW/l entzogen werden, die sich im Vorstellungszeitraum auf 0,43 kW/l verringert. So konnten insgesamt 75,5 kWh Wärmeenergie zurückgewonnen werden, von denen der größte Anteil von 43,7% auf den September 2018 entfällt.

Trotz der Wärmerückgewinnung entstehen im Betrachtungszeitraum durch die mechanische Belüftung des Zuschauersaals Wärmeverluste, die über das Verhältnis zwischen Fort- und Außenlufttemperatur in Bezug auf den Auslegungswert für die Raumlufttemperatur bestimmt werden können. Wärmeverluste treten immer dann auf, wenn zum einen die Fort- über der Außenlufttemperatur liegt und zum anderen die Fort- unter dem Minimum der Auslegungstemperatur des

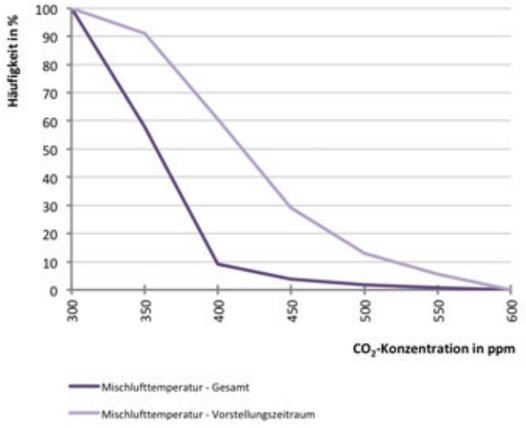

Abb. 331 Summenhäufigkeit der CO_2-Konzentration in der Abluft

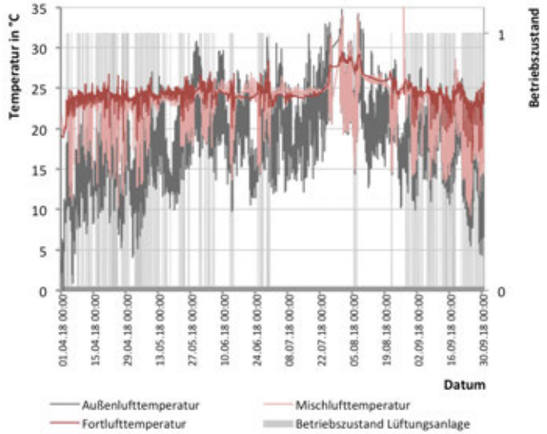

Abb. 332 Temperaturverlauf für Außen-, Fort- und Abluft in Zusammenhang mit dem Betriebszustand der Lüftungsanlage

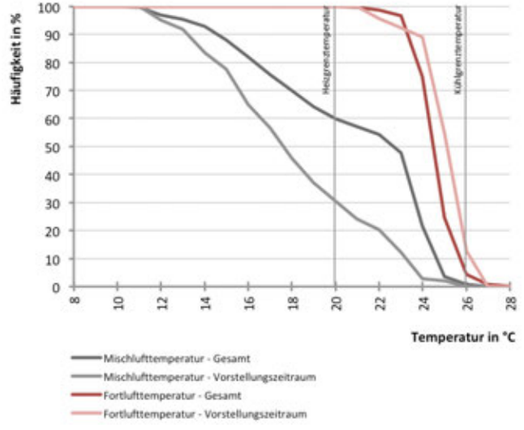

Abb. 333 Summenhäufigkeit für Misch- und Fortlufttemperatur in Abhängigkeit des Nutzungszeitraums

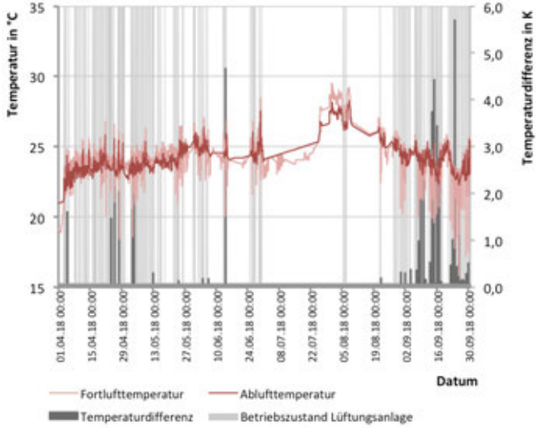

Abb. 334 Temperaturverlaufs der Ab- und Fortluft sowie der Temperaturdifferenzen

Zuschauersaals liegt. Befindet sich die Fort- über der Auslegungstemperatur, so wird nur die Differenz der Außen- bis zur Auslegungstemperatur als Wärmeverlust gewertet. Im Falle, dass Wärmeverluste auftreten, bewegt sich die Differenz von Fort- und Außenlufttemperatur von 0,01 K bis 15,49 K und beträgt im Mittel 4,99 K. Dies entspricht einem durchschnittlichen Wärmeverlust von 2,45 kW/l. Während des Vorstellungszeitraums erhöht sich der Durchschnitt der Temperaturdifferenz auf 6,49 K und einem mittleren Wärmeverlust von 3,76 kW/l. Insgesamt wurde im Messzeitraum so ein Wärmeverlust von 6685 kWh ermittelt.

Da es sich beim Messzeitraum um die Kühlperiode handelt, können durch die mechanische Belüftung auch Wärmeeinträge auftreten. Diese entstehen, wenn sowohl die Fort- unter der Außenlufttemperatur liegt als auch die Außen- höher als die Auslegungstemperatur ist. Sofern die Fortlufttemperatur niedriger als die Auslegungstemperatur ist, wird lediglich die Differenz der Außen- bis zur Fortlufttemperatur als Wärmelast gewertet. Für das Auftreten von Wärmelasten liegt die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Fortlufttemperatur maximal bei 2,82 K und beträgt im Mittel 0,97 K. Somit entsteht durchschnittlich eine Wärmelast von 0,27 kW/l. Da sich die mittlere Temperaturdifferenz während des Vorstellungszeitraums auf 1,77 K erhöht, steigern sich auch die mittleren Wärmelasten auf 0,29 kW/l. Im Verhältnis zu den Wärmeverlusten durch die mechanische Belüftung sind die Wärmeeinträge mit 56 kWh im Messzeitraum deutlich geringer. Dies lässt sich darüber erklären, dass die Lüftungsanlage aufgrund der Sommerpause in den Monaten mit den höchsten Außenlufttemperaturen nicht aktiv ist.

Neben den Wärmeverlusten und den Wärmeeinträgen durch die Lüftung, werden jedoch auch gezielt Lasten abgeführt. Abzuführende Wärmelasten treten dann auf, wenn die Fortlufttemperatur, welche gleich der Umlufttemperatur ist, die Auslegungstemperatur überschreitet. Eine Überschreitung der Auslegungstemperatur tritt im gesamten Betrachtungszeitraum zu 98,7% der Zeit auf, während im Vorstellungszeitraum eine minimale Reduzierung auf 95,5% zu beobachten ist. Mittels der Differenz zwischen Fortluft- und Auslegungstemperatur kann die Wärmelast bestimmt werden, deren Abführung gezielt erfolgen sollte. Diese liegt durchschnittlich bei 2,38 kW/l und verringert sich im Vorstellungszeitraum auf 2,18 kW/l. Unter Berücksichtigung der Temperaturspanne zwischen Fort- und Mischlufttemperatur ist die Bestimmung der tatsächlich abgeführten Wärmeleistung möglich. Anhand des Durchschnittswerts von 2,94 kW/l im Gesamtzeitraum und 5,03 kW/l im Vorstellungszeitraum wird bereits sichtbar, dass diese zumindest zeitweise die abzuführende Wärmelast überschreitet. Dies bedeutet, dass durch die vorliegende Steuerung der mechanischen Belüftung gleichzeitig eine gezielte Wärmeabführung und Wärmeverluste herbeigeführt werden. Über das Verhältnis von tatsächlich abgeführter Wärmeleistung zu gewünschter Wärmeableitung kann bestimmt werden, welcher Anteil mittels Lüftungsanlage abgeführt wird. Berücksichtigt werden darf jedoch nur die tatsächlich abgeführte Wärmeleistung, welche die gewünschte Wärmeableitung nicht überschreitet. Da in vielen Fällen eine höhere Wärmeleistung als gewünscht abgeleitet wird, beträgt der Anteil oftmals 100%. Bei Betrachtung des gesamten Messzeitraums zeigt sich jedoch ein Durchschnittswert von 62,5%, der sich bei einer ausschließlichen Betrachtung des Vorstellungszeitraums auf 90,6% erhöht. Der größte Anteil an auftretenden Wärmelasten kann durchschnittlich im September 2018 mit einem Anteil von 77,7% mittels Lüftungsanlage abgeführt werden, während dieser im Mai 2018 mit 44,8% am geringsten ausfällt. Erfolgt jedoch nicht nur

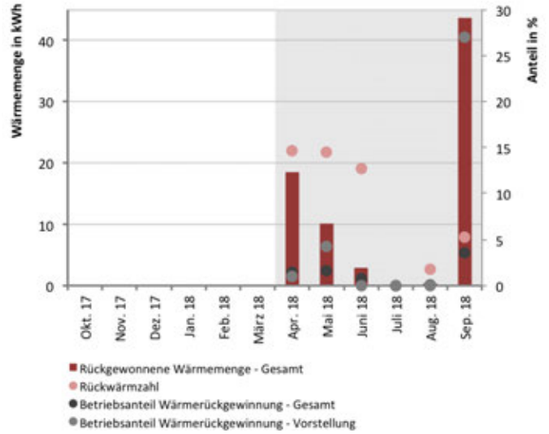

Abb. 335 Monatlicher Nutzungsanteils der Wärmerückgewinnung während der Betriebszeiten der Lüftungsanlage und rückgewonnene Wärmemenge

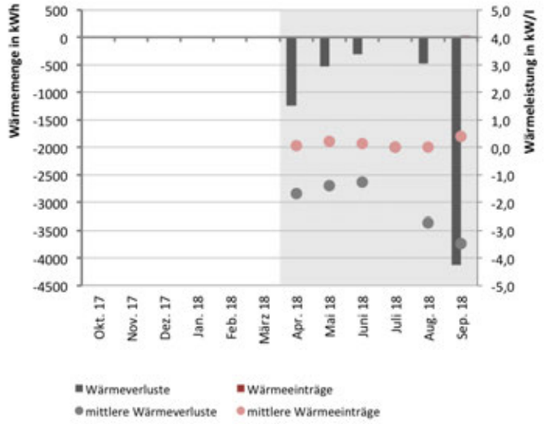

Abb. 336 Monatliche Wärmeeinträge und –verluste

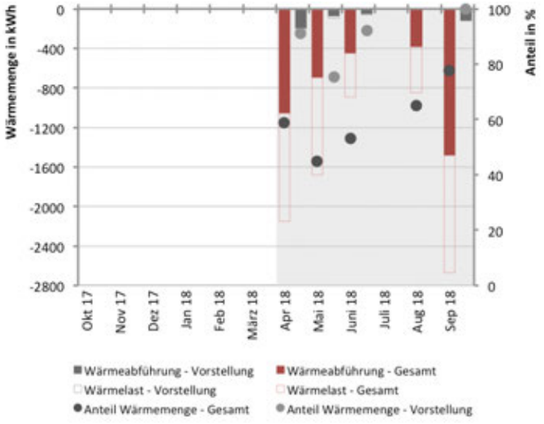

Abb. 337 Monatliche durch Lüftung abgeführten Wärmemenge im Verhältnis zu den Wärmelasten

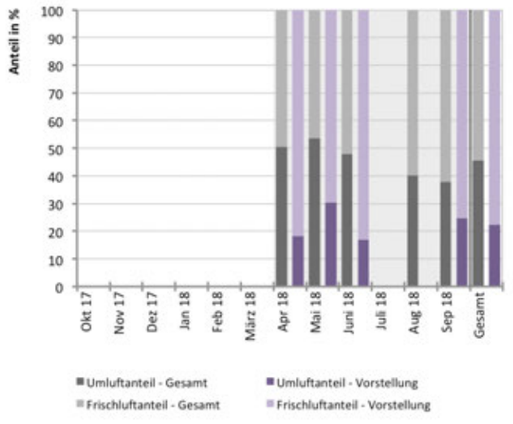

Abb. 338 Durchschnittlicher Frisch- und Umluftanteil in Abhängigkeit des Nutzungszustands

eine Betrachtung des Anteils der abgeführten Wärmelast, sondern auch die Wärmelast selbst, so beträgt diese maximal 7,67 kW/l. Im Durchschnitt liegt diese bei 1,18 kW/l und erhöht sich im Vorstellungszeitraum auf 1,97 kW/l. Die erhöhte Wärmeabführung mittels Lüftung im Vorstellungszeitraum ist auf den erhöhten Frischluftanteil zurückzuführen.

Mithilfe des Zusammenhangs zwischen Fort-, Außen- und Mischlufttemperatur lässt sich näherungsweise der Frischluftanteil des mittels Lüftungsanlage bewegten Luftvolumens bestimmen. Im Betrachtungszeitraum liegt der Frischluftanteil sowohl im gesamten Betrachtungszeitraum als auch im Vorstellungszeitraum zwischen 0% und 100%. Durchschnittlich übersteigt der Frischluftanteil den Umluftanteil mit 54,3% im Gesamtzeitraum leicht. Während des Vorstellungszeitraums, in dem ein höherer CO_2-Eintrag durch die Zuschauer vorliegt, ist der Frischluftanteil mit 77,4% deutlich höher.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Lüftungsanlage aufgrund der Sollwerteinstellungen für die CO_2-Konzentration während der Betriebszeiten nahezu dauerhaft große Frischluftvolumina fördert, was sowohl Auswirkungen auf den Stromverbrauch als auch auf die Wärmeverluste hat. In der Kühlperiode, welche aufgrund des Messzeitraums betrachtet wurde, wirkt sich der hohe Frischluftanteil positiv auf die Abführung der Wärmelasten und somit auf die Raumlufttemperaturen aus, sodass nur in wenigen Fällen eine Überschreitung der Behaglichkeitsgrenzwerte zu beobachten ist. Bezogen auf den Stromverbrauch erzeugt die Förderung der großen Luftvolumina jedoch vermutlich einen erhöhten Wert. Darüber hinaus ist es zu erwarten, dass in der Heizperiode aufgrund der Anlagensteuerung trotz Wärmerückgewinnung möglicherweise große Wärmeverluste entstehen, die in einem erhöhten Verbrauch für Heizung/Warmwasser resultieren. Die Einstellungen der Lüftungsanlage sollten daher überprüft und unter Berücksichtigung der verschiedenen Aspekte optimiert werden.

Die Analyse des Energiebedarfs hat gezeigt, dass beim Strom neben den Anteilen für Luftförderung und Beleuchtung der nächstgrößte Anteil durch die Kälteerzeugung verursacht wird [siehe 11.3.1]. Vom Bedarf für die Kälteerzeugung entsteht ein Anteil in Höhe von 51,2% im Zuschauersaal, da hier die Zuluft mittels eines Kaltwassersatzes gekühlt wird. Für den Zeitraum von Mitte Mai 2018 bis September 2018 wurden Messwerte bezüglich der Kälteversorgung des Zuschauersaals in der GLT gespeichert und ausgewertet.

Im Betrachtungszeitraum wurde die Kälteversorgung zu 6,5% der Zeit genutzt. Keine Aktivität wurde im Monat Juli 2018 erfasst, da der Juli in die Spielpause fällt und die Kälteversorgung somit vollständig ausgeschaltet war. Der größte Anteil an Messintervallen mit Aktivität der Kälteanlage liegt im September 2018 mit 40,6% vor, es folgen die Monate Juni 2018 mit 29,6% und Mai 2018 mit 21,9%. Für den Monat Mai 2018 muss berücksichtigt werden, dass nur für etwa die Hälfte der Zeit Messwerte vorliegen, da die Speicherung der GLT-Daten aufgrund technischer Schwierigkeiten erst Mitte des Monats begonnen hatte. Im August 2018 betrug der Anteil lediglich 7,9%, obwohl es sich um einen der Monate mit den höchsten durchschnittlichen Außenlufttemperaturen handelt. Die geringe Aktivität der Kälteversorgung ist darauf zurückzuführen, dass auch dieser Monat noch teilweise in die Spielpause fällt.

Neben der anteiligen Verteilung der Aktivität der Kälteversorgung auf die Messmonate, kann auch eine monatsweise Gegenüberstellung des zeitlichen Anteils erfolgen, bei dem die Kälteversorgung an- oder ausgeschaltet war. Hierbei zeigt sich, dass die Kälteanlage im Mai mit 14,4% den größten Anteil der Zeit eingeschaltet war. Im September 2018 war diese dagegen zu 12,0% und im August 2018 nur 2,3% der Zeit eingeschaltet.

Darüber hinaus kann betrachtet werden, ob während des Leerstands oder zu Vorstellungszeiten gekühlt wurde. Während den Vorstellungszeiten liegt der Anteil im Betrachtungszeitraum bei 11,7% und im Leerstand sinkt dieser auf 6,5% ab. Erfolgt auch hier eine monatsweise Betrachtung, entfällt der größte Anteil, bei dem während der Vorstellungen gekühlt wird, mit 46,2% auf Juni 2018. Im Leerstand wird im Mai 2018 mit 14,7% am häufigsten gekühlt, aber auch im September 2018 liegt der Anteil noch bei 12,4%.

Die Laufzeiten der Kälteanlage variieren, orientieren sich jedoch teilweise an den Einschaltzeiten der Lüftungsanlage im Zuschauersaal. Anhand der vorliegenden Messdaten ist jedoch keine automatische Regelung zu identifizieren, die sich an den Luftströmen im Zuschauersaal, der Außentemperatur oder internen anlagentechnischen Parametern richtet.

Die Betriebszeit der Kältemaschine hat großen Einfluss auf den Energieverbrauch. Dies lässt sich durch die Korrelation zwischen der Anschaltdauer und dem Energieverbrauch in Monat belegen. Da die Korrelation 0,98 beträgt und somit einen sehr starken linearen Zusammenhang zeigt, ist der Stromverbrauch größer, je häufiger die Kältemaschine angeschaltet ist. Gleichzeitig besteht jedoch ein Grundverbrauch. Im Betrachtungszeitraum fiel für die Kälteversorgung im Monat Mai 2018 mit 2707 kWh der höchste Stromverbrauch an. Im Juli 2018, in dem die Kälteversorgung komplett ausgeschaltet war, betrug der Stromverbrauch dagegen lediglich 383 kWh. Im Gegensatz zu den restlichen Messwerten liegen für den Stromverbrauch ganzjährig Daten vor. Anhand dieser ist zu sehen, dass in den Monaten November 2017 bis März 2018 die Kühlung nicht genutzt wurde. In diesem Zeitraum liegt ein Verbrauch zwischen 345 kWh im Februar 2018 und 382 kWh im Januar sowie März 2018 vor und gleicht somit dem Verbrauch im Juli 2018. Obwohl der Oktober bereits zur Heizperiode

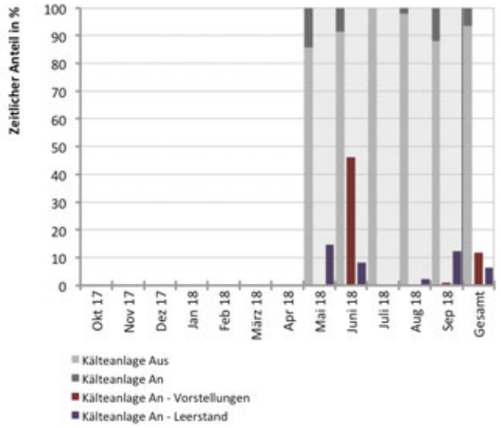

Abb. 332 Monatlicher Einschaltanteil der Kälteanlage nach Nutzungszuständen

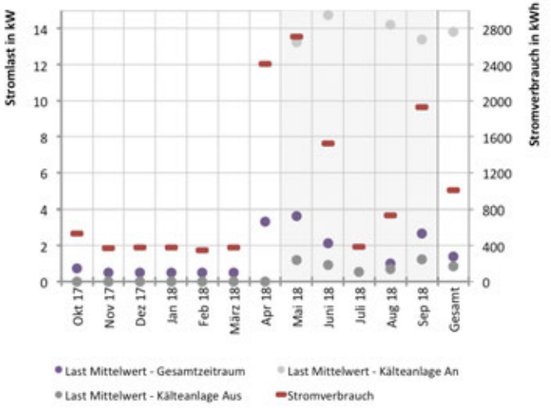

Abb. 339 Monatlicher Stromverbrauch und –Lasten nach Betriebszustand der Kälteanlage

zählt, wird durch den Stromverbrauch in Höhe von 536 kWh sichtbar, dass dennoch zeitweise gekühlt wurde. Wenngleich auch im Messzeitraum anhand der vorliegenden Daten kein Steuerungsparameter für die Kälteanlage identifiziert werden konnte, steigern im Normalfall hohe Außenlufttemperaturen den Kühlbedarf. Da im Oktober 2017 eine Maximaltemperatur von 25,6°C vorlag, ist es zu erklären, dass hier zeitweise noch ein Kühlbedarf bestand.

Neben der Betrachtung des Stromverbrauchs erfolgt eine Analyse der Lasten. Die Durchschnittslasten in den einzelnen Monaten verhalten sich dabei aufgrund des physikalischen Zusammenhangs äquivalent zum Gesamtstromverbrauch in den einzelnen Monaten. In den Monaten November 2017 bis März 2018 sowie im Juli 2018 entsteht die geringste Durchschnittslast mit 0,51 kW, während diese im Mai 2018 mit 3,64 kW am höchsten ist. Im eingangs definierten Betrachtungszeitraum, für den Informationen für die Einschaltzeitpunkte der Kälteanlage vorliegen, wird ein erheblicher Unterschied zwischen den Lasten im ein- und ausgeschalteten Zustand sichtbar. Während die Lasten im aktiven Zustand der Kälteanlage durchschnittlich 13,83 kW betragen, sinken diese bei ausgeschalteter Anlage auf 0,85 kW ab.

Nachdem zunächst eine gesamtheitliche Betrachtung der Kälteanlage vorgenommen wurde, erfolgt nun die Analyse der einzelnen Bestandteile. Die Kälteanlage ist in einen Kühl- und Rückkühlkreislauf untergliedert. Auf Seiten des Kühlkreislaufs besteht eine Kühlleistung von 180 kW, da der Kaltwasserssatz ein Volumen von 26,5 m³/h fördern kann und der Wasserkreislauf mit einer Temperaturspreizung von 6/12°C ausgelegt ist. Zwischen Kaltwassersatz und den beiden baugleichen Kühlern, welche die Zuluft aus den Lüftungsanlagen im Zuschauerraum temperieren und jeweils auf 14

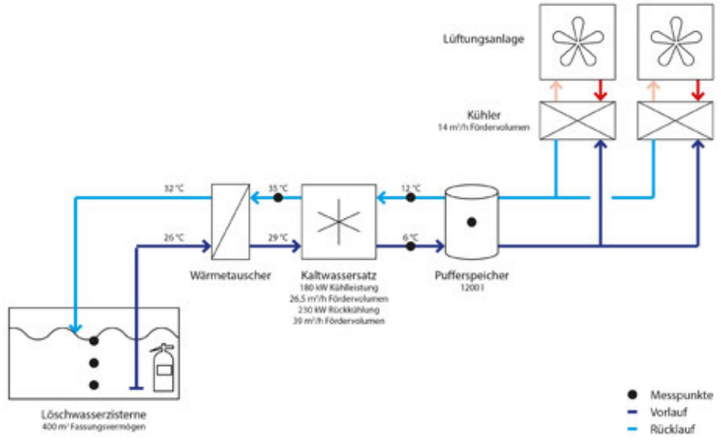

Abb. 340 Schema der Kälteanlage mit Eintragung der Messpunkte

m³/h ausgelegt sind, ist ein Pufferspeicher mit 1200 l Fassungsvermögen zwischengeschaltet.

Erfolgt eine Betrachtung der gemessenen Temperaturspreizung des Vor- und Rücklaufes im gesamten Messzeitraum, so liegt der Durchschnitt bei lediglich 0,85 K. Die maximal erfasste Temperaturspreizung beträgt jedoch 6,80 K und liegt somit ein wenig über der Auslegung in Höhe von 6,00 K. Das Minimum von -0,89 K bedeutet, dass zeitweise höhere Vorlauf- als Rücklauftemperaturen gemessen wurden. Dies ist jedoch nur im ausgeschalteten Zustand der Kälteanlage der Fall, da der Wasserkreislauf zum Erliegen kommt und ein Temperaturausgleich mit der Umgebung stattfindet.

Die bisherige Betrachtung umfasst den gesamten Messzeitraum und enthält noch keine Differenzierung zwischen den Betriebszuständen der Anlage. Werden die mittleren Temperaturspreizungen der jeweiligen Anlagenzustände gegenübergestellt, so liegt diese im angeschalteten Zustand bei 2,28 K, während diese im ausgeschalteten Zustand auf 0,75 K absinken, was erneut auf den Temperaturausgleich ohne mechanisch erzwungene Zirkulation hinweist. Für die Betrachtung der Funktionsweise der Kälteanlage sind jedoch hauptsächlich die Messwerte im aktiven Zustand relevant. Anhand der hier vorliegenden durchschnittlichen Temperaturspreizung von 2,82 K und dem maximalen Fördervolumen der Anlage lässt sich die durchschnittliche Kühlleistung berechnen, die im Messzeitraum 70,3 kW beträgt. Dies zeigt, dass durchschnittlich nur knapp 40% der maximalen Kühlleistung abgerufen wurden.

Mittels einer Häufigkeitsverteilung der Temperaturspreizung kann festgestellt werden, dass lediglich zu 0,4% der Zeit die maximale Temperspreizung von 6,0 K und somit die größte Kühlleistung erreicht wurde. Mindestens die Hälfte der Kühlleistung mit einer Temperaturspreizung von 3,0 K wurde zu 9,1% der Zeit abgerufen, während mit einer Temperaturdifferenz von über 1,5 K zumindest ein Viertel zu einem zeitlichen Anteil von 94,2% zur Verfügung stand. Am häufigsten treten Temperaturspreizungen von 2,0 K bis 2,5 K mit einem Anteil von 36,4% auf. Es folgen Temperaturdifferenzen von 1,5 K bis 2,0 K mit einer Häufigkeit von 29,4% sowie der Bereich von 2,5 K bis 3,0 K mit einem Anteil von 19,3%.

Betrachtet man darüber hinaus die Vor- und Rücklauftemperaturen, so betrugen diese für den Vorlauf durchschnittlich 6,76 °C und liegen somit 0,76 K über dem Auslegungswert von 6,0 °C. gemäß der mittleren Temperaturspreizung beträgt die durchschnittliche Rücklauftemperatur 9,04 °C und ist somit 2,96 K geringer als die Auslegungstemperatur von 12,0 °C. Die geringste gemessene Vorlauftemperatur lag bei 5,37 °C, während die niedrigste Rücklauftemperatur 6,56 °C betrug. Dies bedeutet, dass trotz Aktivität der Kälteanlage zeitweise kaum Kälte an den Zuschauersaal übergeben wurde. Anhand der Häufigkeitsverteilung lässt sich jedoch

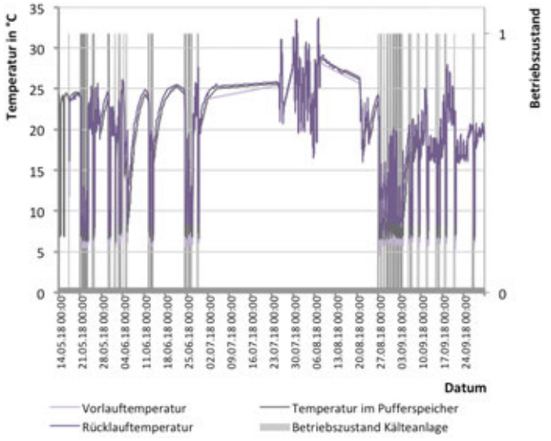

Abb. 341 Gegenüberstellung des Anlagenzustands mit den Vor- und Rücklauftemperaturen im Betrachtungszeitraum

feststellen, dass eine geringe Temperaturspreizung von bis zu 1 K nur zu einem geringen zeitlichen Anteil von 0,9% vorliegt.
Laut der Ergebnisse der Simulation, die zur Überprüfung der Auslegung der Kälteanlage während der Planungen erstellt worden ist, soll die maximale Rückkühlleistung und somit auch der Kühlleistung der Kältemaschine ab einer Außentemperatur von 30°C erreicht werden. Im Betrachtungszeitraum stieg die Außenlufttemperatur während angeschalteter Kälteanlage nur zu 3,7% über 30,0°C. Auch die Mischlufttemperatur im Zuschauersaal überschritt die äußere Komfortgrenze von 26,0°C für Kategorie II der Behaglichkeitsbereiche für den Kühlfall [siehe 11.4.1.1] zu einem zeitlichen Anteil von lediglich 4,8%. Der verhältnismäßig geringe Anteil, zu dem extreme Temperaturen im Innen- und Außenbereich auftreten, erforderte kaum den Abruf der maximalen Kühlleistung, sodass die geringen Temperaturspreizungen zu erklären sind.
Im Gegensatz zum Kühlkreislauf ist die Rückkühlung des Systems ist mit einer höheren Leistung von 230 kW ausgelegt, die aufgrund der Temperaturspreizung von 6,0 K durch ein größeres Fördervolumen von 39 m^3/h erreicht wird. Sie erfolgt über eine Löschwasserzisterne im Erdreich, die ein Fassungsvermögen von 400 m^3 aufweist [siehe 9.3.4.2].
In der Löschwasserzisterne wurden im oberen, mittleren sowie unteren Bereich Temperaturen erfasst, die zunächst zu einem Mittelwert zusammengezogen werden. Während des Betrachtungszeitraums betrug die mittlere Temperatur 29,12°C. Die geringste Temperatur wurde mit 23,87°C Ende August 2018 erfasst, während die höchste mit 32,28°C Mitte September 2018 ermittelt wurde. Erfolgt anschließend eine weitere Differenzierung des Durchschnittswerts, so zeigt sich, dass dieser gegenüber dem Gesamtzeitraum während Aktivität der

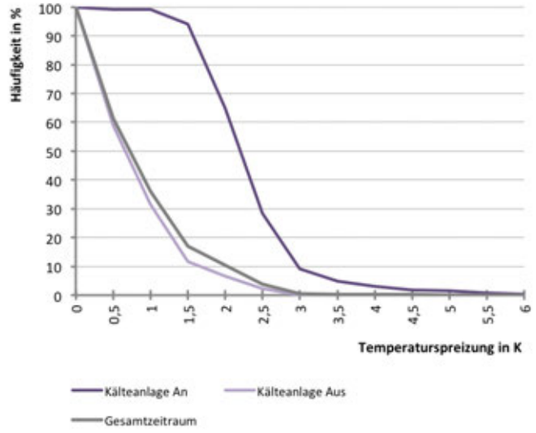

Abb. 342 Summenhäufigkeit der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf im Kühlkreislauf

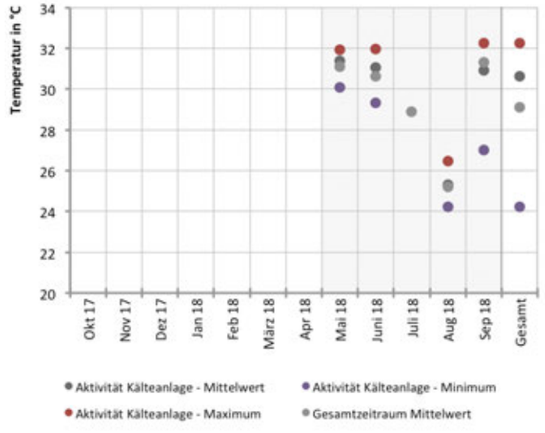

Abb. 343 Monatliche Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperaturen in der Löschwasserzisterne

Kältemaschine mit 30,61°C noch höher ausfällt. In der Simulation über ein Jahr, auf Basis derer die Rückkühlung über die Löschwasserzisterne als machbar erachtet wurde, ergab sich lediglich eine maximale Temperatur von 28,5°C. Anhand des Durchschnittswerts von 30,61°C wird jedoch sichtbar, dass das Simulationsergebnis trotz der im Betrachtungszeitraum liegenden Spielpause deutlich überschritten wird und somit eine Verminderung der Rückkühlleistung vorliegt. Dies kann dazu führen, dass die Kälteanlage nur mit geringerer Kühlleistung betrieben werden kann, da ansonsten die Gefahr einer Überhitzung der Kälteanlage besteht.
Die Summenhäufigkeit der auftretenden Temperaturen zeigt sogar, dass im aktiven Zustand der Kältemaschine eine Temperatur von 28,5°C zu einem zeitlichen Anteil von 88,0% überschritten wird. Die meisten Temperaturen traten zwischen 31,0°C und 32,0°C auf. Eine Aufgliederung der Mittelwerte auf die einzelnen Monate verdeutlicht, dass diese im September 2018 mit 31,3°C und im Mai 2018 mit 31,1°C besonders hoch waren. Die besonders hohen Durchschnittstemperaturen lassen sich auf die höchste Laufzeit der Kältemaschine zurückführen. Es ist außerdem zu beobachten, dass die Durchschnittstemperatur nach dem Monat Mai 2018 durch das Abschalten der Anlagentechnik über die Spielpause im Juli 2018 bis August 2018 auf 25,2°C absinkt. Im September 2018 erfolgt dann ein starker Anstieg um 6,1 K.
Die Diskrepanz zwischen den Simulationsergebnissen und den vorliegenden Messwerten können auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sein. Zunächst beschränkte sich die Laufzeit der Kälteanlage in der Simulation auf vier Vollaststunden pro Tag, die jeweils zwischen 18.00 Uhr und 22.00 Uhr auftraten. Im Gegensatz dazu ist anhand der Messdaten eine unregelmäßige Aktivität der Kälteanlage in Teillastbetrieb, oftmals über

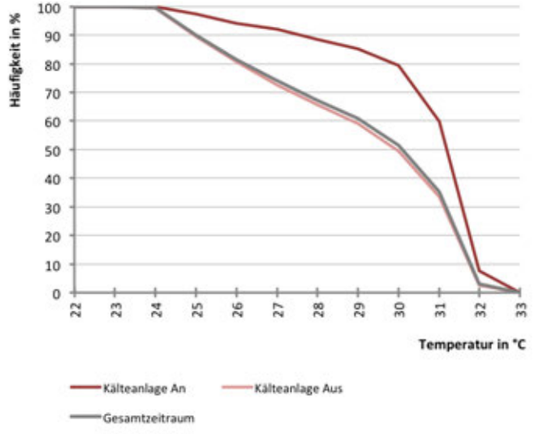

Abb. 344 Summenhäufigkeit der Temperaturen in der Löschwasserzisterne im Rückkühlkreislauf

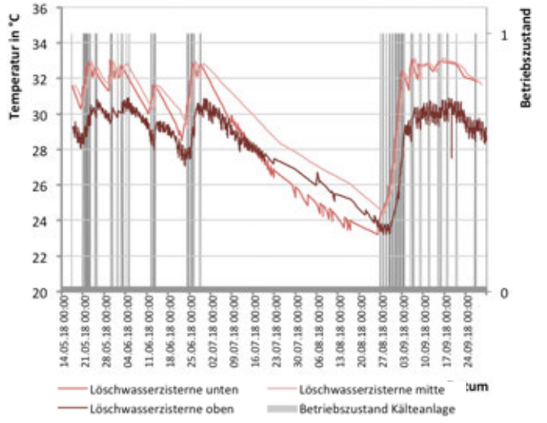

Abb. 345 Anlagenzustand gegenüber dem Temperaturverlauf in der Löschwasserzisterne im Betrachtungszeitraum

nahezu die ganze Betriebszeit der Lüftungsanlage, festzustellen. Somit fallen die Entladungszeiträume, die in der Simulation mit 20 Stunden kalkuliert waren, geringer aus. Darüber hinaus werden bei der Simulation ein für die Region standardisierter Wetterdatensatz sowie eine Erdreich- bzw. Zisternentemperatur zu Beginn des Jahres von 12°C zu Grunde gelegt. Der Messzeitraum umfasst jedoch ein Jahr mit hohen Außentemperaturen, sodass davon auszugehen ist, dass bereits zu Beginn des Jahres in der Löschwasserzisterne Temperaturen von mehr als 12°C vorlagen.

Betrachtet man die Temperaturschichtung in der Löschwasserzisterne, wird neben der Höhe der Durchschnittstemperatur eine weitere Problematik deutlich. Im Idealfall sollte sich eine Temperaturschichtung in der Löschwasserzisterne einstellen, bei der sich aufgrund der höheren Dichte kälteres Wasser im unteren Bereich ansammelt. Dieses kann dann am Boden der Löschwasserzisterne für den Kühlwasservorlauf entnommen werden. Obwohl im oberen Bereich die Einleitung des Kühlwasserrücklaufs erfolgt, überschreitet der Mittelwert der Temperatur im unteren Bereich der Zisterne mit 31,75°C jedoch die Durchschnittstemperatur im oberen Bereich in Höhe von 28,89°C. Es zeigt sich außerdem, dass während der gesamten Betriebszeit der Kälteanlage im unteren Bereich höhere Temperaturen vorliegen. Erst bei Ausschalten der Anlage über einen längeren Zeitraum stellt sich im Juli 2018 innerhalb der Spielpause die erwartete Temperaturschichtung ein, da zu 49,5% der Zeit niedrigere Temperaturen im unteren Bereich vorliegen. Auch im August 2018 hält die erwartete Temperaturschichtung zu 84,5% der Zeit an, bis Ende des Monats wieder ein Einschalten der Kälteanlage erfolgt.

Ergänzend kann die durchschnittliche Temperaturzunahme in der Löschwasserzisterne während der Betriebszeiten der Kälteanlage betrachtet werden, um so Rückschlüsse auf die Rückkühlleistung zu ziehen. Pro Messintervall erfolgt eine durchschnittliche Temperatursteigerung um 0,012 K, was einer Rückkühlleistung von 22,35 kW entspricht. Die maximal ermittelte Temperatursteigerung betrug 0,221 K pro Messintervall. Als Minimum wurde dagegen eine Temperaturabsenkung um 0,054 K erfasst. Während der Aktivität der Kälteanlage fand zu 85,6% der Zeit eine Beladung des Speichers statt. Die Betrachtung des Temperaturverhaltens der Löschwasserzisterne außerhalb der Betriebszeiten der Kälteanlage ermöglicht Aussagen über die Entladung über das Erdreich. Mit einer durchschnittlichen Temperaturabsenkung um 0,001 K beträgt die Abgabe der Wärmeleistung an das Erdreich 1,86 K. Im Mittel sinkt die Temperatur in der Löschwasserzisterne über einen Zeitraum von 24 Stunden also lediglich um 0,096 K ab. Der Durchschnittswert liegt somit unter der Prognose von 0,5 K, die anhand der Simulationsergebnisse getroffen wurde. Abweichend zum Mittelwert liegen jedoch auch Messintervalle vor, in denen mit maximal 0,559 K eine

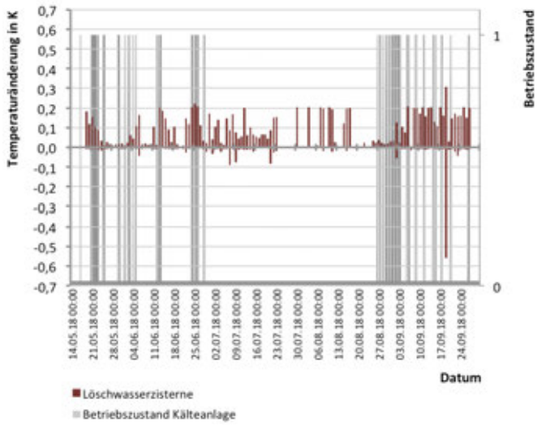

Abb. 346 Anlagenzustands gegenüber der Temperaturänderung in der Löschwasserzisterne

deutlich stärkere Temperaturabnahme zu verzeichnen ist. Im ungünstigsten Fall kann es jedoch auch zu einer weiteren Erwärmung der Löschwasserzisterne kommen. Maximal wurde hier eine Erwärmung um 0,305 K pro Messintervall erfasst. Mit einem Anteil von 21,0% erwärmt sich die Löschwasserzisterne trotz ausgeschalteter Kälteanlage weiter. In den verbleibenden 79,0% findet wie gewünscht eine Entladung statt.

Da keine Messung der Kühlwasservorlauftemperatur erfolgt ist, die Entnahme des Wassers zur Rückkühlung jedoch im unteren Bereich der Löschwasserzisterne erfolgt, ist davon auszugehen, dass die Vorlauftemperatur in mindestens der Temperatur der Zisterne im unteren Bereich entspricht. Wie bereits oben beschrieben, beträgt die Temperatur hier im Mittel 31,75°C und überschreitet somit den maximalen Sollwert von 26°C bereits deutlich. Der Anteil der Messwerte, die den Sollwert überschreiten, liegt bei 98,0%.

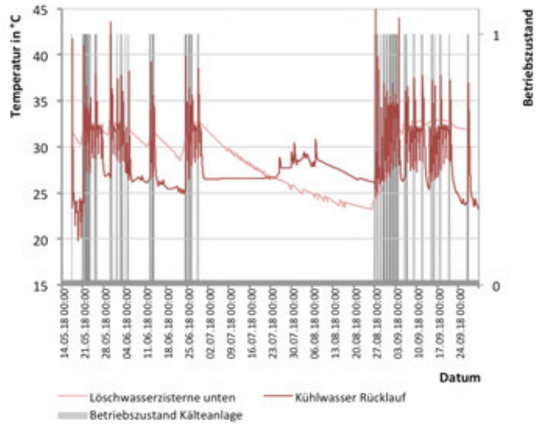

Abb. 347 Anlagenzustand gegenüber der Rücklauftemperatur sowie der Temperatur im unteren Bereich der Löschwasserzisterne

Im Gegensatz zu den Kühlwasservorlauftemperaturen wurden für den Rücklauf Daten in der GLT gespeichert. Während der Betriebszeit der Kältemaschine bewegten sich diese zwischen 23,85°C und 44,01°C. Im Verhältnis zu der angegebenen Temperaturspreizung von 29/35°C wird der Sollwert teilweise sowohl unter- als auch überschritten, wobei nur eine Überschreitung zu einer Überhitzung der Anlage führen kann. Eine Überschreitung des maximalen Sollwerts wurde mit einem zeitlichen Anteil von 11,9% festgestellt. Im Mittel liegt die Kühlwasserrücklauftemperatur jedoch bei 34,25°C und unterschreitet somit den Sollwert leicht.

Die Beurteilung der realen Temperaturspreizung und somit der Rückkühlleistung ist nicht möglich, da der Rückkühlkreislauf in zwei weitere Kreisläufe separiert ist, um das Löschwasser räumlich vom Kühlwasser zu trennen. Die Abwärme des Kaltwassersatzes wird durch das Kühlwasser abgeführt. Anschließend wird es durch einen Wärmetauscher geführt, sodass die Wärmeenergie auf das Löschwasser übertragen werden kann. Beide Kreisläufe besitzen jedoch unterschiedliche Temperaturspreizungen. Während die Temperaturspreizung des Kreislaufs der Löschwasserzisterne bei 26/32°C liegt, ist sie beim Kühlwasserkreislauf mit 29/35°C um 3,0 K höher. Da die Messung der Kühlwasserrücklauftemperatur im Kühlkreislauf erfolgt, stehen Vorlauftemperatur der Löschwasserzisterne und Kühlwasserrücklauftemperatur nicht unmittelbar in Zusammenhang.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Rückkühlleistung der Löschwasserzisterne aufgrund der hohen Wassertemperaturen nur eingeschränkt abgerufen werden kann. Gründe für die hohen Temperaturen ist möglicherweise eine geringere Wärmeabgabe an das Erdreich als die Simulationsergebnisse vermuten ließen. Darüber hinaus beeinflusst die Temperaturschichtung der Löschwasserzisterne die Rückkühlung ebenfalls ungünstig, da an der Entnahmestelle am Boden vermutlich höhere Temperaturen vorherrschen als im oberen Bereich.

11.2.4 Abgleich mit den Sanierungszielen

Zum Abgleich der Sanierungsziele mit dem Ist-Zustand liegen aus den Abrechnungen der Energieversorger für die Jahre 2016 bis 2018 die Gesamtverbräuche für Strom und Fernwärme vor. Im Folgenden werden diese gegenüber den Sanierungszielen sowie den Referenzwerten aus der „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ eingeordnet.

Der durchschnittliche, aus den Jahren 2009 bis 2011 ermittelte, Stromverbrauch betrug vor der Sanierung 429.333 kWh/a. Bei einer Nettogrundfläche von 9.919 m² ergibt sich so ein spezifischer Verbrauch von 43,3 kWh/m²a, was eine Überschreitung des Referenzwerts aus der Bekanntmachung von 40 kWh/m²a um 8,2% bedeutet.

Im Zuge der Sanierung wurde das vorhandene Theatergebäude um Anbauten ergänzt, sodass eine Erhöhung der Nettogrundfläche um 570 m² auf 10.491 m² stattgefunden hat. Die Sanierungsziele sahen unter Berücksichtigung des Energiebedarfs für die Neubauflächen eine Reduktion des bisherigen Gesamtverbrauchs um 15,8% auf 361.668 kWh vor, was einem spezifischen Verbrauch von 34,5 kWh/m²a entspricht. Rechnerisch konnte so eine Unterschreitung des Referenzwerts aus der Bekanntmachung um 13,8% erzielt werden.

Zur Überprüfung der bisherigen Erreichung der Sanierungsziele wurden die Stromverbräuche aus den Jahren 2016 bis 2018 herangezogen. Von den drei betrachteten Jahren fiel der Stromverbrauch mit 403.617 kWh/a im Jahr 2016 am geringsten aus, während er im Jahr 2018 mit 460.263 kWh/a am höchsten war. Im Gegensatz zum Jahr 2016, welches im Verhältnis zum durchschnittlichen Stromverbrauch vor der Sanierung einen um 6% geringeren Verbrauch zeigt, liegen die absoluten Stromverbräuche in den Jahren 2017 und 2018 darüber. Gegenüber dem durchschnittlichen Verbrauchswert vor der Sanierung zeigt der Mittelwert aus den Jahren 2016 bis 2018 eine Verbrauchssteigerung um 1,7%. Im Vergleich

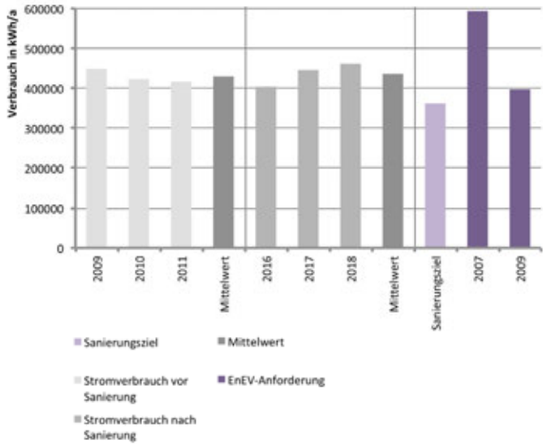

Abb. 349 Absoluter Stromverbrauch

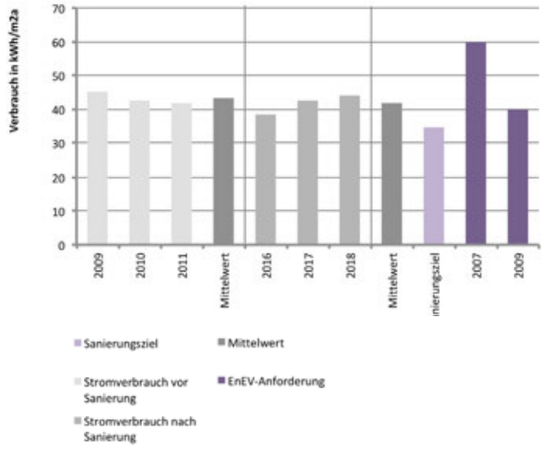

Abb. 348 Spezifischer Stromverbrauch

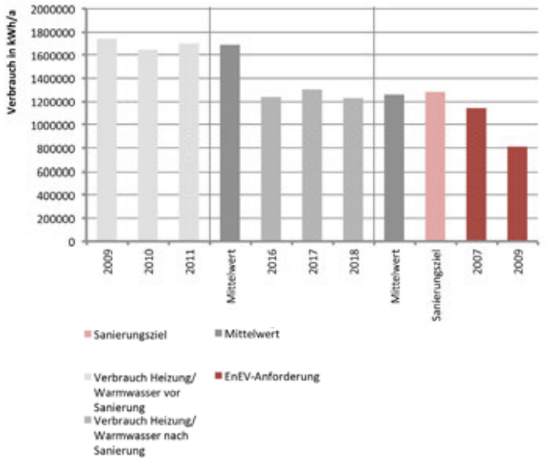

Abb. 351 Absoluter Fernwärmeverbrauch

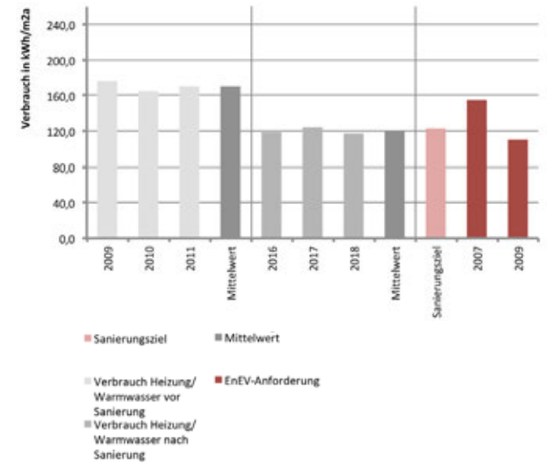

Abb. 350 Spezifischer Fernwärmeverbrauch

zu der absoluten Verbrauchssteigerung liegt, bedingt durch die Anbauten, die nur Nutzungen ohne intensiven Stromverbrauch beinhalten, dennoch eine Verringerung des spezifischen Verbrauchs um 3,8% auf 41,6 kWh/m²a vor. Bezogen auf den Referenzwert der Bekanntmachung wird dieser durchschnittlich nur noch um 4,1% überschritten.

Erfolgt jedoch eine Bewertung der Verbrauchswerte in Relation zu den Sanierungszielen, so zeigt sich, dass der angestrebte absolute Verbrauch von 361.668 kWh/a und der spezifische Verbrauch in Höhe von 34,5 kWh/m²a durchschnittlich um 20,8% überschritten werden. Die Sanierungsziele werden somit noch nicht erreicht, sodass die Ursachen hierfür durch eine Analyse der Ergebnisse aus der einjährigen Messung zu untersuchen sind.

Der Fernwärmeverbrauch lag vor der Sanierung im Mittel bei 1.693.000 kWh/a. Eine Spezifizierung des Werts durch den Bezug auf die Nettogrundfläche zeigt einen Verbrauch von 170,7 kWh/m²a. Da der Referenzwert aus der Bekanntmachung bei 110 kWh/m²a liegt, entspricht dies einer Überschreitung von 55,2%.

Durch die Sanierung sollte sich der Fernwärmeverbrauch unter Einbezug des zusätzlichen Endenergieverbrauchs durch die neuentstandenen Anbauten um 24,2% auf 1.282.488 kWh/a reduzieren. Der spezifische Energieverbrauch liegt bei 122,3 kWh/m²a, was aufgrund der erhöhten Nettogrundfläche einer stärkeren Reduzierung von 28,4% entspricht. Trotz der angestrebten Reduzierung konnte der Referenzwert aus der Bekanntmachung nicht ganz erreicht werden und wird rechnerisch weiterhin um 11,1% überschritten.

Anhand der Verbrauchswerte aus den Jahren 2016 bis 2018 konnte die Einhaltung der Sanierungsziele überprüft werden. In den betrachteten Jahren waren die Temperaturen in Wolfsburg gegenüber dem Referenzstandort Potsdam geringer, sodass mittels der Klimabereinigung eine Korrektur des

Verbrauchs nach oben erfolgt. Dies führt dazu, dass der höchste Verbrauch im Jahr 2017 mit 1.301.322 kWh/a verzeichnet wurde. Am geringsten war dieser dagegen 2018 mit 1.230.041 kWh/a. Es ergibt sich ein Mittel über die betrachteten Jahre von 1.256.661 kWh/m²a. Mit Ausnahme des Jahrs 2017, in welchem das Sanierungsziel um 1,5% knapp überschritten wurde, wurde es in den anderen beiden Jahren unterschritten.
Im Verhältnis zum mittleren Verbrauchswert vor der Sanierung konnte durchschnittlich eine absolute Verbrauchsreduzierung von 25,8% erreicht werden. Bedingt durch die Anbauten mit höheren energetischen Standard sowie der erhöhten Nettogrundfläche fiel die durchschnittliche spezifische Verbrauchsreduzierung auf 119,8 kWh/m²a mit 29,8% sogar noch ein wenig höher aus. Eine Gegenüberstellung des spezifischen Verbrauchswerts mit dem Referenzwert aus der Bekanntmachung zeigt, dass dieser jedoch weiterhin um 8,9% überschritten wird.
Im Vergleich zu den eingangs definierten Sanierungszielen wird deutlich, dass diese sogar um 2,0% unterschritten wurden. Im Falle des Fernwärmeverbrauchs erzielten die Sanierungsmaßnahmen somit die gewünschte Verbrauchsreduktion.
Abschließend ist festzuhalten, dass die Sanierungsziele bisher im Bereich des Stromverbrauchs im Gegensatz zum Fernwärmeverbrauch im Betrieb noch nicht erreicht wurden. Die Ursachen hierfür müssen durch die Analyse der Messwerte untersucht werden. In Bezug auf den Fernwärmeverbrauch ist lediglich zu prüfen, ob weiteres Einsparpotential besteht.

Durch die Sanierung des Scharoun Theaters Wolfsburg konnten insbesondere für den Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser Einsparungen erzielt werden. Zur Einordnung des Energieverbrauchs gegenüber dem weitestgehend unsanierten Gebäudebestand der Theaterspielstätten erfolgte ein Vergleich mit den im Zuge der Querschnittserhebung generierten Daten [siehe 5.3.4.2].
Während der durchschnittliche Stromverbrauch auf endenergetischer Ebene innerhalb der Querschnittserhebung 60,5 kWh/m²a beträgt, fällt der Stromkennwert des Scharoun Theaters Wolfsburg mit 41,6 kWh/m²a deutlich geringer aus. Anhand dessen lässt sich das Scharoun Theater Wolfsburg der Gruppe mit den geringsten Verbrauchskennwerten zuordnen. In dieser Gruppe ebenfalls enthalten sind T06, T10, T12 und T13, wobei T06 den höchsten Verbrauchskennwert dieser Gruppe zeigt und T13 den niedrigsten. Einen nahezu deckungsgleichen Stromverbrauchskennwert weist das Scharoun Theater Wolfsburg derzeit mit T10 auf. Zwischen den Spielstätten T06, T10, T12 und dem Scharoun Theater Wolfsburg sind jedoch keine Gemeinsamkeiten in Hinblick auf die Nettogrundfläche, die Flächenverteilung, die Sitzplatzkapazität, das Baujahr oder die Nutzung festzustellen. Anders verhält es sich mit T13. Da das Scharoun Theater Wolfsburg als Gastspieltheater betrieben wird, findet weitestgehend kein stromintensiver Werkstattbetrieb statt, sodass hier anteilig nur wenig Flächen für Werkstätten vorhanden sind. Ebenso sind die Werkstätten in T13 ausgelagert, sodass auch hier nur eine geringe Fläche für Werkstätten vorhanden ist.
Erfolgt eine Betrachtung des angestrebten Stromkennwerts nach der Sanierung anstelle des bestehenden, so liegt dieser mit 34,5 kWh/m²a unter dem Stromkennwert von T13. Bei Erreichen dieses Zielwerts würde das Scharoun Theater Wolfsburg den niedrigsten spezifischen Stromverbrauch aller betrachteten Spielstätten aufweisen.

In [5.3.4.2] wurde festgestellt, dass die Anschlussleistung der Bühnenbeleuchtung sowie der Lüftungsanlagen den Energieverbrauch maßgeblich beeinflussen und somit als Indikatoren für dessen Höhe herangezogen werden können. Neben der Gruppierung nach Verbrauchskennwerten kann diese auch anhand der Gesamtanschlussleistung für Bühnenbeleuchtung und Lüftungsanlagen erfolgen. Die durchschnittliche Anschlussleistung der Bühnenbeleuchtung während Vorstellungen beträgt im Scharoun Theater Wolfsburg 60 kW, während sich diese für die Lüftung auf 56,8 kW beläuft, sodass sich insgesamt eine Anschlussleistung von 116,8 kW ergibt. Die für Theaterspielstätten mit geringem Stromverbrauch typische Anschlussleistung wird somit deutlich überschritten. Anhand dieser wäre das Scharoun Theater Wolfsburg in die Gruppe 02 mit mittlerem Verbrauch einzuordnen. Die Diskrepanz in diesem Bereich ist jedoch auf den Gastspielbetrieb des Theaters zurückzuführen. Da nicht alle Bereiche des Theaters eine nahezu tägliche Nutzung erfahren, wie es in Repertoirehäusern der Fall ist, weisen auch die Lüftungsanlagen geringere Laufzeiten auf, die einen niedrigeren Stromverbrauch nach sich ziehen. Somit ist für Gastspieltheater, anders als für Repertoiretheater, ein Rückschluss von der Anschlussleistung auf den Stromverbrauch nicht möglich.
Neben dem Bezug des Energieverbrauchs auf die Nettogrundfläche erfolgte dieser außerdem auf die Sitzplatzkapazität der Theaterspielstätten. Der Durchschnitt aus der Querschnittserhebung lag

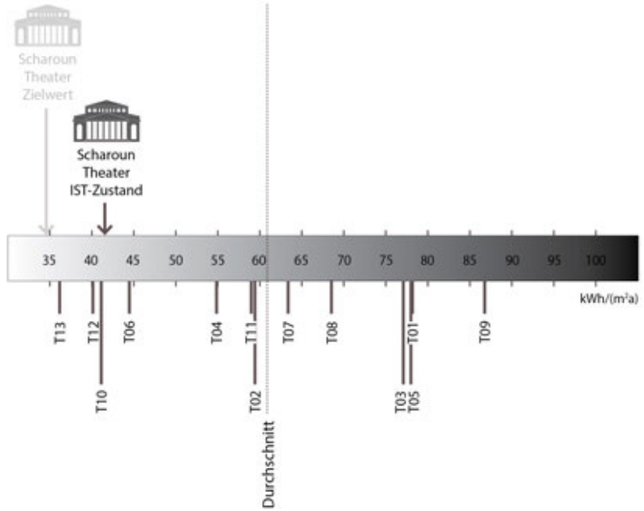

Abb. 352 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum flächenbezogenen Stromverbrauch

hier bei 902 kWh/Sa [siehe 5.3.4.3]. Das Scharoun Theater Wolfsburg unterschreitet diesen Wert mit 524 kWh/Sa und ist somit der Gruppe 01, die einen geringen Verbrauch zeigt, zuzuordnen. Dies steht im Gegensatz zu der Tendenz, dass bei steigender Sitzplatzkapazität auch der Stromverbrauch der Theaterspielstätten steigt, da das Scharoun Theater Wolfsburg mit 833 Sitzplätzen eine vergleichsweise große Kapazität aufweist. Auch dies lässt sich wieder auf den Gastspielbetrieb zurückzuführen, der weniger Nebenflächen erfordert.

Im Vergleich zum Stromverbrauch auf endenergetischer Ebene ist der Verbrauch für Heizung/Warmwasser deutlich höher und wurde innerhalb der Querschnittserhebung durchschnittlich mit 104,6 kWh/m²a ermittelt. Da der Verbrauchskennwert im Scharoun Theater Wolfsburg für Heizung/Warmwasser bei 119,8 kWh/m²a liegt, überschreitet er den Durchschnittswert aus der Querschnittserhebung um 14,5%. Im Vergleich zu den im Zuge der Querschnittserhebung betrachteten Theaterspielstätten weist das Scharoun Theater Wolfsburg trotz Sanierung einen eher hohen Verbrauch auf und muss somit in Gruppe 03 eingeordnet werden. Dieser gehören außerdem T04, T06, T08 und T10 an. Auch zwischen diesen Theaterspielstätten und dem Scharoun Theater Wolfsburg können keine Gemeinsamkeiten in Bezug auf die bereits beim Stromverbrauch untersuchten Parameter festgestellt werden.

Ordnet man den Verbrauch des Scharoun Theaters für Heizung und Warmwasser vor Durchführung der Sanierung in das Benchmarking ein, so ist dieser sogar höher als der derzeit höchste Verbrauchskennwert von 156,2 kWh/m²a, der T01 zuzuordnen ist. Zwischen

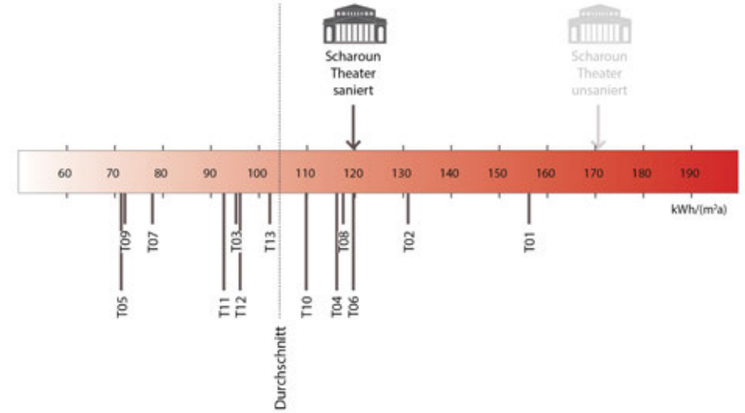

Abb. 354 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum flächenbezogenen Verbrauch für Heizung/Warmwasser

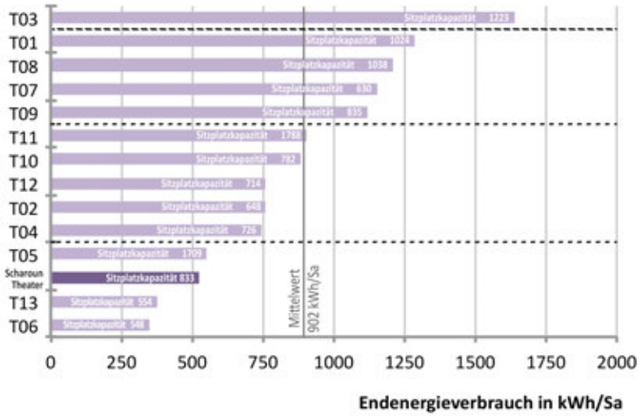

Abb. 353 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum sitzplatzbezogenen Stromverbrauch

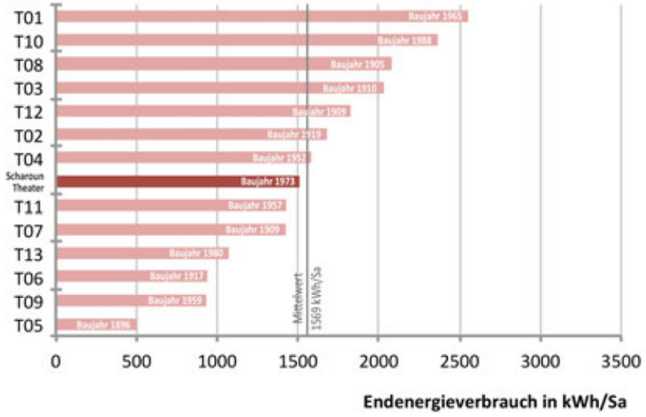

Abb. 355 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum sitzplatzbezogenen Verbrauch für Heizung/Warmwasser

T01 und dem Scharoun Theater Wolfsburg bestehen mehrere Ähnlichkeiten, die sich sowohl auf das Baujahr als auch auf die Konstruktionsweise beziehen. Die Nachkriegsbauten sind beide in Stahlbeton ausgeführt und verfügen über große Verglasungsflächen, die im Original hohe U-Werte aufweisen und somit zur geringen energetischen Qualität der Gebäudehülle beitragen. Im Falle des Scharoun Theaters Wolfsburg leistet auch die geringe Kompaktheit des Gebäudes einen Beitrag zum hohen Verbrauch für Heizung und Warmwasser.

Wie bereits beim Stromverbrauch wurde auch für den Verbrauch Heizung und Warmwasser ein sitzplatzbezogener Kennwert ermittelt. Dieser beträgt für die Querschnittserhebung durchschnittlich 1569 kWh/Sa. Somit liegt der Verbrauch des Scharoun Theaters Wolfsburg mit 1509 kWh/Sa knapp unter dem Durchschnittswert. Im Verhältnis zu T01, welche bei Bezug des Energieverbrauchs auf die Nettogrundfläche mit dem Scharoun Theater Wolfsburg vergleichbar ist, zeigt sich hier ein deutlich geringerer Kennwert. Auch dies lässt sich erneut auf den geringen Anteil an Nebenflächen im Verhältnis zu der Sitzplatzkapazität aufgrund der Nutzung als Gastspieltheater zurückführen.

Neben der Einzelbetrachtung der Verbräuche für Strom und Heizung/Warmwasser erfolgt auch eine zusammenfassende Bewertung der beiden Verbräuche. Durchschnittlich beträgt der Gesamtendenergieverbrauch aus der Querschnittserhebung 165,1 kWh/m²a. Somit liegt der Gesamtendenergieverbrauch des Scharoun Theaters Wolfsburg mit 161,4 kWh/m²a knapp unter diesem Durchschnittswert und ist im Mittelfeld der

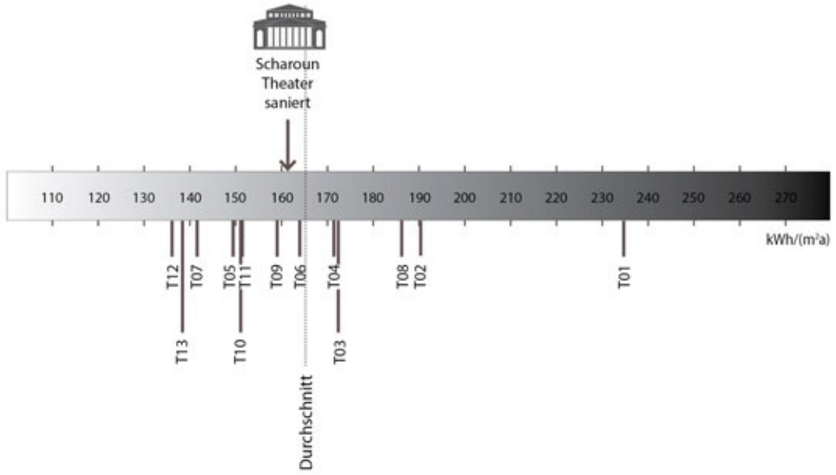

Abb. 356 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum Gesamtendenergieverbrauch

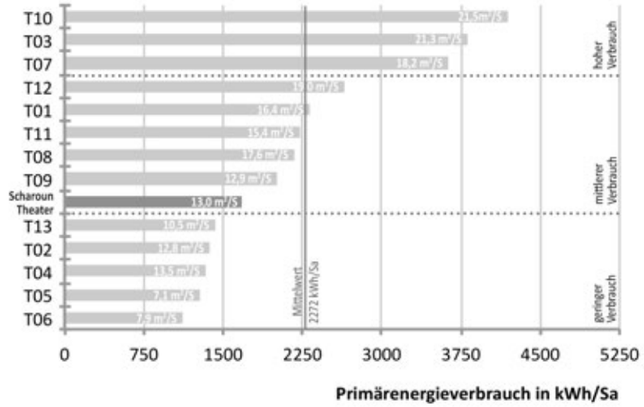

Abb. 357 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum sitzplatzbezogenen Primärenergieverbrauch

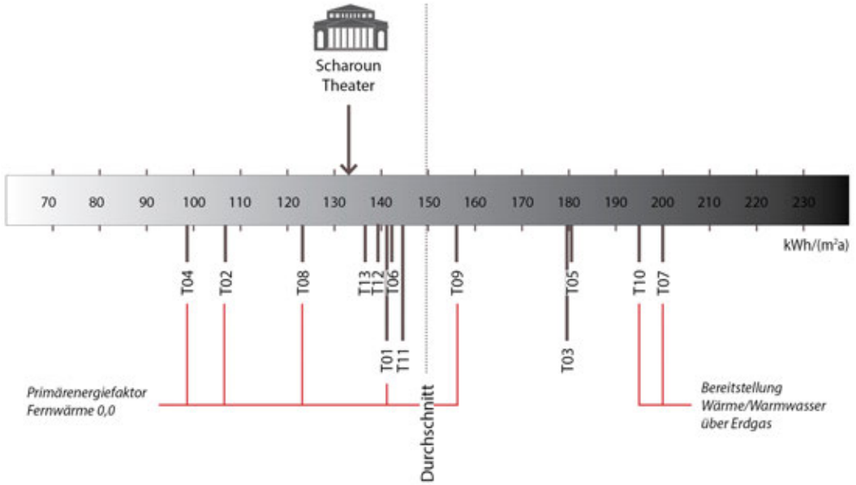

Abb. 358 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum flächenbezogenen Primärenergieverbrauch

Theaterspielstätten einzuordnen. Dennoch fällt der Verbrauchskennwert in Gruppe 03, die mit einem hohen Verbrauch kategorisiert ist. Ursächlich für den eher hohen Verbrauchskennwert ist nicht der Stromverbrauch, da dieser gegenüber den anderen betrachteten Theaterspielstätten eher gering ist, sondern der hohe Verbrauch für Heizung und Warmwasser.

Anhand der Endenergieverbrauchsanteile für Strom sowie Heizung und Warmwasser lässt sich der Primärenergieverbrauch der Theaterspielstätten bestimmen und ebenfalls in Form eines Benchmarkings einordnen. Der durchschnittliche Primärenergieverbrauch der betrachteten Theaterspielstätten liegt bei 149,6 kWh/m²a. Das Scharoun Theater Wolfsburg zeigt einen unterdurchschnittlichen Primärenergieverbrauch von 133,0 kWh/m²a, der eine Zuordnung zur Gruppe 02 mit einem mittleren Verbrauch ermöglicht. In dieser Gruppe befinden sich Theaterspielstätten, die entweder eine Fernwärmeversorgung mit einem Primärenergiefaktor unter 0,7 aufweisen oder eine regenerative Fernwärmeversorgung in Kombination mit einem hohen Stromverbrauch zeigen. Auf das Scharoun Theater Wolfsburg trifft ersteres zu, da neben dem geringen Stromverbrauch eine Fernwärmeversorgung mit einem Primärenergiefaktor von 0,485 erfolgt. Da lediglich T02, T04 und T08 einen geringeren Primärenergieverbrauch aufweisen, weil sie mit Fernwärme aus einer vollständig regenerativen Erzeugung versorgt werden, befindet sich das Scharoun Theater Wolfsburg hier im unteren Verbrauchsdrittel.

Findet hier eine sitzplatzkapazitätsbezogene Betrachtung statt, so zeigt sich ein Mittelwert über die Querschnittserhebung von 2272 kWh/Sa. Wie auch bei der flächenbezogenen Betrachtung unterschreitet das Scharoun Theater Wolfsburg diesen mit 1675 kWh/Sa und kann der mittleren Verbrauchsgruppe zugeordnet werden. In [5.3.4.3] wurde festgestellt, dass anhand der Fläche pro Sitzplatz Rückschlüsse auf den Primärenergieverbrauch gezogen werden können. Mit 13 m²/S ist das Scharoun Theater auch auf Basis dieses Werts übereinstimmend mit der Kategorisierung des Primärenergieverbrauchs Gruppe 02 zuzuordnen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die Sanierung eine Verringerung der spezifischen Verbräuche, sowohl für Strom als auch für Heizung und Warmwasser stattgefunden hat. Während der Stromverbrauch im Verhältnis zum Benchmarking bereits einen sehr geringen Wert aufwies und nach der Sanierung nun neben T13 den geringsten Verbrauch zeigt, war der Verbrauch für Heizung und Warmwasser sehr hoch. Durch die Sanierung konnte hier jedoch erreicht werden, dass sich das Scharoun Theater Wolfsburg nun mehr in Richtung des mittleren Verbrauchs eingeordnet werden kann.

11.3 Auswertung der Berechnungen mit TEK Tool

11.3.1 Struktur des Energiebedarfs nach Zonen und Verbraucher

Die Eingabe in TEK-Tool bietet neben den Messungen eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung und Analyse der Struktur des Energiebedarfs im Scharoun Theater Wolfsburg. Anhand der Nutzungen sowie der Raumkonditionierung wurde das Gebäude in 46 Zonen unterteilt, welche differenziert in das Programm eingegeben wurden. Zur Abbildung der technischen Gebäudeausrüstung erfolgte außerdem die Eingabe der 18 RLT-Anlagen, der 6 Kälte- sowie der 2 Wärmeerzeuger.

Nach Abschluss der Eingabe zeigte sich, dass ein Anteil von 54% der beheizten Nettogrundfläche mechanisch belüftet wird, während 38% gekühlt und 19% befeuchtet werden.

Da die Eingabe des Gebäudes auf tatsächlichen Nutzungsparametern beruhte, konnte der Energiebedarf für einzelnen Verbraucher und Zonen realitätsnah ermittelt werden. Der Energiebedarf teilt sich auf zehn mögliche Verbraucher aus den Bereichen Raumkonditionierung, Beleuchtung und weitere Technik auf, die Bedarfe für Fernwärme oder elektrische Energie aufweisen. Ein Abgleich der berechneten Werte mit den tatsächlichen Verbrauchsdaten aus den letzten Jahren hat gezeigt, dass für die Fernwärme eine Übereinstimmung von 94% besteht, während sie für die elektrische Energie bei 88% liegt. Aufgrund der geringen Abweichung kann davon ausgegangen werden, dass die Berechnung eine realitätsnahe Abbildung der Verbrauchsstruktur zeigt.

Der berechnete Endenergiebedarf in Höhe von 156,6 kWh/m²a teilt sich auf in einen Bedarf von 124,0 kWh/m²a für Fernwärme und 32,6 kWh/m²a für elektrische Energie. Somit überwiegt der Anteil an Fernwärme von 79,2% gegenüber dem Anteil an elektrischer Energie mit 20,8% deutlich.

Betrachtet man die beiden Bedarfswerte genauer, so setzt sich der Fernwärmebedarf aus einem Anteil für Warmwasser, Heizung und Dampferzeugung zusammen. Für Warmwasser, das nur im Duschbereich der Künstler zentral über Fernwärme bereitgestellt wird, fällt nur ein sehr geringer Bedarf von 0,3 kWh/m²a an. Ein weitaus höherer Bedarf mit 10 kWh/m²a resultiert aus der Dampferzeugung, die zur Befeuchtung der Zuluft, die über die Hauptlüftungsanlage dem Zuschauerraum zugeführt wird, notwendig ist. Die Heizung fällt mit 113,4 kWh/m²a am stärksten ins Gewicht.

Im Gegensatz zur Fernwärme setzt sich der Bedarf an elektrischer Energie differenzierter zusammen. Die „Diverse Technik“, unter welcher Hilfsenergien, Aufzüge und sonstige elektrische Großverbraucher zusammengefasst sind, verursacht einen Bedarf von 3,1 kWh/m²a. In einer ähnlichen Größenordnung liegt der Bedarf der „Zentralen Dienste“ mit 3,4 kWh/m²a. Diese umfassen zentrale EDV-Anlagen, Schwachstromanlagen und zentrale Küchen. Einen sehr geringen Anteil haben mit 0,4 kWh/m²a die Arbeitshilfen, ebenso die Heizung mit 0,1 kWh/m²a und Warmwasser mit 0,2 kWh/m²a. Für die Bereitstellung

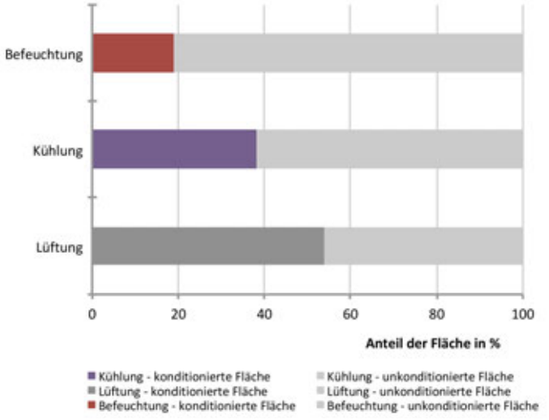

Abb. 359 Anteil der konditionierten Fläche in Bezug auf die Nettogrundfläche

von Kälte müssen Hilfsenergien aufgewendet werden. Diese zeigen einen Bedarf von 1,4 kWh/m²a. Dieser ist bei der Kälte selber mit 2,5 kWh/m²a etwa doppelt so hoch. Den größten Anteil am Strombedarf zeigt jedoch die Lüftungsanlage mit 14,6 kWh/m²a, gefolgt von der Beleuchtung mit 6,9 kWh/m²a.

Auf Basis der Endenergie kann die Primärenergie berechnet werden, die zur Deckung des Energiebedarfs des Gebäudes notwendig ist. Zur Umrechnung in TEK-Tool werden nicht die durch den Energieversorger angegebenen Primärenergiefaktoren zu Grunde gelegt, sondern die Faktoren, die in der DIN EN 18599 Teil 01 angegeben sind. Für Fernwärme, die über Kraft-Wärme-Kopplung mit fossilen Brennstoffen erzeugt wird, ist ein Primärfaktor von 0,7 angegeben. Der für Strom angewendete Primärenergiefaktor von 1,8 bezieht sich auf den allgemeinen Strommix. Der mit den Faktoren berechnete Primärenergiebedarf für das Scharoun Theater Wolfsburg beläuft sich auf 145,4 kWh/m²a. Durch den Bezug der Fernwärme entsteht ein Bedarf von 86,8 kWh/m²a und durch die Nutzung elektrischer Energie ein weiterer Bedarf von 40,4 kWh/m²a. Im Vergleich zur endenergetischen Betrachtung, bei der das Verhältnis von Fernwärme- zu Strombedarf Dreiviertel zu einem Viertel betrug, ist diese mit einem Anteil von 59,6% für Fernwärme und 40,4% für Strom ausgeglichener. Aus umwelttechnischer Sicht fallen trotz des höheren Endenergiebedarfs für Fernwärme beide Verbraucher ähnlich stark ins Gewicht. Es wäre somit erstrebenswert, besonders den Bedarf an elektrischer Energie zu reduzieren.

Neben dem Ressourcenbedarf, der durch die Primärenergie ausgedrückt wird, kann auch die Belastung der Umwelt durch den Ausstoß von Treibhausgasemissionen über Faktoren berechnet werden. Die auf diese Weise ermittelten gesamten

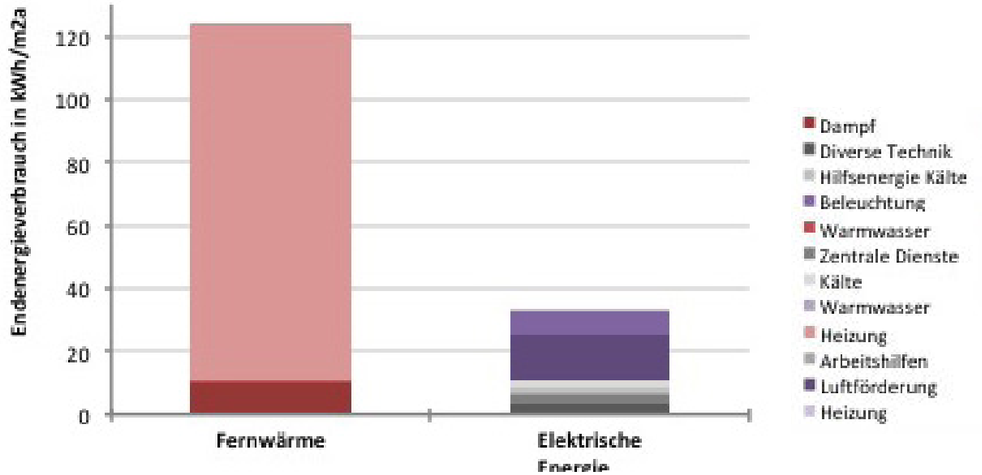

Abb. 360 Zusammensetzung der Bedarfsanteile

CO_2-Emissionen für das Scharoun Theater Wolfsburg betragen 50,6 kg/(m²a). Hierbei wurde für die Fernwärme ein Umrechnungsfaktor von 219 g/kWh angesetzt, während er für Strom bei 633 g/kWh liegt. Anhand des Umrechnungsfaktors wird sichtbar, dass sich die Erzeugung von elektrischer Energie ebenfalls besonders negativ auf die Umwelt auswirkt.

Um einen Überblick darüber zu erhalten, an welchen Stellen im Theater der Endenergiebedarf anfällt, erfolgt eine weitere Aufschlüsselung in Zonen. Diese zeigt, dass der größte Bedarf mit einem Anteil von 21,4% in der Zone „11_Theatersaal“ entsteht. Kaum geringer ist dieser mit 20,9% bei Zone „09_Foyer“ und auch „01_Lager/Technik“ hat mit 15,9% noch einen großen Anteil. Außer bei Zone „04_Verkehrsfläche“ sind alle neun weiteren Zonen mit weniger als 6% am Bedarf beteiligt. Bei der vorangegangenen Betrachtung wurde zwar der Anteil am Endenergiebedarf betrachtet, nicht jedoch die Fläche, welche die jeweilige Zone einnimmt. Erfolgt die Gegenüberstellung des Flächenanteils der Zone an der Nettogrundfläche mit dem Anteil am Endenergiebedarf, die einen Hinweis auf das Verhältnis der Höhe des Energiebedarfs gegenüber des Durchschnitts geben kann, so zeigt sich bei den Zonen „01_Lager/Technik“ und „04_Verkehrsfläche“ ein deutlich höherer Flächenanteil gegenüber des Endenergiebedarfsanteils. Bei „01_Lager/Technik“ ist dieser mit 35,1% etwa doppelt so hoch wie der Anteil am Endenergiebedarf in Höhe von 15,9%. Auch bei Zone „04_Verkehrsfläche“ steht dem Flächenanteil von 18,3% lediglich ein Endenergiebedarfsanteil von 12,0% gegenüber. Genau andersherum verhält es sich in den Zonen „09_Foyer“ und Zone „11_Theatersaal“. Dort fällt der Anteil am Endenergiebedarf gegenüber dem Anteil an der Nettogrundfläche deutlich höher aus. Sichtbar wird dies, da Zone „09_Foyer“ einen Flächenanteil von

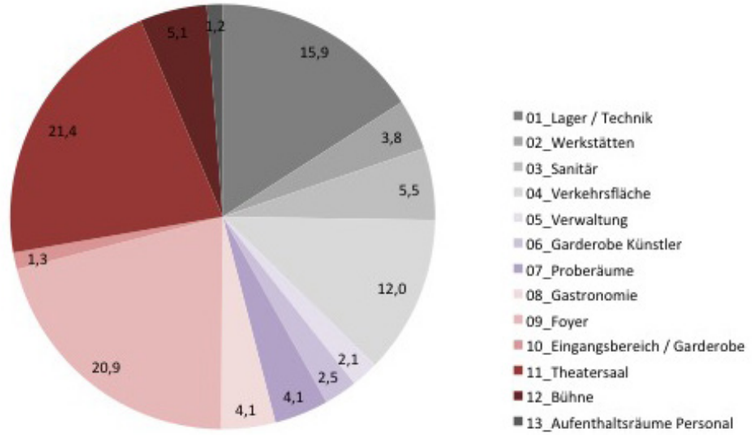

Abb. 361 Anteil der Zonen am Endenergiebedarf

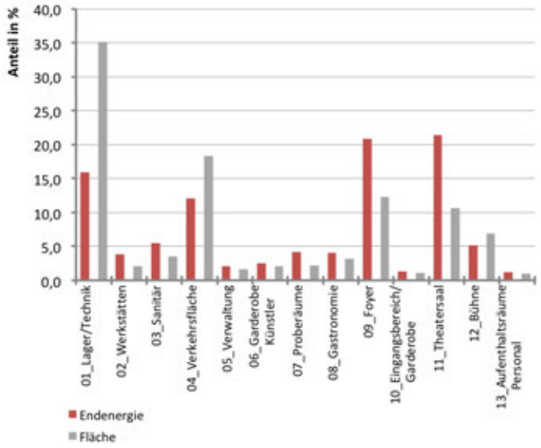

Abb. 362 Anteile der Zonen am Endenergiebedarf gegenüber des Anteils an der beheizten Nettogrundfläche

12,3% besitzt, während der Anteil am Endenergiebedarf bei 20,9% liegt. Gleiches gilt für Zone „11_Theatersaal“ bei der die Fläche mit 10,6% nur etwa halb so stark vertreten ist wie der Anteil am Endenergiebedarf mit 21,4%. Der Grund für diese starke Verschiebung des anfallenden Endenergiebedarfs im Verhältnis zur Fläche ist sowohl das Nutzungsprofil als auch die stärker ausgeprägte Klimatisierung dieser Bereiche.
Die Analyse des Bedarfs der einzelnen Zonen wurde weiter vertieft, indem die größten Verbraucher Heizung, Beleuchtung, Luftförderung, Kälte und Dampf separat nach Zonen aufgeschlüsselt wurden. Dies ermöglicht Aussagen darüber, an welchen Stellen der Bedarf besonders hoch ausfällt und wo sich möglicherweise Einsparpotentiale verbergen.
Für die Beheizung wird der größte Anteil mit 24,2% durch das Foyer verursacht. Dies lässt sich sowohl auf die großen Glasflächen zurückführen, durch die hohe Transmissionswärmeverluste entstehen, als auch auf die hohen Lüftungswärmeverluste. Dennoch verzeichnet nicht das Foyer den höchsten spezifischen Bedarf, sondern Zone „07_Proberäume“ mit 270,2 kWh/m²a. Sie fällt aufgrund ihres geringen Flächenanteils in der Gesamtbilanz jedoch nicht so stark ins Gewicht. Ebenfalls einen großen Anteil am Bedarf haben die Zonen 01_Lager/Technik“ und „04_Verkehrsfläche“. Der spezifische Bedarf dieser Zonen, besonders bei „04_Verkehrsfläche“ mit 12,1 kWh/m²a, ist allerdings besonders gering. In beiden Zonen wird gegenüber dem restlichen Gebäude eine geringere mittlere Raumtemperatur im Heizfall gefordert. Der große Anteil am Gesamtenergiebedarf für die Heizung lässt sich daher durch die große Fläche erklären. Auffällig ist, dass Zone „11_Theatersaal“ trotz des hohen Anteils am Endenergiebedarf nur mit 10,0% am Bedarf für die Beheizung vertreten ist. Der Grund hierfür liegt in den hohen internen Lasten, die durch die Zuschauer während der Nutzung eingebracht werden und die Heizlast reduzieren.
Einen weitaus größeren Anteil mit 50,9% besitzt Zone „11_Theatersaal“am Bedarf für Beleuchtung. Ursächlich hierfür ist die hohe szenische Beleuchtungsleistung während der Vorstellungen. Auch bezogen auf die Fläche zeigt sich im Theatersaal der höchste spezifische Bedarf von 23,8 kWh/m²a. Obwohl Zone „04_Verkehrsfläche“ mit einem Anteil von 16,2% noch stark vertreten ist, hat sie mit 1,1 kWh/m²a einen sehr geringen spezifischen Beleuchtungsbedarf. Auch hier ist der hohe Anteil am Endenergiebedarf über die große Gebäudefläche zu erklären.
Außer in dem Bedarf für die Beleuchtung begründet sich der hohe Anteil am Endenergiebedarf der Zone „11_Theatersaal“ durch die Luftförderung. Der spezifische Bedarf von 62,0 kWh/m²a schlägt sich in einem Anteil von 45,0% am Endenergiebedarf für die Luftförderung nieder. Ursächlich sind die Laufzeiten sowie die Dimensionierung der Lüftungsanlagen, die innerhalb der Vorstellungszeiten ein großes Luftvolumen transportieren müssen. Ein ebenfalls großer Anteil mit 24,4% entfällt auf das Foyer, das ein ähnliches Nutzungsschema wie der Theatersaal aufweist. Besonders auffällig ist jedoch der mit 13,0% große Anteil der Zone „03_Sanitär“ an der Luftförderung, der sich auch aus dem höchsten spezifischen Bedarf von 75,5 kWh/m²a ableiten lässt. Die Belüftung der Sanitärbereiche funktioniert ausschließlich mechanisch und ist während der gesamten Gebäudenutzung aktiv. Da nur etwa die Hälfte der Gebäudefläche mechanisch belüftet wird, fällt nicht für alle Zonen ein Endenergiebedarf für die Luftförderung an.
Ebenso wie die Luftförderung erfolgt auch die Kühlung nicht in allen Bereichen des Theaters. Mit einem Anteil von 51,2% entsteht der größte Bedarf im Theatersaal während der warmen Monate. Auch erwähnt werden muss der Anteil am Endenergiebedarf für Kälte der Zone „01_Lager/Technik“, der mit 29,6% ebenfalls hoch ausfällt. Dieser wird durch die Kühlung der EDV und einiger gebäudetechnischer Anlagen verursacht, die zwar hohe Wärmelasten produzieren und gleichzeitig bei hohen Raumlufttemperaturen Funktionsbeeinträchtigungen zeigen, sodass die Wärme mechanisch abgeführt werden muss. In diesem Bereich liegt der spezifische Kältebedarf bei 38,4 kWh/m²a und ist somit sogar höher als im Theatersaal mit 11,9 kWh/m²a.
Für die Dampferzeugung entsteht nur in den drei Zonen ein Bedarf, die durch die Hauptlüftungsanlage des Zuschauersaals versorgt werden. Überwiegend wird der erzeugte Dampf für die Befeuchtung der Zuluft im Theatersaal aufgewendet, sodass ein Bedarf von 92,5 kWh/m²a entsteht.
Nach eingehender Betrachtung der Zusammensetzung des Endenergiebedarfs kann er über die TEK-Bewertung eingeordnet werden. Hierzu werden die berechneten Bedarfswerte des eingegebenen Gebäudes TEK-Vergleichskennwerten gegenübergestellt. Diese wurden ermittelt, indem für Nutzungen gemäß DIN V 18599 Teil 10 Referenzwerte für Räume mit typischen Ausprägungen berechnet wurden. Die ermittelten Werte bilden die Grundlage für die Klassifizierung

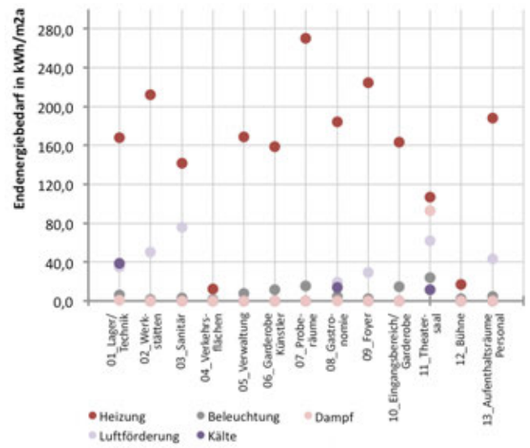

Abb. 364 Spezifischer Endenergiebedarf der einzelnen Zonen bezogen auf die größten Verbraucher

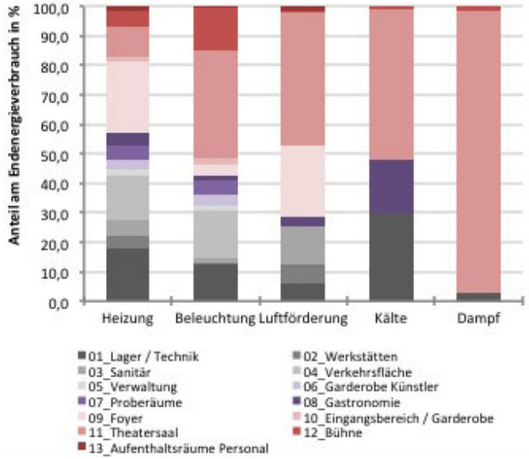

Abb. 363 Anteil der Zonen am Endenergiebedarf der größten Verbraucher

des Energiebedarfs in fünf Energieaufwandsklassen von „sehr gering“ bis „sehr hoch“. Auf Basis dieses Vergleichs wurde der Gesamtendenergiebedarf des Scharoun Theaters Wolfsburg als „gering“ eingeordnet. Es kann jedoch nicht nur der gesamte Endenergiebedarf klassifiziert werden, sondern auch hier ist eine einzelne Bewertung der Gewerke, ohne Berücksichtigung der übergeordnet anfallenden Bedarfe für „Diverse Technik“ und „Zentrale Dienste“, möglich. Betrachtet man diese, so ergibt sich eine Einordnung des Energiebedarfs für Warmwasser, Hilfsenergie Kälte und Arbeitshilfen als „sehr gering“. Als „gering“ wird der Bedarf für Dampferzeugung, Heizung und Kälte eingestuft, obwohl der Bedarf einzelner Zonen durchaus als „sehr hoch“ bewertet wird. Einsparpotentiale werden auf Basis der TEK-Bewertung in Zone „05_Verwaltung“ und in Teilen von Zone „04_Verkehrsfläche“ vermutet, deren Energiebedarf als „hoch“ bewertet wurde. Im Bereich der Beleuchtung, die insgesamt als „mittel“ klassifiziert wurde, zeigen sich vor allem im Foyerbereich und im Zuschauersaal Bedarfswerte, die als „hoch“ bis „sehr hoch“ eingestuft werden. Da sie durch die szenische und atmosphärische Beleuchtung zustande kommen, die teilweise auch aus denkmalpflegerischen Gesichtspunkten erhaltenswert sind, besteht hier kaum eine Einsparungsmöglichkeit. Als insgesamt „hoch“ wird der Bedarf für Luftförderung bewertet. Für die Luftförderung werden besonders die Sanitär-, Zuschauer- und Bühnenbereiche als kritisch eingeschätzt.[25],[33],[34],[58]

Literatur:
[25] Deutscher Bundestag (2017)
[33] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2011a)
[34] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2011b)
[58] Hörner, M., Knissel, J. (2015)

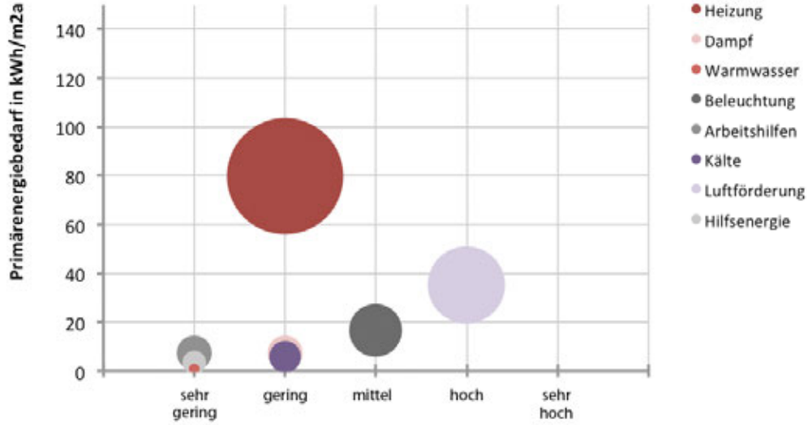

Abb. 365 TEK-Bewertung der einzelnen Verbraucher

11.3.2 Einordnung der berechneten Werte in die Querschnittserhebung

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Ergebnisse der TEK-Tool Berechnungen für das Scharoun Theater Wolfsburg beschrieben worden sind, werden diese nun den Resultaten aus der Querschnittserhebung [siehe 5.4.1] gegenübergestellt. Ein Vergleich erfolgt zum einen hinsichtlich des Bedarfs, aufgegliedert nach Verbrauchern, und zum anderen nach Nutzungsbereichen.
Bei der Betrachtung der Ergebnisse unter Berücksichtigung der Verbraucher erfolgte bei den TEK-Tool Berechnungen eine weitere Aufteilung nach Brennstoffen und elektrischer Energie. Mit Hilfe von Brennstoffen können die Verbraucher Zentrale Dienste, Dampf, Kälte, Warmwasser und Heizung betrieben werden. Bei Auswertung der Ergebnisse aus der Querschnittserhebung wurde festgestellt, dass die Heizung im Durchschnitt mit 93,2% den größten Anteil am Gesamtbedarf für Brennstoffe verursacht. Der anteilige Bedarf des Scharoun Theaters fällt mit 91,5% etwas geringer aus und liegt damit nicht nur unter dem Durchschnittswert, sondern ist auch gegenüber den Anteilen der meisten Spielstätten niedriger. Der verhältnismäßig geringe Verbrauchsanteil für die Heizung lässt sich darauf zurückführen, dass beim Brennstoffbedarf im Scharoun Theater Wolfsburg, aufgrund der Möglichkeit zur Befeuchtung der Zuluft über den Fernwärmeanschluss, ein Anteil von 8,2% zur Dampferzeugung berücksichtigt wird. Die Analyse hat gezeigt, dass nur wenige der im Rahmen der Querschnittserhebung untersuchten Spielstätten über eine solche Funktion verfügen, sodass sich hier im Mittel lediglich ein Anteil von 0,8% ergibt. Nicht nur diesem Wert gegenüber, der alle Spielstätten einschließt, weist das Scharoun Theater Wolfsburg einen um das 10-fache höheren Wert auf, sondern auch im Verhältnis zu den Spielstätten, die ebenfalls einen Anteil an Dampf aufweisen, ist dieser etwa doppelt so hoch. Innerhalb der Querschnittserhebung war neben der Heizung die Warmwasserbereitstellung mit 4,2% den nächstgrößten Anteil. Mit nur 0,2% ist der Anteil im Scharoun Theater deutlich geringer, da im Zuge der Sanierung eine Umstellung der bisher in Theaterspielstätten üblichen zentralen Warmwassererzeugung auf eine dezentrale elektrische Erzeugung erfolgte. Der verbleibende Anteil entsteht für die weiterhin zentrale Warmwasserversorgung der Künstlerduschen. Aufgrund von Sonderlösungen in einzelnen Spielstätten weisen die Durchschnittswerte auch Anteile für Zentrale Dienste und Kälte auf. Solche bestehen im Scharoun Theater Wolfsburg nicht.
Im Gegensatz zum Brennstoffbedarf, der sich nur auf wenige Verbraucher aufgliedert, ist eine differenziertere Aufteilung der Verbrauchsanteile bei der elektrischen Energie vorhanden. Bei der Querschnittserhebung wurde der größte Verbrauchsanteil mit durchschnittlich 31,8% für die Beleuchtung festgestellt, da neben der szenischen Beleuchtung im Zuschauersaal, die hohe Bedarfswerte erzeugt, auch die anderen Bereiche der Theaterspielstätte fast täglich über längere Zeiträume hinweg frequentiert sind. Deutlich geringer ist dieser Wert mit 21,2% im Scharoun Theater. Anders als in den meisten Theatern der Querschnittserhebung wird das Scharoun Theater nicht im Repertoirebetrieb geführt, was sich auf die Nutzung der angegliederten Funktionsflächen auswirkt, da sie nicht täglich verwendet werden. Somit entsteht dort kein konstanter Bedarf für die Beleuchtung. Weiterhin entsteht ein großer Bedarfsanteil für die Luftförderung, der bei der Querschnittserhebung im Mittel bei 22,0 % lag. Hier zeigt das Scharoun Theater Wolfsburg mit 44,8% einen doppelt so hohen Bedarfsanteil, der auf die große Anzahl der Lüftungsanlagen und den hohen Anteil an belüfteten Bereichen zurückzuführen ist. Erfolgt eine Betrachtung der einzelnen Anteile für die Luftförderung, die innerhalb der Querschnittserhebung in den verschiedenen Theaterspielstätten berechnet wurden, so zeigen sich hier ebenfalls große Unterschiede, da sich die Anteile zwischen 1,8% und 58,7% bewegen. Dies verdeutlicht, dass die Belüftung in den Häusern sehr unterschiedlich gehandhabt wird. Vergleichbar

ist der Anteil des Bedarfs für Kälte und den hierfür benötigten Hilfsenergien. Während er bei der Querschnittserhebung im Mittel bei 11,7% liegt, beträgt er im Scharoun Theater Wolfsburg 12,0%. Wie in den meisten Theaterspielstätten erfolgt auch im Scharoun Theater lediglich eine Klimatisierung der Server- und Technikräume, die temperatursensible Anlagen beinhalten, sowie des Zuschauersaals. Weitere Anteile für die elektrische Energie fallen im Durchschnitt der Querschnittserhebung für Warmwasser, Heizung und Dampf an. Dampf zur Befeuchtung der Zuluft kann über Brennstoffe oder elektrisch erzeugt werden. Da wie oben bereits beschrieben, nur wenige Spielstätten überhaupt über die Möglichkeit zur Zuluftbefeuchtung verfügen und sich diese auch noch auf die beiden Erzeugungsvarianten aufteilen, ist der durchschnittliche Bedarfsanteil mit 1,6% dementsprechend niedrig. Für das Scharoun Theater Wolfsburg fällt in diesem Bereich gar kein Anteil an, da hier die Dampferzeugung ausschließlich über Brennstoffe erfolgt. Für die Heizung ist der Anteil mit 0,2% aus der Querschnittserhebung mit dem Anteil in Höhe von 0,3% im Scharoun Theater Wolfsburg vergleichbar, genauso wie der Bedarfsanteil für Warmwasser. Dieser beträgt für die Querschnittserhebung im Mittel 0,7% während er für das Scharoun Theater Wolfsburg mit 0,6% ermittelt wurde. In den meisten Theaterspielstätten, die im Zuge der Querschnittserhebung untersucht wurden, fällt im Bereich der elektrischen Energie kein Anteil für die Warmwasserbereitung an. Im Scharoun Theater Wolfsburg ist er trotz der fast vollständigen Umstellung auf eine dezentrale elektrische Erzeugung gering. Dies lässt sich möglicherweise darauf zurückführen, dass der gesamte Warmwasserbedarf gegenüber anderen Theaterspielstätten reduziert ist, da aufgrund des Betreibens als Gastspieltheater kein täglicher Probebetrieb stattfindet und somit insgesamt eine geringere Frequentierung des Hauses und vor

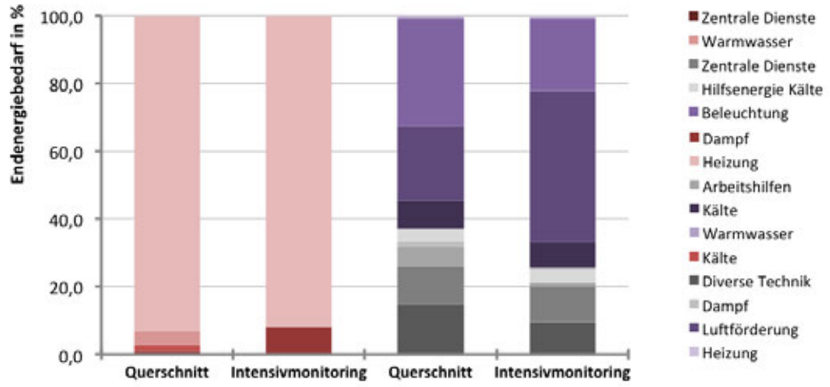

Abb. 366 Anteil der Verbraucher nach Energieträger

allem der Umkleiden vorliegt. Neben den bisher beschriebenen Verbrauchern, deren berechnete Bedarfsanteile sich vor allem auf die Aufnahme der technischen Daten und Anlagenlaufzeiten im Rahmen der TEK-Toolbegehungen stützt [siehe 4.2.2], wurden für die Punkte Diverse Technik, Zentrale Dienste und Arbeitshilfen teilweise Pauschalwerte zu Grunde gelegt. Für Diverse Technik und Zentrale Dienste zeigt das Scharoun Theater einen Bedarfsanteil von 19,9% der leicht unter dem Durchschnittswert in Höhe von 25,9% liegt. Auch dies lässt sich über die Nutzung im Gastspielbetrieb erklären. In den Repertoirebetrieben wurden zahlreiche sonstige elektrische Großverbraucher aufgenommen, zu denen auch Kühlschränke in den Aufenthaltsräumen und den Künstlergarderoben gehören sowie die Waschmaschinen und Trockner in den Wäschereien, die täglich über mehrere Stunden betrieben werden, um die Kostüme für die Vorstellungen vorzubereiten. Darüber hinaus zeigen die Kantinen regelmäßige und lange Öffnungszeiten, bei denen zahlreiche Mahlzeiten zubereitet werden. Diese Einrichtungen sind in Gastspielbetrieben nur eingeschränkt vorhanden. Ebenfalls einen geringeren Bedarfsanteil weist das Scharoun Theater mit lediglich 1,2% gegenüber 6,0% für Arbeitshilfen auf, was ebenfalls auf den Gastspielbetrieb zurückzuführen ist. Besonders energieintensive Arbeitshilfen werden in den Werkstätten benötigt. Da das Scharoun Theater aber nur über geringe Werkstattflächen verfügt und diese auch nur temporär genutzt werden, fällt in diesem Bereich nur ein verhältnismäßig geringer Bedarf an.
Bisher erfolgte die Betrachtung der berechneten Werte ausschließlich prozentual, sodass im Folgenden auch spezifische Werte gegenübergestellt werden. Für Brennstoffe besteht im Scharoun Theater Wolfsburg im Vergleich zur Querschnittserhebung insgesamt ein höherer spezifischer Bedarf, der besonders auf die

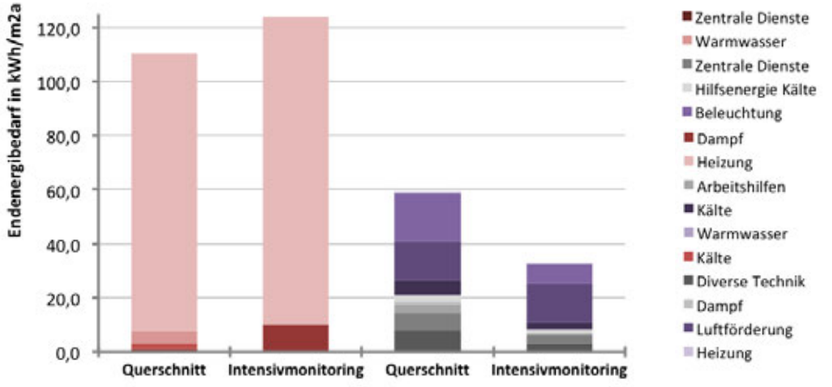

Abb. 367 Spezifischer Bedarf der einzelnen Verbraucher nach Energieträger

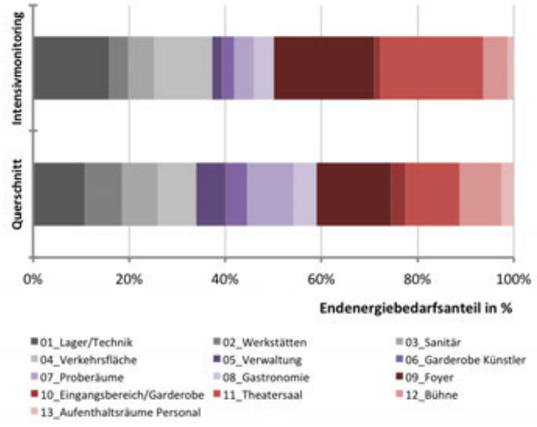

Abb. 368 Prozentualer Endenergiebedarf der einzelnen Zonen

Dampferzeugung sowie die Heizung zurückzuführen ist. Diese beträgt 10,2 kWh/m²a während für die Querschnittserhebung durchschnittlich nur 0,9 kWh/m²a anfallen. Berücksichtigt man hier außerdem den elektrischen Bedarf für die Dampferzeugung, der nur bei der Querschnittserhebung in Höhe von 1,1 kWh/m²a vorhanden ist, so beträgt der gesamte Bedarf für die Dampferzeugung 2,0 kWh/m²a und ist immer noch um 8,2 kWh/m²a geringer als beim Intensivmonitoring. Die Warmwassererzeugung erfolgt bei der Querschnittserhebung überwiegend über Brennstoffe, während im Scharoun Theater Wolfsburg auf eine dezentrale elektrische Erzeugung umgestellt wurde. Daher müssen auch hier die Bedarfe gemeinsam betrachtet werden. Der spezifische Warmwasserbedarf, der für die Nutzung von Brennstoffen entsteht, liegt für die Querschnittserhebung bei 4,7 kWh/m²a. Zusätzlich werden durchschnittlich 0,2 kWh/m²a durch die elektrische Erzeugung hervorgerufen, sodass sich der Gesamtbedarf auf 4,9 kWh/m²a erhöht. Demgegenüber steht ein Warmwasserbedarf des Scharoun Theaters von insgesamt lediglich 0,9 kWh/m²a, der sich zu einem Drittel auf die Erzeugung durch Brennstoffe und zu zwei Drittel auf die elektrische Erzeugung aufteilt. Mögliche Gründe für den geringeren Bedarf wurden bereits bei Betrachtung der prozentualen Verbrauchsanteile erläutert. Neben dem erhöhten spezifischen Bedarf für die Dampferzeugung ist dieser im Scharoun Theater auch für die Heizung mit 113,4 kWh/m²a gegenüber dem Durchschnittswert von 102,6 kWh/m²a höher. Hier spielt das ungünstige A/V-Verhältnis durch die langgestreckte Form des Theatergebäudes eine entscheidende Rolle, da hierdurch hohe Transmissionswärmeverluste durch die Gebäudehülle auftreten.

Der spezifische elektrische Endenergiebedarf weist im Scharoun Theater insgesamt sowie für nahezu alle Verbraucher einen deutlich geringeren Wert auf. Lediglich die Hilfsenergien für die Heizung liegen sowohl für die Querschnittserhebung als auch für das Scharoun Theater jeweils bei 0,1 kWh/m²a. Auch die Luftförderung zeigt mit 14,6 kWh/m²a einen übereinstimmenden Wert. Während für Diverse Technik und Zentrale Dienste jedoch für die Querschnittserhebung im Mittel ein Bedarf von 14,4 kWh/m²a entsteht, beträgt dieser mit 6,5 kWh/m²a beim Scharoun Theater Wolfsburg weniger als die Hälfte. Auch der Bedarf für die Arbeitshilfen ist mit 0,4 kWh/m²a gegenüber 3,2 kWh/m²a sehr gering. Gleiches ist für die Beleuchtung zu beobachten. Hier steht ein Bedarf im Scharoun Theater in Höhe von 6,9 kWh/m²a 17,7 kWh/m²a gegenüber. Wie bereits erläutert, lassen sich diese geringeren Bedarfswerte auf den Gastspielbetrieb zurückführen, da hieraus eine andere Frequentierung des Hauses sowie das Entfallen energieintensiver Werkstatträumlichkeiten folgen. Der letzte verbleibende Bedarf entsteht für die Kälteerzeugung. Ebenso wie die bisher aufgeführten Bedarfswerte ist auch dieser mit 3,9 kWh/m²a im Scharoun Theater geringer, da er bei der Querschnittserhebung im Mittel 7,7 kWh/m²a beträgt. Betrachtet man die einzelnen Theaterspielstätten innerhalb der Querschnittserhebung, so treten hier sehr unterschiedliche Bedarfswerte auf, die zwischen 0,0 kWh/m²a und 27,5 kWh/m²a liegen, da die Gegebenheiten für die Kälteerzeugung und die gekühlten Bereiche sehr unterschiedlich sind.

Bisher erfolgte die Betrachtung nach Verbrauchern gegliedert. Im Folgenden wurde sie durch eine Aufteilung des Bedarfs auf die Zonen ergänzt. Sowohl im Scharoun Theater als auch bei der Querschnittserhebung hebt sich der große Anteil des Endenergiebedarfs für die Zonen 01_Lager/Technik, 09_Foyer und 11_Theatersaal deutlich von den Übrigen ab. Wie bereits unter [5.4.2] festgestellt, handelt es sich bei diesen Zonen mit Ausnahme von 11_Theatersaal um Bereiche, die einen hohen Flächenanteil am Gebäude einnehmen. Der hohe Bedarfsanteil von 11_Theatersaal ist dagegen auf die hohen Anforderungen bezüglich der Komfortanforderungen sowie der Szenischen Beleuchtung zurückzuführen. Eine Gegenüberstellung der Flächenanteile der Zonen zwischen dem Scharoun Theater und dem Mittel der Querschnittserhebung zeigt, dass hier eine vergleichbare Verteilung vorliegt. Da beim Scharoun Theater die Abgrenzung der drei Zonen noch stärker hervortritt, weil die Verbrauchsanteile für die Zonen 09_Foyer und 11_Theatersaal sogar jeweils 20% überschreiten und der Verbrauchsanteil der verbleibenden Zonen dementsprechend noch geringer ausfällt, ist dies ein Hinweis auf die geringere Frequentierung der übrigen Bereiche aufgrund der Gastspielnutzung. Dies erfordert vor allem weniger Aufwand für Verwaltung, Werkstätten und Probebetrieb, der sich auch in einem geringeren Flächenanteil gegenüber der Querschnittserhebung sowie einem mindestens halbierten Endenergiebedarfsanteil niederschlägt.

Bei Gegenüberstellung des spezifischen Bedarfs der einzelnen Zonen zeigt sich, dass die Abweichungen zum Durchschnittswert im Scharoun Theater Wolfsburg geringer ausfallen als bei der Querschnittserhebung. Die Querschnittserhebung weist die geringsten spezifischen Bedarfswerte in Zone 01_Lager/Technik und 04_Verkehrsfläche auf. Während diese Beobachtung im Scharoun Theater ebenfalls auf 04_Verkehrsfläche zutrifft, überschreitet der Bedarf für 01_Lager/Technik sogar den Durchschnittsbedarf für das gesamte Gebäude. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Scharoun Theater über zahlreiche Lüftungsanlagen verfügt, die auch große Teile der Lagerflächen versorgen. Besonders hohe Bedarfswerte zeigen sich bei der Querschnittserhebung für die Zonen 03_Sanitär, 08_Gastronomie und 11_Theatersaal. Im Sanitär- und Gastronomiebereich wurde ein hoher Bedarf für die Heizung festgestellt, da hier ein erhöhter Lüftungsbedarf zur Abführung von Feuchtelasten und Gerüchen besteht [siehe 5.4.2]. Wesentlich geringer

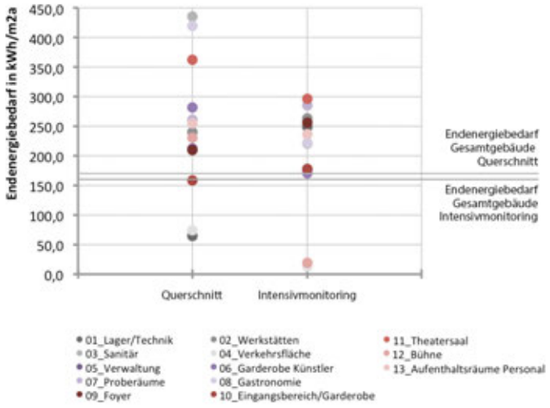

Abb. 369 Spezifischer Endenergiebedarf der einzelnen Zonen

ist der Bedarf in diesen Zonen im Scharoun Theater, da die Belüftung überwiegend durch Lüftungsanlagen mit angeschlossener Wärmerückgewinnung erfolgt.
Da der Theatersaal bei der Querschnittserhebung gleichermaßen wie beim Intensivmonitoring einen großen Anteil am Endenergiebedarf erzeugt, der nicht allein auf die überdurchschnittliche Fläche der Zone zurückzuführen ist, wurde er herausgegriffen und gesondert betrachtet. Hier zeigt sich, dass der durchschnittliche, im Rahmen der Querschnittserhebung ermittelte, spezifische Bedarf für Zone 11_Theatersaal in Höhe von 362,7 kWh/m²a den Bedarf des Scharoun Theaters von 296,7 kWh/m²a überschreitet. Um nun vergleichen zu können, welche Verbraucher hauptsächlich für den Bedarf sind, wurden die Verbrauchsanteile prozentual betrachtet. Bei der Querschnittserhebung entsteht der größte Bedarfsanteil mit 39,2 % für die Heizung. Dagegen zeigt sich beim Scharoun Theater Wolfsburg, dass der Bedarf für die Heizung mit 3,6 % nur wenig ins Gewicht fällt. Dafür entsteht hier sowohl ein ähnlich großer Anteil für die Kälte- als auch für die Dampferzeugung. Beide Verbraucher stellen einen Anteil von mehr als 30%. Die Bedarfsanteile für diese beiden Verbraucher fallen vor allem für die Dampferzeugung für die Querschnittserhebung im Mittel eher gering aus. Die Bedarfsanteile für Beleuchtung und Luftförderung bewegen sich bei der Querschnittserhebung um 18 %. Zwar liegen sie beim Intensivmonitoring leicht darunter, sind aber dennoch vergleichbar. Es lässt sich also für den Theatersaal festhalten, dass in Abhängigkeit der vorliegenden gebäudetechnischen Möglichkeiten sowie der raumkomforttechnischen Anforderungen die Verbraucher unterschiedlich zur Zusammensetzung des Endenergiebedarfs beitragen. Es ist anzunehmen, dass bei Einzelbetrachtungen der Spielstätten aus der Querschnittserhebung sehr unterschiedliche Bedarfsprofile entstehen.
Die vorangegangene Gegenüberstellung der durchschnittlichen Ergebnisse aus der Querschnittserhebung mit dem Intensivmonitoring hat gezeigt, dass der Endenergiebedarf aufgrund der Gebäudetechnik, vor allem im Bereich der Lüftungsanlagen mit angeschlossenen Funktionen, sowie der abweichenden Betriebsform teilweise sehr unterschiedlich ausfällt. So ergab die Analyse beim Intensivmonitoring einen erhöhten Bedarfsanteil für die Luftförderung aufgrund des hohen Anteils an belüfteter Gebäudefläche sowie die Dampferzeugung zur Befeuchtung der Zuluft. Aufgrund geringerer Nutzungsintensität des Gebäudes und fehlender energieintensiver Werkstattbereiche fällt der Strombedarf kleiner aus. In beiden Fällen stellt sich der Theatersaal, der zentrale Bestandteil einer Theaterspielstätte in dem Zuschauer und Akteure zusammengeführt werden, trotz lediglich kurzer intensiver Nutzungsintervalle als Verursacher für einen großen Anteil des Endenergiebedarfs heraus.

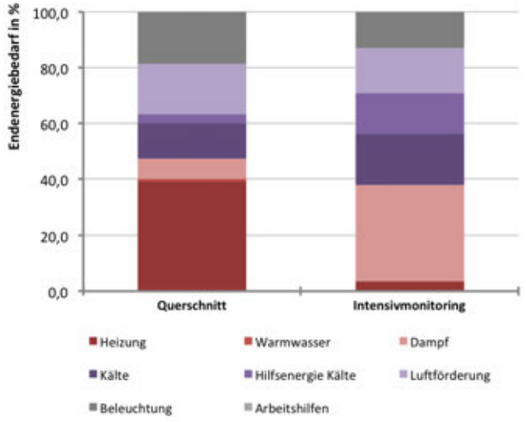

Abb. 370 Prozentualer Bedarf der einzelnen Verbraucher für die Zone 11_Theatersaal

11.3.3 Gegenüberstellung der Messwerte mit den TEK-Tool-Berechnungen

Eine Gegenüberstellung der erhobenen Daten zum Energieverbrauch mit den mit TEK-Tool berechneten Bedarfswerten kann dazu beitragen, die Berechnungsergebnisse zu verifizieren. Aufgrund der messtechnischen Schwierigkeiten bei Erfassung des Fernwärmeverbrauchs [siehe 11.2.1.5] ist bei der Gegenüberstellung nur eine Betrachtung des elektrischen Energieverbrauchs möglich. Das Programm TEK-Tool sieht durch seine Berechnungsstruktur zwei unterschiedliche Herangehensweisen an den elektrischen Energiebedarf vor. Einerseits lässt sich der Energiebedarf einzelnen Verbraucher zuordnen und andererseits ist eine Aufteilung nach Zonen möglich. Erfolgt eine Analyse des Energiebedarfs ausgehend von den Zonen, so nimmt das Programm auch hier nochmals eine Aufgliederung des Bedarfs auf die einzelnen Verbraucher vor, sodass die Zusammensetzung des Energiebedarfs nachvollziehbar ist.
Der Struktur des Programms steht die Messstruktur gegenüber, die sich an den im Scharoun Theater vorhandenen Stromkreisen orientiert. Zum einen richten sich die Stromkreise nach Bereichen des Theaters, die jedoch nicht deckungsgleich mit den Zonen aus der TEK-Tool-Berechnung sind. Um eine Vergleichbarkeit herbeizuführen, müssen folglich Zonen aus den TEK-Tool-Berechnungen zusammengeführt oder geteilt werden. Beispielsweise beinhaltet der Stromkreis „S03.5/S03.6 Verwaltung OG/KG“ anteilig Bereiche der Zonen „01_Lager/Technik“, „02_Werkstätten“, „03_Sanitär“, „04_Verkehrsfläche“, „05_Verwaltung“, „06_Garderobe Künstler“, „07_Proberäume“ und „13_Aufenthaltsräume Personal“. Um hier eine Gegenüberstellung der Berechnungs- mit den Messergebnissen zu ermöglichen, muss der Energiebedarf für Beleuchtung sowie Arbeitshilfen anteilig für die Teilbereiche ermittelt werden. Dies ist

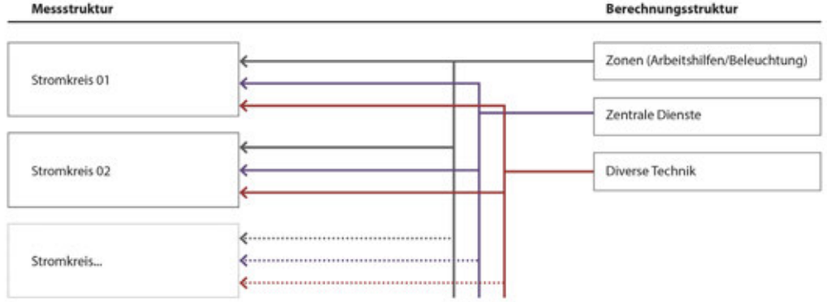

Abb. 371 Zuordnung der Berechnungsbestandteilen zu den Stromkreisen

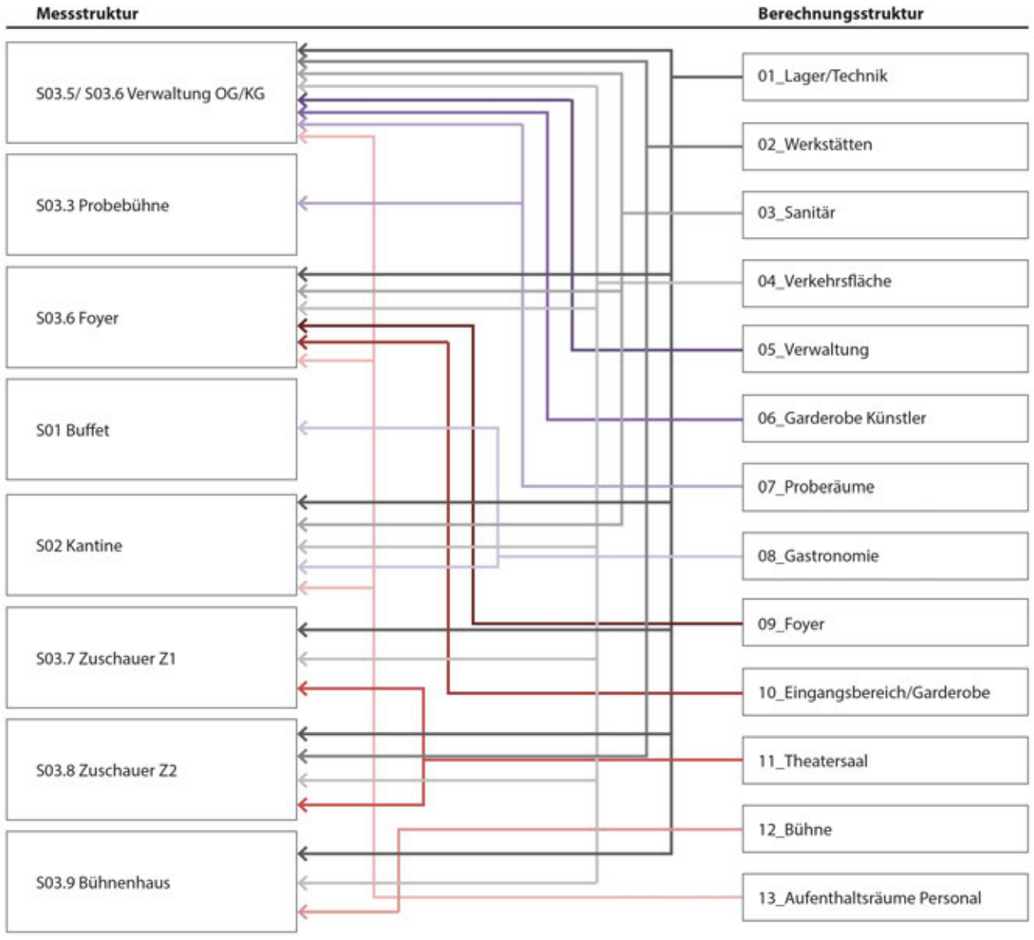

Abb. 372 Zuordnung der Zonen aus der TEK-Tool-Berechnung zu den Stromkreisen

insofern möglich, da über TEK-Tool eine zonenweise Berechnung des spezifischen Bedarfs für Beleuchtung und Arbeitshilfen erfolgt. Anhand der Fläche der Zone, die dem Bereich des Stromkreises zuzuordnen ist, kann anschließend der absolute Bedarf berechnet werden. Neben dem Bedarf für Beleuchtung und Arbeitshilfen müssen für den Vergleich Bedarfsanteile aus der Pauschale für Diverse Technik berücksichtigt werden, die mit TEK-Tool nur zentral ermittelt und keiner Zone zugeordnet werden. Besonders die sonstigen elektrischen Großverbraucher, wie Waschmaschinen oder Kühlschränke, sind gemäß ihren Standorten an die entsprechenden Stromkreise angeschlossen. Ebenfalls zentral erfasst werden in TEK-Tool Bedarfe, die unter „Zentrale Dienste“ fallen und zu denen EDV, IT, Telefonanschlüsse sowie der Strombedarf für die Essenszubereitung gehören. Auch hier muss der Strombedarf anteilig auf die Zonen umgerechnet werden. Der Versuch, die Bedarfswerte der Zonen rechnerisch in Anlehnung an die Stromkreise zusammenzuführen, hat sehr große Abweichungen zu den Messergebnissen ergeben, sodass an dieser Stelle eine Gegenüberstellung nicht sinnvoll durchgeführt werden kann. Es besteht keine ausreichende Klarheit darüber, welche Verbraucher an die jeweiligen Stromkreise tatsächlich angeschlossen sind.

Es bestehen neben den Stromkreisen für Teilbereiche des Theaters auch einzelne Absicherungen für besonders große Verbraucher, wie Lüftungs- oder Kälteanlagen. Da die Bedarfswerte in TEK-Tool nicht nur zonenweise, sondern auch nach Verbrauchern getrennt dargestellt werden, ist hier eine Gegenüberstellung ohne rechnerischen Aufwand möglich. Wie unter [10.2] beschrieben, erfolgte nicht für alle Stromkreise eine separate Verbrauchserfassung, sodass große Teile des Stromverbrauchs unter dem „Nicht gemessenen Verbrauch“ zusammengefasst werden mussten. Unglücklicherweise betrifft dies auch die Lüftungs- und Heizungsanlagen, sodass auch hier eine Gegenüberstellung nicht erfolgen konnte. Sofern Messwerte mit berechneten Bedarfswerten verglichen werden sollen, muss sich die Messstruktur weitestgehend an der Berechnungsstruktur orientieren.

11.4 Auswertung des Raumkomforts

11.4.1 Raumkomfort im Zuschauersaal

11.4.1.1 Stationärer Messtorso

Der stationäre Messtorso im Zuschauersaal des Scharoun Theaters Wolfsburg wurde für die Dauer der Messungen im Parkett mittig zwischen den Stuhlreihen platziert [siehe 10.3.1]. Der Messzeitraum erstreckte sich von Oktober 2017 bis August 2018, jedoch sind bis Mitte Januar 2018 nur tagsüber Messwerte vorhanden, weil während der Nacht bzw. während Nichtnutzung des Zuschauersaals eine Trennung der Steckdosen von der Stromzufuhr erfolgte, an die auch der Messtorso angeschlossen war. Im Januar 2018 wurde das Problem durch Absprachen mit dem Theater zunächst behoben. Von Ende Februar 2018 bis Mitte April 2018, ebenso wie Mitte Mai 2018 bis Mitte Juli 2018, liegen aufgrund eines Messausfalls keine Werte vor. Bei den Auswertungen erfolgte eine Fokussierung auf die Nutzungszeiten, die für den Zuschauersaal mit den Vorstellungszeiten gleichzusetzen sind. Als Bewertungsgrundlage für die Messwerte dienten die unter [5.5.1.1] und [5.5.1.2] beschriebenen Kriterien. Da sich der Messzeitraum im Gegensatz zur Querschnittserhebung über ein Jahr erstreckte, mussten neben den Kriterien für die Heizperiode auch solche für die Kühlperiode berücksichtigt werden.

Zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit ist besonders die Lufttemperatur als wichtiges Kriterium heranzuziehen. Im Messzeitraum lag die durchschnittliche Lufttemperatur im Kopfbereich bei 23,34°C. Mit 23,56°C war die Lufttemperatur im Fußbereich im Mittel geringfügig höher. Im Vergleich zu den durchschnittlich erfassten Lufttemperaturen in den an der Querschnittserhebung teilnehmenden Theaterspielstätten ist das Scharoun Theater Wolfsburg aufgrund der Durchschnittstemperaturen im Mittelfeld einzuordnen. Die Betrachtung der Minima und Maxima zeigt im Gegensatz zur Auswertung der Durchschnittstemperaturen geringere Werte im Fußbereich. Die gemessenen Minimalwerte betragen im Kopfbereich 20,12°C während sie im Fußbereich bei 18,86°C liegen. Der Maximalwert wurde im Kopfbereich mit 26,35°C gemessen. Im Fußbereich

	Temperatur				Luftgeschwindigkeit	
	Heizperiode		Kühlperiode		Heizperiode	Kühlperiode
	von	bis	von	bis		
Kategorie I	21,0°C	23,0°C	23,5°C	25,5°C	< 0,10 m/s	< 0,12 m/s
Kategorie II	20,0°C	24,0°C	23,0°C	26,0°C	< 0,16 m/s	< 0,19 m/s
Kategorie III	19,0°C	25,0°C	22,0°C	27,0°C	< 0,21 m/s	< 0,24 m/s

Abb. 373 Bewertungskriterien für Heiz- und Kühlperiode für den Raumtypen Hör-, bzw. Zuschauersaal mit Energieumsatz von 1,2 met nach DIN EN 15251 [36]

betrug er dagegen nur 25,67°C. Im Gegensatz zur Querschnittserhebung ließen sich anhand der Minimal- und Maximalwerte noch keine konkreten Aussagen zur Über- oder Unterschreitung der Behaglichkeitsgrenzen treffen, da hier zwischen der Heiz- und Kühlperiode unterschieden werden muss. Es lässt sich lediglich festhalten, dass die obere Behaglichkeitsgrenze von 27°C in der Kühlperiode zu keinem Zeitpunkt überschritten wird. Für die Behaglichkeitsgrenzen der Heizperiode übersteigt der Maximalwert jedoch die Behaglichkeitsgrenze, die bei 25°C liegt. Erfolgt bei der weiteren Betrachtung eine Fokussierung auf den Nutzungszeitraum, so zeigt sich gegenüber dem Leerstandszeitraum eine höhere Durchschnittstemperatur. Im Nutzungszeitraum liegt die Durchschnittstemperatur bei 23,88°C im Kopf- und 23,83°C im Fußbereich. Für den Leerstandszeitraum wurde dagegen im Kopfbereich eine mittlere Temperatur von 23,30°C und im Fußbereich von 23,54°C erfasst. Wie bereits unter [5.5.2.2] im Rahmen der Auswertungen zur Querschnittserhebung

beschrieben, ist die erhöhte Lufttemperatur während der Vorstellungen auf die gestiegenen internen Lasten zurückzuführen. Durchschnittlich erfolgt während der Vorstellungen ein Temperaturanstieg von 0,87 K. Je höher jedoch die Auslastung ist, desto größer sind auch die internen Lasten und desto stärker ist der Temperaturanstieg während der Vorstellungen. Die Korrelation zwischen Auslastung und Temperaturanstieg während der Vorstellungen liegt bei 0,57 und zeigt somit einen mittleren linearen Zusammenhang.

Neben der Betrachtung der Durchschnittstemperaturen können die Messwerte auch, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Behaglichkeitsbereiche in der Heiz- und Kühlperiode, für das ganze Jahr kategorisiert werden. In Kategorie I sind 25,8% der Messwerte einzuordnen, 33,7% entsprechen Kategorie II und 29,8% Kategorie III. Die verbleibenden 10,6% können keiner Kategorie zugeordnet werden. Aufgrund des großen Anteils der Werte, die auf keine Kategorie entfallen, erfüllt die Lufttemperatur über das Jahr hinweg keine Anforderungen an die Behaglichkeit. Grund hierfür sind Temperaturen, die vor allem in der Heizperiode zu hoch ausfallen. Eine monatsweise Betrachtung ergab, dass hauptsächlich im Monat Dezember 2017 viele Messwerte außerhalb der Behaglichkeitsgrenzen lagen. Im Dezember 2017 überschritten 21,4% der Messwerte im Nutzungszeitraum die Grenze des Behaglichkeitsbereichs für die Heizperiode von 25°C. So ist es auch zu erklären, dass im Dezember mit 23,86°C die höchste monatliche Durchschnittstemperatur vorlag. Dies ist auf die erhöhte Vorstellungsdichte in Kombination mit der hohen Auslastung zurückzuführen, da sowohl die szenische Beleuchtung als auch die Zuschauer einen hohen Wärmeeintrag mit sich bringen. Im Januar 2018 wurde dagegen die geringste Durchschnittstemperatur mit 22,85°C ermittelt. Werden die Monate nach Heiz- und Kühlperiode zusammengefasst, so ergeben sich sowohl im Kopf- als auch im Fußbereich leicht höhere Durchschnittstemperaturen in den kalten Monaten. Für den Kopfbereich beträgt die mittlere Temperatur in der Heizperiode 23,90°C während diese in der Kühlperiode bei 23,79°C liegt. Der Fußbereich weist in der Heizperiode eine Temperatur von 23,87°C auf und in der Kühlperiode wurde sie mit 23,62°C ermittelt. Wird außerdem der Anteil der Messwerte betrachtet, der die entsprechend anzusetzende Behaglichkeitsgrenze überschreitet, so beträgt er in der Heizperiode 10,8%. Verglichen hierzu besteht in der Kühlperiode keine Überschreitung der Behaglichkeitsgrenze. Dies kann daran liegen, dass die Innenraumtemperaturen, neben den internen Lasten, bei vielen Nutzungen maßgeblich von der Außenlufttemperatur und den solaren Einträgen während des Tages beeinflusst werden. Im Falle des Zuschauersaals bleiben die internen Lasten durch Personen und Beleuchtung während der Heiz- und Kühlperiode konstant. Solare Lasten gelangen jedoch

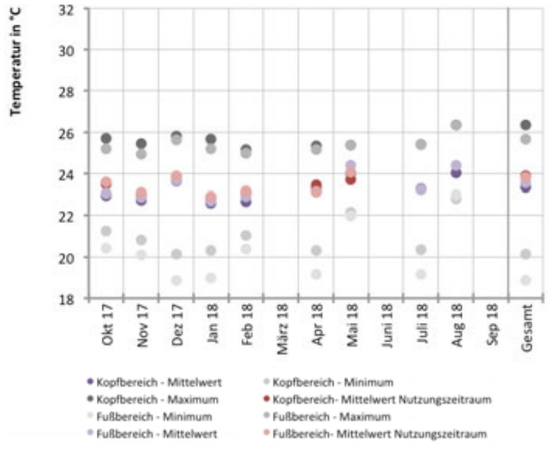

Abb. 374 Lufttemperatur im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Zuschauersaal

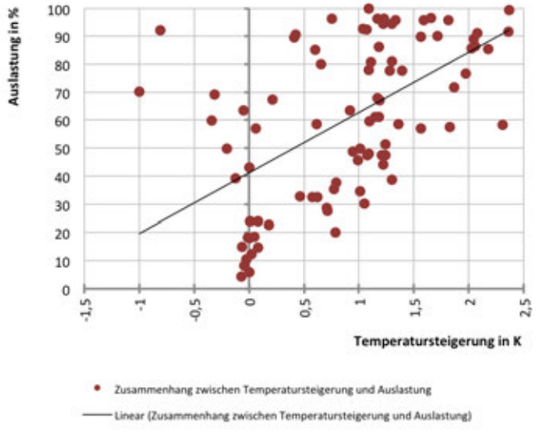

Abb. 376 Zusammenhang zwischen der Auslastung und der Temperatursteigerung im Zuschauersaal

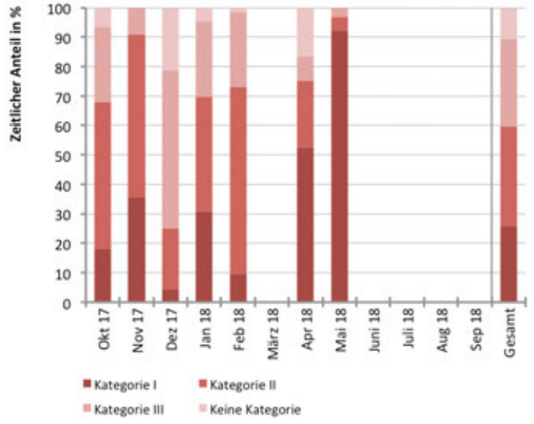

Abb. 375 Kategorisierung der Lufttemperatur während des Messzeitraums im Zuschauersaal

nur über das Tageslichtfenster, das nach Südosten ausgerichtet ist und nur einen geringen Anteil an der gesamten Fassadenfläche des Zuschauersaals ausmacht, in den Raum. Hinzu kommt, dass der Raum ausschließlich mechanisch belüftet wird und so keine direkte Verbindung zum Außenraum besteht. Die mechanische Belüftung verfügt über eine Kühlfunktion, die Wärmeeinträge über die Außenluft kompensiert. Darüber hinaus finden die Vorstellungen meist in den Abendstunden statt, sodass die Außenluft an warmen Tagen bereits abgekühlt ist. Begünstigend kommt hinzu, dass in den Monaten mit den durchschnittlich höchsten Außenlufttemperaturen Spielpause ist und somit keine Vorstellungen durchgeführt werden.

Neben der Lufttemperatur wurde auch die relative Luftfeuchte als Kriterium zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit, aber auch der Luftqualität, gemessen. Während des gesamten Messzeitraums lag im Kopfbereich ein Mittelwert von 34,0% vor. Der Mittelwert im Fußbereich fällt mit 31,6% ein wenig niedriger aus. Eine ähnliche Tendenz zeigt sich bei Betrachtung der Minimal- und Maximalwerte. Das Maximum betrug im Kopfbereich 55,1% und im Fußbereich 53,0%. Die Minimalwerte sind mit 15,2% im Kopf- und 13,7% im Fußbereich sehr niedrig. Anhand der bisher betrachteten Daten lässt sich feststellen, dass die Raumluft nicht zu feucht ist, aber Schwierigkeiten aufgrund zu trockener Luft bestehen könnten, da relative Luftfeuchten unter 30% eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens darstellen können. Erfolgt eine Betrachtung des zeitlichen Anteils der relativen Luftfeuchte unter 30%, so liegt er im Kopfbereich bei 26,1% und im Fußbereich sogar bei 43,2%. Reduziert man die Auswertung auf den Nutzungszeitraum, so zeigt sich nur eine Verringerung der durchschnittlichen relativen Luftfeuchte im Fußbereich um 0,4%, während sie im Kopfbereich unverändert bleibt. Der zeitliche Anteil unter 30% ändert sich dagegen im Kopfbereich stärker und sinkt von 26,1% auf 20,9%. Im Fußbereich erhöht sich der Anteil dagegen marginal um 0,2% auf

43,4%. Folglich sind die relativen Luftfeuchten während der Vorstellungen tendenziell höher und liegen häufiger im behaglichen Bereich. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass durch die Zuschauer ein Feuchteeintrag erfolgt und zum anderen auf die Lüftungsanlage, die eine Befeuchtung der Zuluft sicherstellt. Dieser Zusammenhang wurde bereits bei Auswertung der Ergebnisse zur Querschnittserhebung festgestellt, da Theaterspielstätten, die über eine Zuluftbefeuchtung verfügen, tendenziell höhere relative Luftfeuchten während der Nutzungszeiten aufweisen, während solche ohne diese Möglichkeit geringere relative Luftfeuchten zeigen.

Die Kategorisierung der Messwerte verdeutlicht, dass mit 78,6% der größte Anteil der Messwerte Kategorie I zuzuordnen ist. Weitere 15,4% sind in Kategorie II einzuordnen, während 7,5% zu Kategorie III zählen. Lediglich 0,5% der Messwerte bewegen sich außerhalb der Kategorien. Somit gelten zumindest mäßige Erwartungen an die relative Luftfeuchte als erfüllt. Eine monatsweise Aufschlüsselung der Messwerte zeigt, dass die relative Luftfeuchte im Februar 2018 besonders niedrig ausfällt. In diesem Monat liegt sowohl die geringste mittlere relative Luftfeuchte vor als auch der größte zeitliche Anteil an Messwerten unter der 30%-Grenze. Die höchste durchschnittliche relative Luftfeuchte wurde dagegen im Oktober 2017 mit 41,2% erfasst. Erfolgt außerdem ein Vergleich der relativen Luftfeuchte getrennt nach Heiz- und Kühlperiode, so ergeben die sowohl im Kopf- als auch im Fußbereich leicht höhere durchschnittliche relative Luftfeuchten im Sommer. Der Mittelwert im Kopfbereich liegt in der Kühlperiode bei 34,4%, während er in der Heizperiode 33,9% beträgt. Im Fußbereich sind die Mittelwerte mit 32,3% im Sommer und 31,0% im Winter etwas geringer. Auch der Anteil an Messwerten unter 30% ist im Winter mit 38,6% gegenüber 16,2% im Sommer deutlich größer. Der Unterschied zwischen der Heiz- und Kühlperiode ist darauf zurückzuführen, dass die Zuluft in der Heizperiode vor Einbringung in

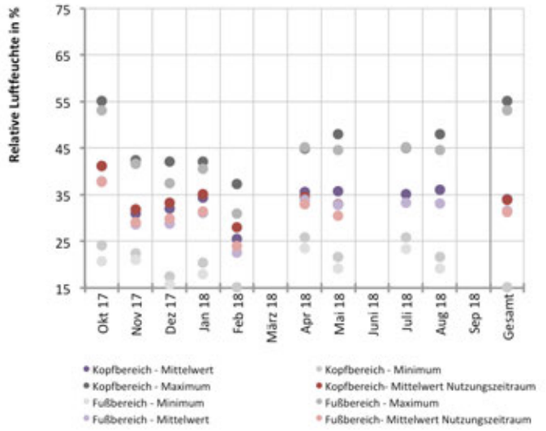

Abb. 377 Relative Luftfeuchte im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Zuschauersaal

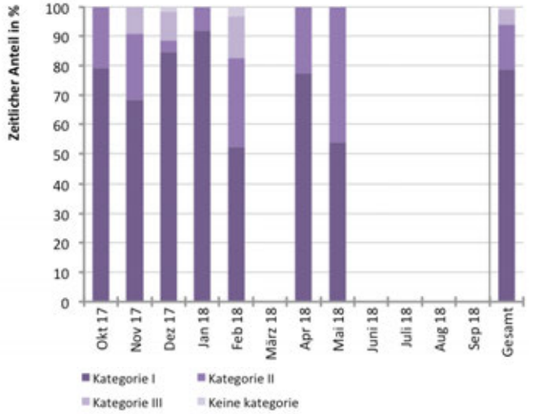

Abb. 378 Kategorisierung der Relativen Luftfeuchte während des Messzeitraums im Zuschauersaal

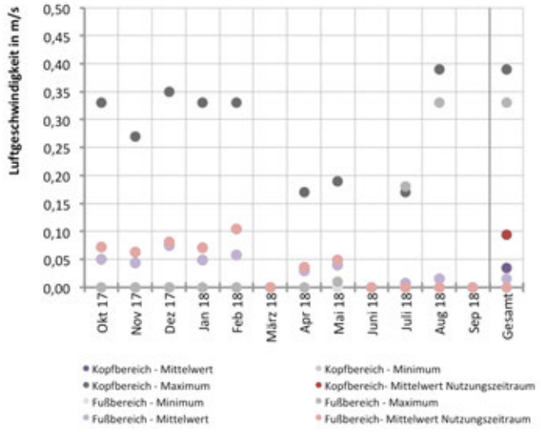

Abb. 379 Luftgeschwindigkeit im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Zuschauersaal

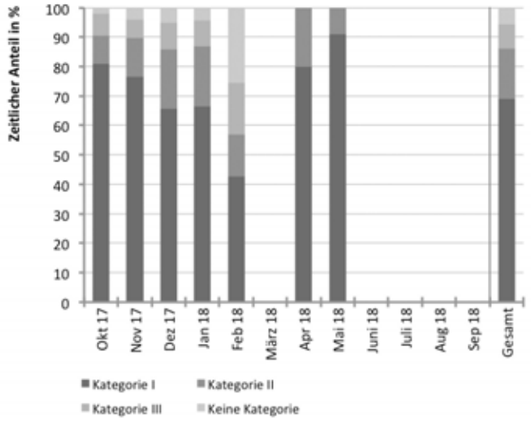

Abb. 380 Kategorisierung der Luftgeschwindigkeit während des Messzeitraums im Zuschauersaal

den Zuschauersaal stark erwärmt werden muss und die relative Luftfeuchte dadurch sinkt. In der Kühlperiode dagegen erfolgt teilweise eine Kühlung der Zuluft, was zu einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte führt.
Zu hohe Luftgeschwindigkeiten können die thermische Behaglichkeit negativ beeinflussen und zu lokaler thermischer Unbehaglichkeit führen. Bei den gemessenen Daten ist zu berücksichtigen, dass der Messsensor im Fußbereich bis zum Mitte Juli 2018 nur Nullwerte erfasste. Erst nach einer Wartung des Sensors wurden Daten aufgenommen, sodass während der Spielzeit keine Daten zur Luftgeschwindigkeit für den Fußbereich vorliegen, da im Juli bereits Theaterpause war. Auch der Messsensor im Kopfbereich erfasste über längere Zeiträume Nullwerte, sodass auch hier eine Beschädigung der sensiblen Sensorik zu befürchten ist. Unter diesen Voraussetzungen können die Messwerte nur Hinweise bezüglich der Luftgeschwindigkeiten geben. Wie auch in vielen Spielstätten der Querschnittserhebung bestanden auch im Zuschauerraum des Scharoun Theaters Wolfsburg Zeiten ruhender Luftschichten während die maximal erfasste Luftgeschwindigkeit 0,39 m/s betrug. Aus den Messwerten wurde ein Mittelwert von 0,03 m/s berechnet. Im Vergleich zur Querschnittserhebung und den dort generierten Messwerten liegt dieser Durchschnittswert im unteren Bereich des Feldes. Es wurde im Rahmen der Querschnittserhebung festgestellt, dass die Luftgeschwindigkeit bei den betrachteten Spielstätten im Fußbereich höher ausfiel, da dort die Einbringung der Zuluft erfolgte. Daher ist anzunehmen, dass abweichend zu dieser Feststellung im Scharoun Theater Wolfsburg die Luftgeschwindigkeiten im Kopfbereich höher ausfallen, da die Zuluft über die Rückenlehnen der Vordersitze in den Raum geleitet wird. Werden durchschnittliche Luftgeschwindigkeiten während des Leerstandszeitraums mit dem Nutzungszeitraum gegenübergestellt, zeigen sich, wie auch bei der Querschnittserhebung beobachtet,

mit 0,08 m/s gegenüber 0,02 m/s höhere Werte während der Vorstellungen. Verursacht werden die höheren Luftgeschwindigkeiten durch die Bewegung der Zuschauer sowie eine möglicherweise erhöhte Luftwechselrate.
Erfolgt eine Kategorisierung aller gemessenen Luftgeschwindigkeiten, so sind 69,2% der Werte in Kategorie I einzuordnen, 16,9% in Kategorie II und 8,3% in Kategorie III. Damit liegt ein Anteil von 5,5% außerhalb des Behaglichkeitsbereichs. Dies deutet unter Berücksichtigung der Sensorproblematik darauf hin, dass möglicherweise zeitweise eine Beeinträchtigung der Zuschauer durch Zugluft vorliegt. Weiterhin kann die Betrachtung der Messwerte nach Heiz- und Kühlperiode differenziert werden. In der Kühlperiode ist keine Überschreitung des äußersten Grenzwertes festzustellen, während in der Heizperiode zu 7,2% der Zeit zu hohe Luftgeschwindigkeiten vorliegen. Obwohl in der Kühlperiode bei höheren Temperaturen auch größere Luftgeschwindigkeiten toleriert werden können, fällt die mittlere Luftgeschwindigkeit in der Kühlperiode mit 0,07 m/s etwas niedriger aus als in der Heizperiode mit 0,09 m/s.
Zu große Temperaturdifferenzen zwischen Kopf- und Fußbereich werden als unangenehm empfunden und tragen ebenso wie zu hohe Luftgeschwindigkeiten zur Empfindung lokaler thermischer Unbehaglichkeit bei. Wird ausschließlich der Nutzungszeitraum betrachtet, so traten nur zu 1,4% der Zeit keine Temperaturdifferenzen auf. Mit einem Anteil von 43,1% waren die Temperaturen im Fußbereich durchschnittlich um 0,19 K höher als im Kopfbereich. Eine höhere Temperatur im Fußbereich wird jedoch nicht als große Beeinträchtigung der Behaglichkeit empfunden, sodass der Fokus auf der Bewertung der Zeiträume liegt, in denen die Temperatur im Kopfbereich höher ausfällt. Dies liegt im Messzeitraum zu 55,5% der Zeit mit einer durchschnittlichen Temperaturdifferenz von 0,25 K vor. Die maximal ermittelte Temperaturdifferenz beträgt für diesen Fall 0,9 K, sodass bereits an dieser Stelle nicht davon auszugehen ist, dass aufgrund zu hoher vertikaler Temperaturdifferenzen eine Beeinträchtigung der Behaglichkeit vorliegt, da vertikale Temperaturdifferenzen unter 2,0 K hohen Erwartungen entsprechen. Zur weiteren Analyse der Temperaturverteilung im Zuschauersaal erfolgte eine Differenzierung zwischen Nutzungszustand und Leerstand. Während des Leerstands überwiegt der Anteil der Messwerte, bei denen im Fußbereich eine höhere Temperatur erfasst wurde als im Kopfbereich. Im Nutzungszustand verhält es sich dagegen umgekehrt wie auch bereits bei der Querschnittserhebung festgestellt wurde. Unabhängig davon, ob im Kopf- oder im Fußbereich höhere Temperaturen vorliegen, fallen die Temperaturdifferenzen im Leerstandszustand größer aus. Erfolgt eine Betrachtung des kritischeren Falls der höheren Temperaturen im Kopfbereich, so liegt die Temperaturdifferenz im Nutzungszustand

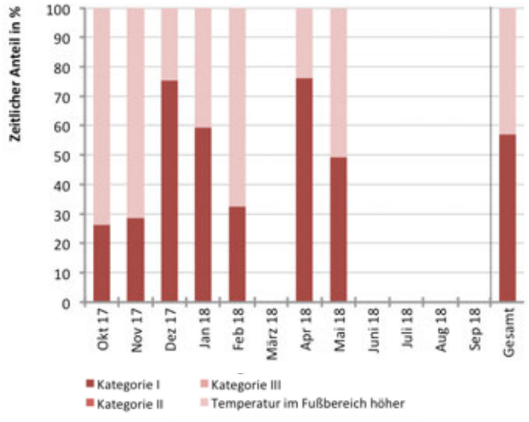

Abb. 381 Kategorisierung der Vertikalen Temperaturdifferenz während des Messzeitraums im Zuschauersaal

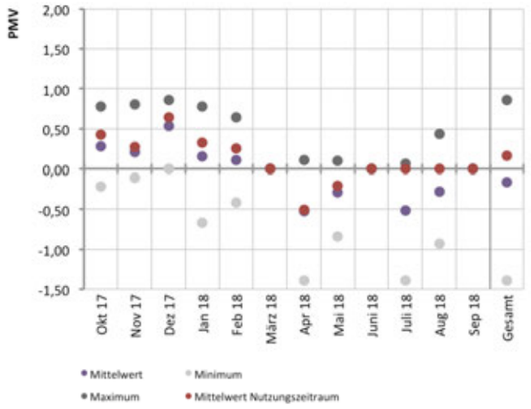

Abb. 382 Durchschnittliches PMV während des Messzeitraums im Zuschaueraal

im Mittel bei 0,25 K, während sie sich im Leerstand auf 0,55 K erhöhte. Darüber hinaus wurden die Unterschiede zwischen der Heiz- und Kühlperiode untersucht, indem die Temperaturdifferenzen auch hier gegenübergestellt wurden. Hier zeigt sich, dass die mittlere Temperaturdifferenz in der Heizperiode mit 0,19 K geringer ausfällt als in der Kühlperiode mit 0,47 K. Neben den niedrigeren Temperaturdifferenzen in der Heizperiode ist der Anteil der Messwerte mit höheren Temperaturen im Fußbereich mit 44,7% gegenüber 35,4% in der Kühlperiode etwas höher. Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Prozentsatz an Unzufriedenen (PD) aufgrund der vertikalen Temperaturdifferenz bei durchschnittlich lediglich 0,2% liegt und daher so gut wie keine Beeinträchtigung der Behaglichkeit vorliegt.
Neben der Bewertung der einzelnen Parameter, die Einfluss auf die thermische Behaglichkeit nehmen, kann auch das Predicted Mean Vote (PMV) berechnet werden, das die Behaglichkeit im Zusammenhang betrachtet. Zusätzlich zu physikalischen Angaben werden bei Berechnung des PMVs auch Tätigkeitsgrad und Bekleidung berücksichtigt. Der Tätigkeitsgrad liegt gemäß dem Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersaal“, der bei den vorangegangenen Auswertungen angewendet wurde, bei 1,2 met, was einer sitzenden Tätigkeit entspricht. Da in Abhängigkeit der Jahreszeit mit einer Anpassung der Bekleidung zu rechnen ist, wird für die Kühlperiode der Bekleidungsfaktor 0,5 clo und für die Heizperiode 1,0 clo angesetzt. Die Berechnungsergebnisse für den gesamten Messzeitraum ergeben einen durchschnittlichen PMV von -0,17, was einer Empfindung von nahezu neutral mit einer Tendenz zu „etwas kühl“ entspricht. Ein Vergleich des mittleren PMVs im Leerstands- und Nutzungszustand zeigt, dass dieser im Leerstand mit -0,19 gegenüber 0,17 während der Nutzung eine gegenläufige Tendenz aufweist. Obwohl sich beide Werte nahe am Neutralitätspunkt bewegen, wird die thermische Umgebung während des Nutzungszeitraums voraussichtlich tendenziell eher als warm empfunden. Da die thermische Umgebung vor allem während der Nutzungszeiten möglichst behaglich sein sollte, beziehen sich die weiteren Auswertungen auf diesen Zeitraum. Die Spannweite der ermittelten PMVs liegt während den Vorstellungen zwischen -1,15 entsprechend einer Empfindung von „etwas kühl“, und 0,86, was mit „etwas warm“ zu bewerten ist. Erfolgt eine Gegenüberstellung der voraussichtlichen Empfindung der Umgebung als „eher warm“ und „eher kalt“, so überwiegt mit 75,2% der Anteil einer eher zu hohen thermischen Empfindung.
Um weitere Aussagen über die vorliegende thermische Umgebung treffen zu können, können die berechneten PMVs kategorisiert werden. In Kategorie I sind 26,0% der Messwerte einzuordnen, 51,7% entfallen auf Kategorie II und 15,9% erreichen Kategorie III. Aufgrund der verbleibenden 6,4%, die in keine Kategorie eingeordnet werden können, werden Erwartungen an die thermische Umgebung über das Jahr hinweg nicht konstant bedient. Eine Gegenüberstellung der Kategorisierung anhand der PMVs mit den Ergebnissen

basierend auf der Lufttemperatur zeigt, dass ein verringerter Prozentsatz außerhalb der Kategorien vorliegt. Dies lässt sich damit erklären, dass über weite Zeiträume lediglich sehr geringe Luftgeschwindigkeiten erfasst wurden. Mit einer monatsweisen Betrachtung der PMVs kann überprüft werden, in welchem Zeitraum die thermische Umgebung kritisch zu bewerten ist. Im Dezember 2017 zeigte sich mit 0,64 der höchste durchschnittliche PMV. Der geringste PMV wurde dagegen im April 2018 mit -0,51 ermittelt. Durch die Gegenüberstellung des mittleren PMVs in der Kühlperiode in Höhe von -0,38 mit dem der Heizperiode von 0,35 verdeutlicht, dass die thermische Umgebung im Sommer tendenziell als „eher kühl“ und im Winter als „eher warm“ wahrgenommen wird. Der Unterschied in der Tendenz zur thermischen Empfindung ist auf den Wechsel des Bekleidungsfaktors in den Berechnungen zurückzuführen, da trotz höheren Außentemperaturen keine Erhöhung der Durchschnittstemperaturen im Zuschauersaal erfolgt. Aufgrund der vorliegenden PMVs sind durchschnittlich 7,4% bis maximal 32,8% unzufriedene Nutzer zu erwarten. Die vorliegenden PMVs lassen nicht erwarten, dass extreme thermische Empfindungen geäußert werden.
Eine Bewertung der Raumluftqualität im Zuschauersaal erfolgte anhand der CO_2-Konzentration in der Raumluft. Über den gesamten Messzeitraum betrug die mittlere CO_2-Konzentration 623 ppm. Das Minimum wurde mit 560 ppm erfasst, während das Maximum bei 1354 ppm lag. Anhand des Maximums wird sichtbar, dass die Messwerte zumindest temporär die Grenze zum hygienisch auffälligen Bereich überschreiten, sodass hier weitere Betrachtungen erfolgen müssen. Ein Vergleich des Mittelwerts während der Vorstellung- und Leerstandszeiten zeigt, dass die durchschnittliche CO_2-Konzentration während den Vorstellungen mit 780 ppm gegenüber 611 ppm etwas erhöht ist. Da erhebliche zeitliche Anteile im ungenutzten Zustand, vor allem während der Nacht, nicht erfasst wurden, ist davon auszugehen, dass im Leerstandszeitraum tatsächlich noch eine geringere durchschnittliche CO_2-Konzentration vorliegt.
Insbesondere ist jedoch der Nutzungszeitraum für die Auswertungen relevant. Für diesen Zeitraum wurde untersucht, welchen Anteil die Messwerte im hygienisch auffälligen Bereich ausmachen. Es zeigt sich, dass insgesamt lediglich 3,7% der Messwerte die Grenze von 1000 ppm überschreiten. Gliedert man die Anteile der Messwerte im hygienisch bedenklichen Bereich auf, so ist der Anteil mit 19,0% im Februar 2018 besonders hoch. Dies ist auf eine Vorstellung mit langer Dauer zurückzuführen, bei der die Werte fast durchgängig im hygienisch bedenklichen Bereich lagen. Erfolgt nämlich eine Kategorisierung der Raumluftqualität, so können während den Vorstellungszeiten im gesamten Messzeitraums 53,3% der Werte in Kategorie I eingeordnet werden und liegen somit unter 800 ppm. Weitere 43% sind Kategorie II zuzuschlagen und

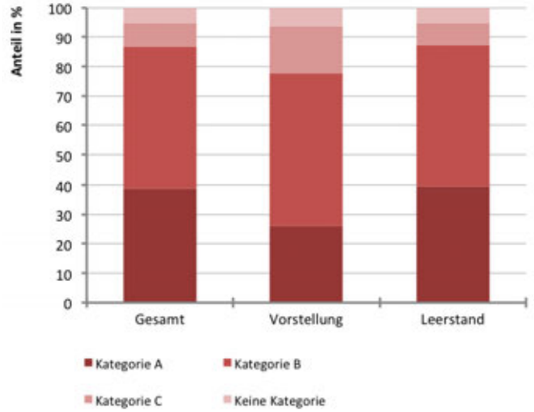

Abb. 383 Kategorisierung der Predicted Mean Votes im Zuschauersaal

entfallen damit auf den hygienisch unbedenklichen Bereich. Insgesamt wird somit IDA II und eine normale Anforderung an die Raumluftqualität erreicht. Am höchsten fällt die Raumluftqualität im November 2017 und April 2018 aus, da in diesen Monaten keine Messwerte über 1000 ppm auftraten. Die vorliegende Luftqualität im Zuschauersaal des Scharoun Theaters Wolfsburg ist somit überwiegend im hygienisch unbedenklichen Bereich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die gesamtthermische Empfindung bei Bewertung nach Kriterien des Raumtypens „Hör- bzw. Zuschauersaal“ im gesamten Messzeitraum als eher etwas zu hoch vorhergesagt wird. Die einzelne Betrachtung der Heiz- und Kühlperiode zeigt jedoch Unterschiede in der Tendenz der gesamtthermischen Empfindung. Lokale thermische Unbehaglichkeit ist aufgrund großer vertikaler Temperaturdifferenzen nicht zu erwarten. Lediglich Zugerscheinungen könnten temporär empfunden werden. Die Raumluftqualität, auf die sowohl die CO_2-Konzentration als auch relative Luftfeuchte Einfluss nimmt, verursachte keine Schwierigkeiten. Die relative Luftfeuchte ist zwar oftmals gering und bewegt sich an den unteren Behaglichkeitsgrenzen, aufgrund der Befeuchtung der Zuluft können jedoch zu niedrige Werte während der Vorstellungszeiten vermieden werden. Während eines Großteils der Nutzungszeit bewegten sich die CO_2-Konzentrationen im hygienisch unbedenklichen Bereich, nur in wenigen Ausnahmefällen wurde die Grenze zum hygienisch bedenklichen Bereich kurzzeitig überschritten. Die im Scharoun Theater Wolfsburg beobachteten Tendenzen bezüglich aller betrachteten Parameter stimmen größtenteils mit den Erkenntnissen zur raumkomforttechnischen Situation in den Theatern der Querschnittserhebung überein. Unterschiede, die auf eine abweichende Einbringung der Zuluft über die Rückenlehnen der Sitze zurückgeführt werden können, wurden nur bei Analyse der vertikalen Temperaturdifferenzen festgestellt.

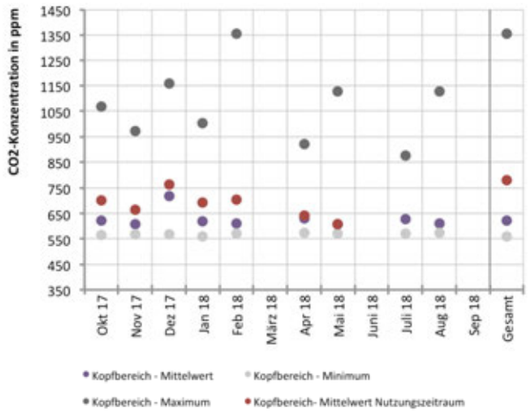

Abb. 384 Raumluftqualität während des Messzeitraums im Zuschauersaal

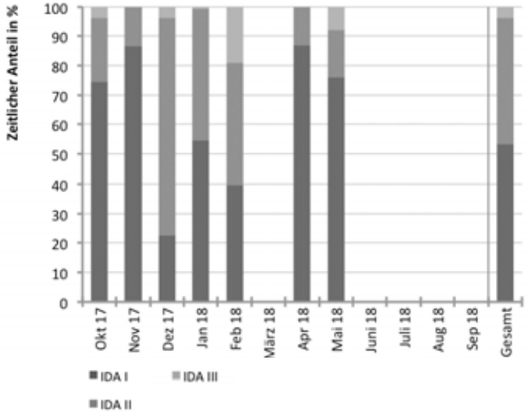

Abb. 385 Kategorisierung der Raumluftqualität während des Messzeitraums im Zuschauersaal

11.4.1.2 Mobiler Messtorso

Neben dem stationären Messtorso, der für die Dauer des Intensivmonitorings über ein Jahr mittig im Parkett des Zuschauersaals platziert wurde, erfasste temporär ein zweiter mobiler Messtorso Daten zum Raumkomfort, um einen Vergleich verschiedener Bereiche des Theatersaals zu ermöglichen. Von Mitte Januar 2018 bis Mitte Juni 2018 wurde der mobile Messtorso auf dem Rang verortet. Ein Versetzen des zweiten Torsos in weitere Bereiche des Zuschauersaals erfolgte, anders als vorgesehen, aus logistischen Gründen nicht. Ebenso wie bei der Bewertung der Messwerte des stationären Messtorsos wurden die Bewertungskriterien für den Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersaal“ [siehe 11.4.1.1] zu Grunde gelegt. Auch hier sind die Nutzungszeiten mit den Vorstellungszeiten gleichzusetzen. Im Zeitraum der Messung kam es bei den erfassten Parametern aufgrund beschädigter Sensoren zu fehlerhaften Messwerten. Dies bezieht sich auf die Luftgeschwindigkeitsmessung im Fußbereich, da hier nur Nullwerte erfasst wurden, sowie auf die CO_2-Konzentration in der Raumluft, bei der ungewöhnlich niedrige Werte auftraten. Beide Parameter werden bei den Auswertungen nicht berücksichtigt. Weitere große Messausfälle wurden nicht beobachtet.

Um die thermische Behaglichkeit auch im Rang zu bewerten, wurde zunächst die Lufttemperatur analysiert. Während des gesamten Messzeitraums wurde im Kopfbereich eine Durchschnittstemperatur von 23,64°C erfasst. Im Fußbereich lag diese bei 23,88°C. Wie bereits bei den Auswertungen zum stationären Messtorso festgestellt, fallen die Durchschnittstemperaturen im Fußbereich somit höher aus als im Kopfbereich. Die Extremtemperaturen sind dagegen im Fußbereich niedriger. Die geringsten Temperaturen betrugen im Kopfbereich 21,21°C und im Fußbereich 20,56°C. Dagegen lagen die höchsten Temperaturen im Kopfbereich bei 26,66°C und im Fußbereich bei 26,48°C. Im Falle der Heizperiode würde dieser Wert bereits eine Überschreitung der oberen

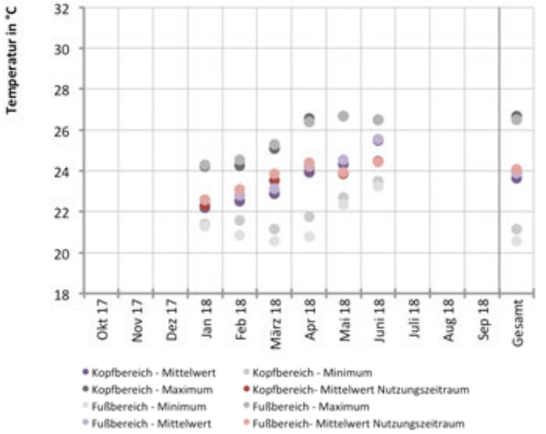

Abb. 386 Lufttemperatur im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals

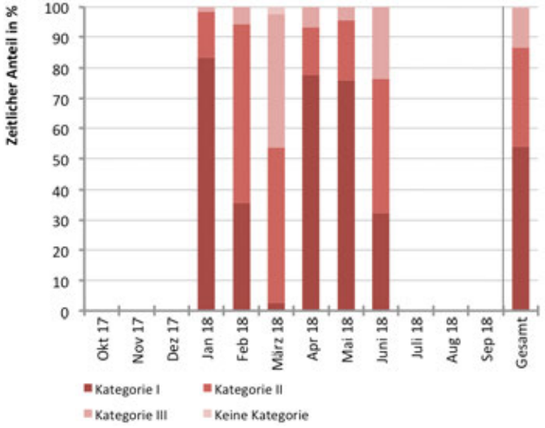

Abb. 387 Kategorisierung der Lufttemperatur während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals

Behaglichkeitsgrenze bedeuten. Da die höchste Temperatur im Kopfbereich jedoch am 24.05.2018 um 22.00 Uhr gegen Ende einer Vorstellung gemessen wurde, fällt der Messzeitpunkt in die Kühlperiode. Somit werden die oberen Grenzwerte in der Kühlperiode zu keinem Zeitpunkt überschritten. Betrachtet man die Gründe für die hohen Lufttemperaturen zu diesem Zeitpunkt, so lagen bereits vor Beginn der Vorstellung hohe Ausgangstemperaturen von knapp 24°C vor. Diese können vor allem auf die über mehrere Tage auftretenden hohen Außentemperaturen von mehr als 20°C zurückgeführt werden. Aufgrund der hohen Wärmeeinträge während der Vorstellung, die durch die Lüftung nicht vollständig kompensiert werden konnten, erfolgte eine kontinuierliche Temperatursteigerung, die zum Ende der Vorstellung ihren Höhepunkt erreichte. Ein Vergleich zwischen den durchschnittlichen Temperaturen während der Vorstellungs- und den Leerstandszeiten zeigt, dass diese während der Vorstellungszeiten höher ausfallen. Im Kopfbereich beträgt die Durchschnittstemperatur zu Vorstellungszeiten 23,92°C, während diese im Fußbereich bei 24,08°C liegt. Im Leerstandszeitraum wurde im Kopfbereich ein Durchschnitt von 23,62°C ermittelt. Der Fußbereich zeigt dagegen im Mittel eine Temperatur von 23,87°C. Zurückzuführen ist dies auf den erhöhten Wärmeeintrag durch Personen und Beleuchtung.

Zur weiteren Bewertung der thermischen Behaglichkeit im Rang wurden die Messwerte kategorisiert. Während der Nutzungszeit sind 53,9% der Messwerte in Kategorie I einzuordnen, 32,5% entfallen auf Kategorie II und13,2% auf Kategorie III. Lediglich 0,5% sind nicht kategorisierbar, sodass auch auf dem Rang nach Kategorie III gemäßigte Erwartungen an die thermische Umgebung erfüllt werden können. Lediglich im März

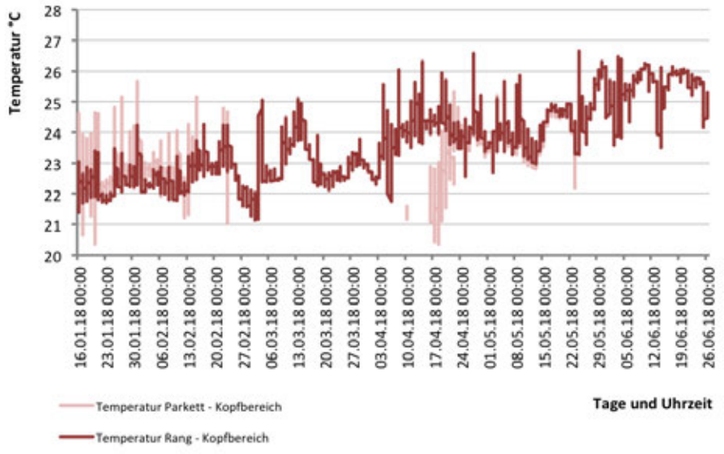

Abb. 388 Lufttemperaturverlauf im Rang und im Parkett für den Kopfbereich

2018 wird die obere Temperaturgrenze von 25°C für die Heizperiode zu 2,5% der Zeit überschritten.

Eine Gegenüberstellung der Durchschnittstemperatur in der Heiz- und der Kühlperiode zeigt während der Kühlperiode sowohl im Kopf- als auch im Fußbereich etwas höhere Werte. Während der Heizperiode liegt die Temperatur im Mittel bei 24,88°C im Kopfbereich und 24,90°C im Fußbereich. In der Heizperiode sinkt die Durchschnittstemperatur im Kopfbereich dagegen auf 23,24°C und im Fußbereich auf 23,49°C. Die monatsweise Betrachtung der Durchschnittstemperaturen während der Nutzungszeit zeigt, dass im Juni 2018 mit 24,48°C der höchste Wert vorlag. Am geringsten war die Temperatur dagegen im Januar 2018 mit 22,29°C. Bei einer Gegenüberstellung der monatlichen Durchschnittstemperaturen im Rang des Zuschauersaals mit den mittleren Außentemperaturen [siehe 11.1] zeigt sich eine Abhängigkeit, da mit steigenden Außentemperaturen auch eine Erhöhung der Innenraumtemperaturen erfolgte.

Ein Vergleich der Temperaturen zwischen Parkett und Rang ist aufgrund der Messausfälle des stationären Messtorsos nur im Zeitraum von Mitte Januar 2018 bis Ende Februar 2018 und Mitte April 2018 bis Mitte Mai 2018 möglich. In diesem Zeitraum wird jedoch sichtbar, dass im gesamten Messzeitraum zu 1,2% der Zeit kein Unterschied besteht. Der verbleibende Zeitraum gliedert sich gleichmäßig auf höhere Temperaturen jeweils im Rang und im Parkett auf. Eine Verschiebung der Anteile erfolgte bei ausschließlicher Betrachtung des Vorstellungszeitraums. Hier überwiegt der Anteil an Messwerten mit 59,0% gegenüber 41,0% die im Rang höher ausfallen. Gleichzeitig fand eine Erhöhung der mittleren absoluten Temperaturdifferenz zwischen Rang und Parkett während der Vorstellungszeiten statt. Einer Temperaturdifferenz von 0,37 K steht eine Temperaturdifferenz von 0,92 K während der Vorstellungen gegenüber. Sowohl die größeren Temperaturdifferenzen als auch der gesteigerte Anteil

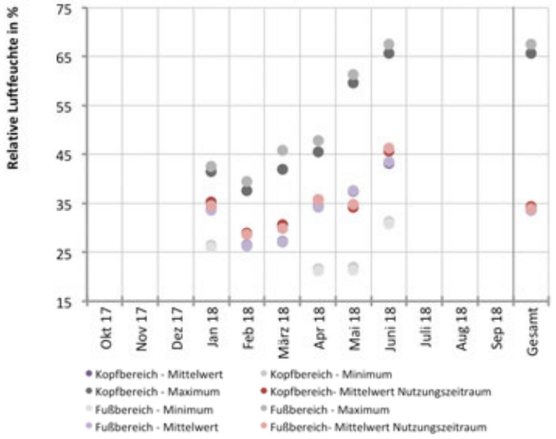

Abb. 389 Relative Luftfeuchte im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals

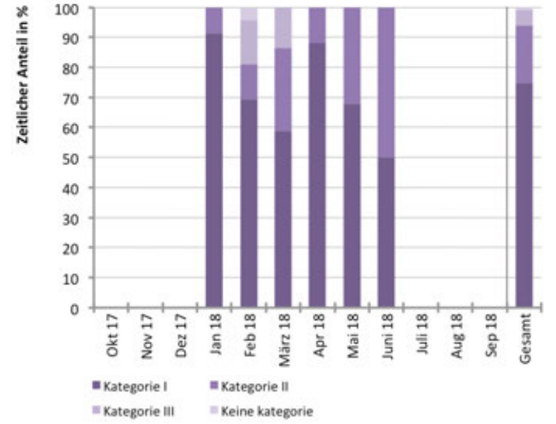

Abb. 390 Kategorisierung der Relativen Luftfeuchte während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals

an Messwerten, die im Rang höher ausfallen, lassen sich über die erhöhten Wärmeeinträge während der Vorstellungen begründen. Durch die Wärmeemissionen der Zuschauer im Parkett erwärmt sich die Luft und steigt nach oben, sodass im Rang eine höhere Temperatur auftritt. Aufgrund der dort sitzenden Personen findet eine weitere Erwärmung statt, die zu einer Vergrößerung der Temperaturdifferenz führt. Die größte Temperaturdifferenz zwischen Rang und Parkett betrug 3,95 K und trat jedoch außerhalb der Vorstellungszeiten auf.

Als weiteres Kriterium zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit im Rang wird die relative Luftfeuchte betrachtet. Während des gesamten Messzeitraums liegt der Mittelwert im Kopfbereich bei 33,6% und ist somit nahezu identisch mit der mittleren Luftfeuchte im Fußbereich von 33,5%. Die Extremwerte unterscheiden sich leicht und liegen im Kopfbereich bei 65,7% und im Fußbereich bei 67,5%. Die Minima wurden mit 12,3% im Kopf- und 11,6% im Fußbereich erfasst. Eine Differenzierung zwischen Vorstellungs- und Leerstandszeiten zeigt, dass sich die Mittelwerte leicht voneinander unterscheiden. Im Kopfbereich ist die relative Luftfeuchte während den Vorstellungen mit 34,4% gegenüber den Leerstandszeiten mit 33,5% um durchschnittlich 0,9% höher. Auch im Fußbereich besteht im Nutzungszeitraum mit 33,9% im Vergleich zu 33,5% ein minimal höherer Durchschnittswert.

Die Bedingungen während der Nutzungszeiträume sind besonders relevant, sodass im folgenden eine Fokussierung auf diese erfolgt. Zur Bewertung der relativen Luftfeuchte wird der Anteil der Messwerte untersucht, der 30% unterschreitet. Er liegt im Kopfbereich bei 22,5% und im Fußbereich bei 23,9%. Werden die Messwerte darüber hinaus kategorisiert [siehe 5.5.1.2], so können 74,8% Kategorie I, 19,0% Kategorie II und 5,4% Kategorie III zugeordnet werden. Lediglich 0,8% der Messwerte bewegen sich außerhalb der Kategorien. Somit werden bezüglich der relativen Luftfeuchte mäßige Erwartungen erfüllt. Besonders niedrig fällt die relative Luftfeuchte im Durchschnitt im Februar 2018 mit 29,0% aus. Der höchste Mittelwert wurde mit 45,6% im Juni 2018 gemessen. Erfolgt eine Gegenüberstellung der durchschnittlichen relativen Luftfeuchte während der Vorstellungen im Zuschauersaal mit den mittleren Außenlufttemperaturen sowie der absoluten Feuchte, so lässt sich ein Zusammenhang erkennen. Im Messzeitraum wurde im Februar 2018 die geringste Durchschnittstemperatur und absolute Luftfeuchte erfasst, während sie im Juni 2018 am höchsten war. Aufgrund der geringen absoluten Luftfeuchte in Kombination mit der notwendigen starken Erwärmung der Zuluft vor Einbringung in den Zuschauersaal fällt die relative Luftfeuchte im Zuschauersaal eher gering aus. Im umgekehrten Fall ist möglicherweise sogar eine Kühlung der Zuluft erforderlich, sodass eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte stattfindet. Ein Vergleich zwischen den relativen Luftfeuchten in der Heiz- und Kühlperiode bestätigt diesen Zusammenhang. Sowohl im Kopfbereich als auch im Fußbereich sind die relativen Luftfeuchten mit 36,9%, bzw. 37,0% höher als in der Heizperiode, in der diese Werte bei 32,6%, bzw. 31,8% liegen.

Stellt man die erfassten relativen Luftfeuchten mit den Werten des stationären Messtorsos gegenüber, bestehen zu 0,3% der Zeit keine Unterschiede. Höhere relative Luftfeuchten im Rang treten zu 30,5% auf, sodass in den meisten Fällen mit 69,2% die relative Luftfeuchte im Parkett höher ist. Auch dies lässt sich dies auf die höheren Temperaturen im Rang gegenüber dem Parkett zurückführen. Die absolute durchschnittliche Differenz beträgt 2,4% und ist für den Menschen daher kaum wahrnehmbar.

Neben der gesamtthermischen Empfindung müssen auch Bedingungen vorliegen, die zur Vermeidung

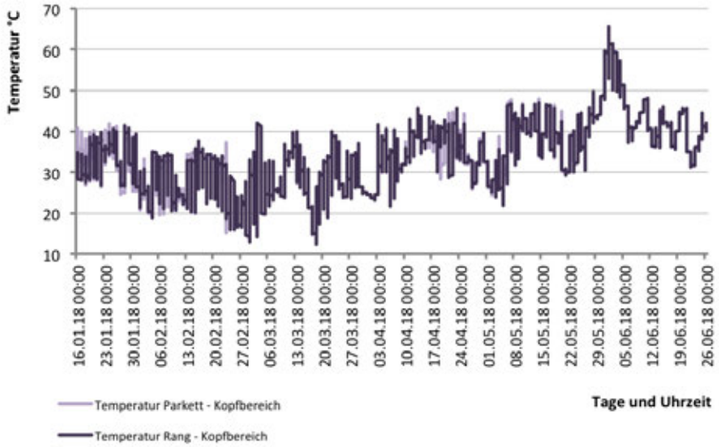

Abb. 391 Verlauf der Relativen Luftfeuchte im Rang und im Parkett für den Kopfbereich

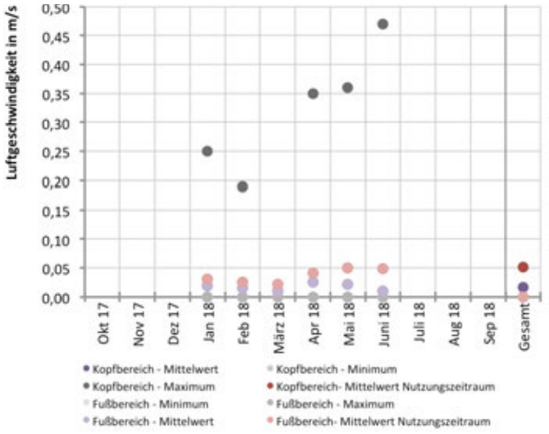

Abb. 392 Luftgeschwindigkeit im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals

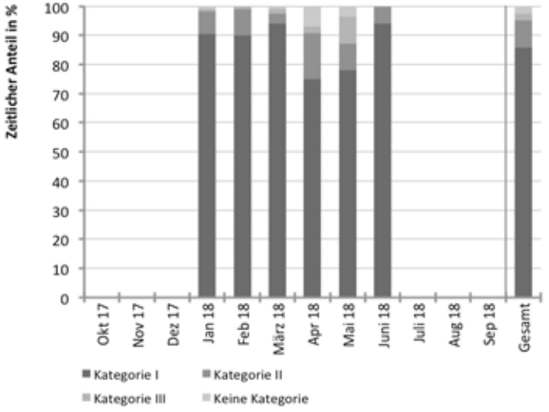

Abb. 393 Kategorisierung der Vertikalen Temperaturdifferenz während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals

lokaler thermischer Unbehaglichkeit beitragen. Lokale thermische Unbehaglichkeit kann auch durch zu hohe Luftgeschwindigkeiten verursacht werden. Für den Messzeitraum wurde für den Kopfbereich eine mittlere Luftgeschwindigkeit von 0,02 m/s ermittelt. Wie bei anderen Behaglichkeitsmessungen [siehe 11.4.1.1] gab es Zeiten ruhender Luftschichten, sodass das Minimum bei 0,00 m/s lag. Das Maximum wurde dagegen mit 2,55 m/s erfasst. Gegenüber dem Messwert im Parkett fällt der Mittelwert im Rang geringer aus, obwohl der im Parkett installierte stationäre Messtorso über weite Zeiträume Nullwerte erfasste. Dies deutet darauf hin, dass die Luftgeschwindigkeiten im Parkett tendenziell höher ausfallen. Erfolgt ein Vergleich zwischen Vorstellungs- und Leerstandszeitraum im Rang, so ergibt sich für den Vorstellungszeitraum ein Mittelwert von 0,05 m/s. Während des Leerstands ist dieser mit 0,02 m/s deutlich geringer. Auch im Parkett wurden während der Vorstellungen durchschnittlich höhere Luftgeschwindigkeiten gemessen. Zwar wurden während des Leerstands gleiche Mittelwerte gebildet, aber zu Vorstellungszeiten wurde im Parkett eine um 0,03 m/s höhere Luftgeschwindigkeit erfasst.
Die Kategorisierung der Messwerte während der Vorstellungszeiten im Rang zeigt, dass 86,1% auf Kategorie I entfallen. Weitere 9,2% sind dagegen in Kategorie II und 2,4% in Kategorie III einzuordnen. Nur 2,4% der Messwerte können keiner Kategorie zugeordnet werden, sodass sogar normale Anforderungen an die Luftgeschwindigkeiten erfüllt werden können. Somit liegt im Rang eine geringere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten lokaler thermischer Unbehaglichkeit aufgrund von Zugempfinden vor als im Parkett. Stellt man die einzelnen Monate der Messungen gegenüber, so treten die höchsten mittleren Luftgeschwindigkeiten mit 0,05 m/s im Mai 2018 und Juni 2018 auf. Dies lässt sich möglicherweise darauf zurückführen, dass ein erhöhter mechanischer Luftaustausch vorlag, um die Wärmelasten abzuführen und den Zuschauersaal zu kühlen, da die Kälteanlage nur eingeschränkt betrieben werden konnte. Neben der Gegenüberstellung der Nutzungszeiträume wurden auch Heiz- und Kühlperiode miteinander verglichen. In der Heizperiode lag mit 0,04 m/s eine geringere mittlere Luftgeschwindigkeit vor als in der Kühlperiode, da hier der Mittelwert 0,07 m/s betrug. Stellt man außerdem den Anteil der Messwerte gegenüber, der die äußersten Behaglichkeitsgrenzen für die Luftgeschwindigkeit überschreitet, so ist er mit 0,5% in der Heizperiode deutlich geringer als in der Kühlperiode mit 4,9%. Ein Vergleich mit den Messwerten im Parkett macht sichtbar, dass zwar gleiche mittlere Luftgeschwindigkeiten in der Kühlperiode erfasst wurden, sich jedoch die Durchschnittswerte in der Heizperiode stark voneinander unterscheiden und der stationäre Messtorso höhere Werte in der Heizperiode ermittelte. An dieser Stelle ist es nur bedingt möglich, Rückschlüsse zu ziehen, da der Messzeitraum des mobilen Messtorsos überwiegend die Kühlperiode umfasst. Dagegen kam es beim stationären Messtorso während der Kühlperiode über weite Zeiträume zu Messausfällen, sodass hauptsächlich die Heizperiode beurteilt werden kann.
Auch zu hohe vertikale Temperaturdifferenzen können lokale thermische Unbehaglichkeit auslösen. Erfolgt eine Betrachtung des Nutzungszeitraums, so bestehen zu 0,5% der Zeit keine Temperaturdifferenzen zwischen dem Kopf- und Fußbereich. Mit einem Anteil von 82,3% fällt die Temperatur mit durchschnittlich 0,26 K im Fußbereich höher aus und ist daher nicht als Beeinträchtigung der Behaglichkeit zu werten, weil höhere Temperaturen im Fußbereich allgemein nicht als störend empfunden werden. Lediglich zu 17,3% der Zeit wurde mit durchschnittlich 0,32 K im Kopfbereich eine höhere Temperatur gemessen. Im Falle höherer Temperaturen im Kopfbereich wurde eine maximale Temperaturdifferenz von 1,81 K ermittelt. Vertikale Temperaturdifferenzen unter 2,0 K können jedoch hohe Erwartungen an die thermische Umgebung erfüllen. Folglich besteht aufgrund vertikaler Temperaturdifferenzen im Rang keine Gefahr der lokalen thermischen Unbehaglichkeit. Im Vergleich zum stationären Messtorso im Parkett ist festzuhalten, dass ebenfalls geringe durchschnittliche Temperaturdifferenzen vorliegen. Ein Unterschied zeigt sich jedoch bei der Verteilung der Messwerte, da im Parkett ein deutlich größerer Anteil für höhere Temperaturen im Kopfbereich besteht. Trotz Feststellung, dass vertikale Temperaturdifferenzen im Rang nicht zu Problemen führen, erfolgt zur weiteren Untersuchung der thermischen Gegebenheiten im Zuschauersaal eine Differenzierung zwischen den Nutzungszuständen. Es wird sichtbar, dass bei Unterscheidung zwischen Leerstands- und Vorstellungszeiten nur minimale Veränderungen bei der Verteilung der Messwerte erfolgen. Unabhängig davon, ob höhere Temperaturen im Kopf- oder Fußbereich vorliegen, verändern sich ebenso die durchschnittlichen Temperaturdifferenzen kaum. Stellt man die Ergebnisse der Auswertung für den stationären Messtorso entgegen, zeigt sich, dass im Parkett eine deutliche Verschiebung der Verteilung der Messwerte stattfindet, im Rang jedoch nicht. Starke Unterschiede in der Verteilung der Messwerte zeigen sich allerdings bei einer getrennten Betrachtung der Heiz- und der Kühlperiode. In der Kühlperiode sinkt der Anteil der Messwerte, bei denen höhere Temperaturen im Fußbereich auftreten, im Nutzungszeitraum auf 59,6%. In der Heizperiode liegen dagegen mit 98,6% fast ausschließlich höhere Temperaturen im Fußbereich vor. Darüber hinaus besteht in der Kühlperiode ein großer Unterschied zwischen Leerstands- und Nutzungszeitraum. Während der Anteil an Messwerten mit höheren Temperaturen im Fußbereich im Nutzungszeitraum auf 59,6% sinkt, liegt dieser im Leerstand bei 82,8%. Neben der Verteilung der Messwerte erfolgt bei Differenzierung nach Heiz- und Kühlperiode auch eine Veränderung der durchschnittlichen Temperaturdifferenz. In der Heizperiode ist sie mit 0,15 K gegenüber der Kühlperiode mit 0,32 K geringer. Sowohl im Parkett als auch im Rang fallen die Temperaturdifferenzen in der Heizperiode niedriger aus und der Anteil der Messwerte, die im Fußbereich höhere Temperaturen zeigen, steigt. Insbesondere in der Kühlperiode wird der Luftaustausch während der Vorstellungen stark erhöht, um Wärmelasten abzuführen. Gegenüber der Ausgangstemperatur im Zuschauersaal ist die eingebrachte Luft in den meisten Fällen deutlich kühler. Da die Einbringung über die Rückenlehnen der Vordersitze erfolgt, findet zuerst eine Anströmung des Kopfbereichs statt, sodass in diesem Bereich geringere Temperaturen vorliegen. Im Heizfall ist die Temperaturdifferenz zwischen Ausgangstemperatur des Zuschauersaals und der Temperatur der Zuluft geringer, sodass es zu einer Reduzierung der durchschnittlichen Temperaturdifferenz kommt.
Ergänzend zu der Bewertung einzelner Einflussfaktoren

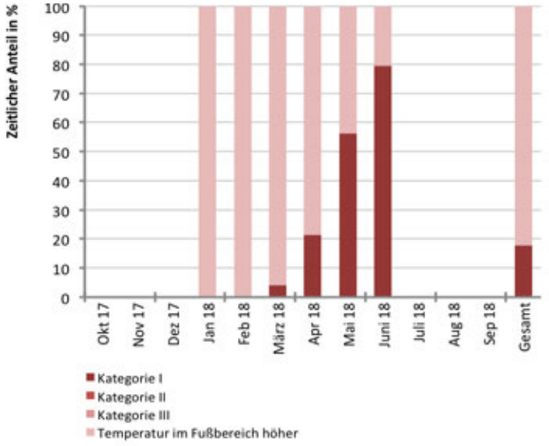

Abb. 394 Kategorisierung der vertikalen Temperaturdifferenz während des Messzeitraums

auf die thermische Behaglichkeit erfolgte eine Einschätzung der gesamtthermischen Empfindung über den Predicted Mean Vote (PMV). Der für die Berechnung verwendete Tätigkeitsgrad sowie die Bekleidungsfaktoren entsprechen den Angaben unter [11.4.1.1]. Der PMV liegt im gesamten Messzeitraum bei -0,01 und entspricht damit einer nahezu thermisch neutralen Umgebung. Eine Differenzierung nach Nutzungszuständen ergab, dass im Leerstandszustand kein Unterschied zum Gesamtdurchschnitt von -0,01 besteht. Im Gegensatz dazu findet während den Vorstellungen mit einem PMV von 0,13 eine leichte Entfernung vom thermischen Neutralitätspunkt in Richtung einer Empfindung der thermischen Umgebung als „etwas warm“ statt. Die Spannweite der ermittelten PMVs zu Vorstellungszeiten liegt zwischen -0,65 und 0,75, was einer vorhergesagten Empfindung von nahezu „etwas kühl“ bis „etwas warm“ entspricht. Erfolgt eine Betrachtung des zeitlichen Anteils, in denen die thermische Umgebung eher als warm, bzw. als kühl empfunden wird, so liegt dieser bei 59,7% gegenüber 39,6%. Tendenziell wird die Umgebung also öfter als „eher warm“ angesehen. Verglichen mit den berechneten PMVs im Parkett, bewegen sich diese im Rang dichter um die thermische Neutralität.
Die Kategorisierung der berechneten PMVs innerhalb der Vorstellungszeiten ergibt einen Anteil von 46,8% in Kategorie I, 50,8% in Kategorie II und 2,5% in Kategorie III. PMVs außerhalb der Kategorien wurden nicht ermittelt, sodass auf Basis der Berechnung die thermische Umgebung normalen Ansprüchen gerecht wird. Verglichen mit der Einordnung der thermischen Umgebung auf Basis der Lufttemperatur als maßgeblicher Einflussfaktor auf die gesamtthermische Empfindung fällt die Bewertung über den PMV positiver aus, da der Anteil der Werte, die keiner Kategorie zugeordnet werden können, auf Null gesunken ist. Auch die Gegenüberstellung mit der Kategorisierung der vorhergesagten thermischen Empfindung im Parkett macht sichtbar, dass diese im Rang besser ausfällt. Zur

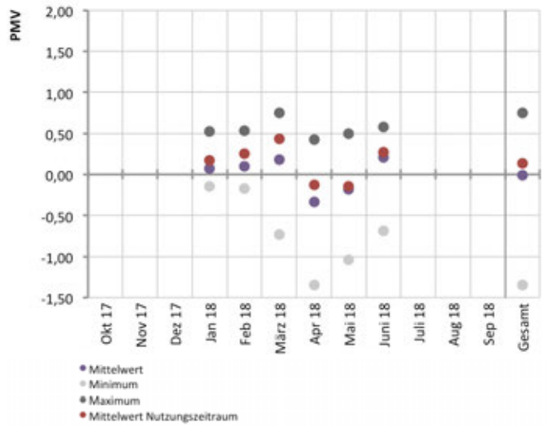

Abb. 395 Durchschnittliches PMV während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals

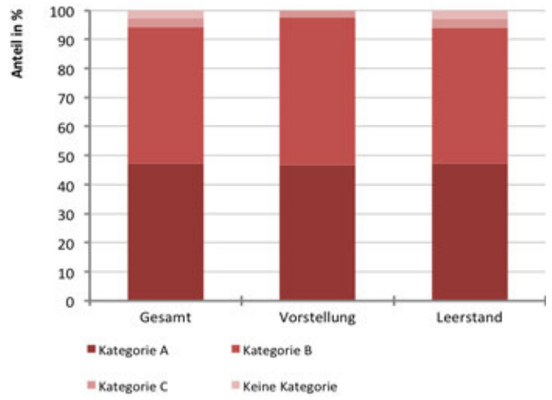

Abb. 396 Kategorisierung der Predicted Mean Votes im Rang des Zuschauersaals

weiteren Analyse wurden die durchschnittlichen PMVs in den Monaten der Messungen einzeln betrachtet. Hier zeigte sich, dass im März 2018 mit 0,44 der höchste Wert auftrat, während er im Mai 2018 mit -0,14 am niedrigsten war. Insgesamt zeigt sich jedoch eine verhältnismäßig geringe Spannweite ohne Extreme. Ein Vergleich zwischen dem durchschnittlichen PMV in der Heiz- und der Kühlperiode verdeutlicht, dass innerhalb der Kühlperiode mit -0,08 die Umgebung als nahezu thermisch neutral angesehen werden kann. In der Heizperiode liegt der PMV dagegen bei 0,28 und entspricht somit einer thermisch neutralen Empfindung mit einer Tendenz zu „eher warm“. Hier sind sowohl im Rang als auch im Parkett die gleichen Tendenzen in der Heiz- und Kühlperiode vorhanden. Auf Basis der vorherrschenden Bedingungen ist zu erwarten, dass 5,0% bis maximal 16,9% der Zuschauer mit den vorliegenden Bedingungen unzufrieden sind.
Abschließend lässt sich festhalten, dass das Auftreten lokaler thermischer Unbehaglichkeit im Rang des Zuschauersaals nicht zu erwarten ist. Hohe vertikale Temperaturdifferenzen konnten nicht festgestellt werden. Auch die Luftgeschwindigkeiten bewegen sich überwiegend in einem annehmbaren Bereich. Nur vereinzelt wurden hier Messwerte außerhalb des Behaglichkeitsbereichs erfasst. Auch für die gesamtthermische Empfindung wurde festgestellt, dass sowohl die gemessenen Lufttemperaturen als auch die berechneten PMVs keine extremen Empfindungen erwarten lassen. Die relative Luftfeuchte ist oftmals sehr gering, da ein großer Anteil den empfohlenen Grenzwert von 30% unterschreitet. Gemäß der Kategorisierung entfallen jedoch Messwerte bis 20% noch auf Kategorie III, sodass dennoch nur wenige Messwerte außerhalb der Kategorien liegen. Gegenüber den Bedingungen im Parkett sind die durchschnittlichen Temperaturen während den Vorstellungen zwar im Rang minimal höher und die relative Luftfeuchte nahezu gleich, jedoch sind Luftgeschwindigkeit und Temperaturdifferenzen geringer.

11.4.2 Raumkomfort im Foyer

Das Foyer ist ein zentraler Bestandteil eines Theaters, da es im Vorfeld, in den Pausen und auch im Anschluss an die Vorstellungen dem Aufenthalt der Besucher dient. Die Nutzungszeiten des Foyers lassen sich somit in Abhängigkeit zu den Vorstellungszeiten definieren, indem ein einstündiger Vorlauf sowie Nachlauf berücksichtigt wird. In der übrigen Zeit bleibt das Foyer überwiegend ungenutzt. Um während der Nutzungszeiten, zu denen hohe Belegungsdichten vorliegen, angenehme Behaglichkeitsbedingungen zu schaffen, wird das Foyer mechanisch belüftet. Über die Zuluft wird auch ein Teil der benötigten Wärmeenergie zugeführt, der verbleibende Anteil wird durch Konvektoren übergeben [siehe 9.3.4.1]. Eine Kühlung im Foyer erfolgt nicht. Zur Überprüfung der vorliegenden Behaglichkeitssituation wurden mittels des Messtorsos von April 2018 bis September 2018 Messwerte erfasst. Hierzu wurde der Messtorso

	Temperatur				Luftgeschwindigkeit	
	Heizperiode		Kühlperiode		Heizperiode	Kühlperiode
	von	bis	von	bis		
Kategorie I	17,5°C	20,5°C	22,0°C	24,0°C	< 0,13 m/s	< 0,16 m/s
	21,0°C	*23,0°C*	*23,5°C*	*25,5°C*	*< 0,10 m/s*	*< 0,12 m/s*
Kategorie II	16,0°C	22,0°C	21,0°C	25,0°C	< 0,15 m/s	< 0,20 m/s
	20,0°C	*24,0°C*	*23,0°C*	*26,0°C*	*< 0,16 m/s*	*< 0,19 m/s*
Kategorie III	15,0°C	23,0°C	20,0°C	26,0°C	< 0,18 m/s	< 0,23 m/s
	19,0°C	*25,0°C*	*22,0°C*	*27,0°C*	*< 0,21 m/s*	*< 0,24 m/s*

Raumtyp Hör- bzw. Zuschauersaal mit Energieumsatz von 1,2 met
Raumtyp Kaufhaus mit Energieumsatz von 1,6 met

Abb. 390 Bewertungskriterien für den angewendeten Raumtypen nach DIN EN 15251 [36]

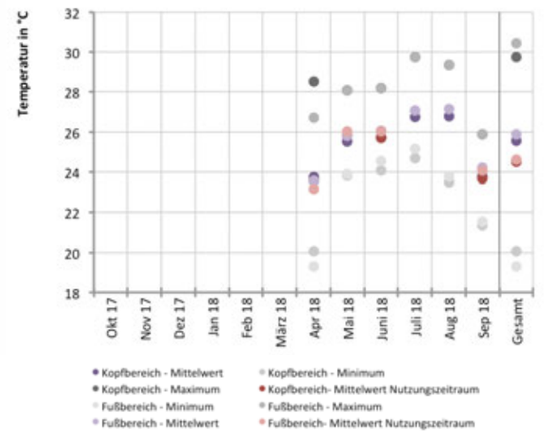

Abb. 397 Lufttemperatur des Foyers im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums

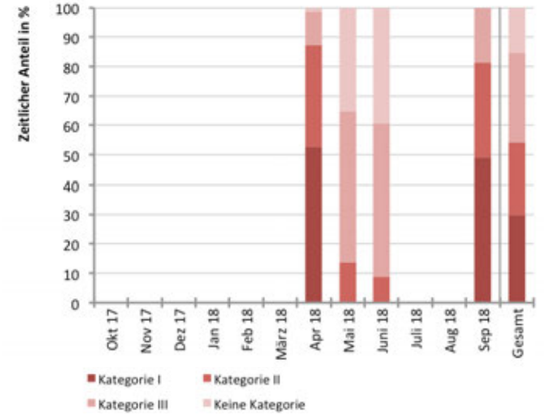

Abb. 398 Kategorisierung der Lufttemperatur während des Messzeitraums im Foyer

im stehenden Zustand [siehe 4.1.3.2] zentral im Foyer aufgebaut.

Im Gegensatz zu den bisherigen Auswertungen zum Raumkomfort im Zuschauersaal muss im Folgenden der gesteigerte Tätigkeitsgrad der Nutzer berücksichtigt werden, der zu einem erhöhten Energieumsatz führt. Nach DIN EN ISO 7730 entspricht eine „Stehende, leichte Tätigkeit“ einem Energieumsatz von 1,6 met, sodass andere Gestaltungskriterien für die Auswertung zu Grunde gelegt werden müssen. In Anlehnung an die „Beispiele für Gestaltungskriterien für Räume in unterschiedlichen Gebäudetypen“ aus der DIN kann der Gebäudetyp „Kaufhaus“ verwendet werden, da dieser den entsprechenden Energieumsatz aufweist. Somit bestehen im Foyer im Vergleich zum Zuschauersaal andere Behaglichkeitsbereiche für Temperatur und Luftgeschwindigkeit.

Die Lufttemperatur ist in den meisten Fällen das ausschlaggebende Kriterium für die thermische Behaglichkeit. Während des Messzeitraums wurde die Lufttemperatur im Kopf- sowie Fußbereich erfasst und weisen mit 25,6°C gegenüber 25,9°C ähnliche Durchschnittswerte auf. Für den Sommerfall, der im Messzeitraum vorliegt, befinden sich die Durchschnittswerte innerhalb der Behaglichkeitsbereiche. Die Maximalwerte von 29,7°C im Kopfbereich und 30,4°C im Fußbereich zeigen jedoch, dass die thermische Empfindung zwischenzeitlich zu hoch sein könnte. Ebenso wie die Durchschnittstemperatur fällt auch die Maximaltemperatur im Fußbereich etwas höher aus. Dies lässt sich darüber erklären, dass die Einbringung der Zuluft, die im Sommerfall kühler als die Raumluft ist, über die Decke erfolgt. Bei Auswertung der Minima ergeben sich Werte von 20,1°C im Kopfbereich und 19,3°C im Fußbereich. Für die Bewertung des thermischen Umgebungsklimas ist vor allem der Nutzungszeitraum relevant, weshalb zwischen Nutzungs- und Leerstandszeitraum unterschieden werden muss. Die Analyse der jeweiligen Durchschnittstemperaturen zeigt, dass diese im Leerstandszeitraum sowohl im Kopf- als auch im Fußbereich höher ausfallen. Während sie für den Nutzungszeitraum im Kopfbereich bei 24,5°C liegt, beträgt die Durchschnittstemperatur im Leerstandszeitraum 25,6°C.

In den bisherigen Auswertungen zum thermischen Raumkomfort ergaben sich während der Nutzungszeiträume aufgrund der internen Lasten höhere Lufttemperaturen. Die umgekehrten Erkenntnisse lassen sich zum einem auf den Messzeitraum und zum anderen auf die architektonische Ausprägung des Foyers zurückführen. Der Messzeitraum für das Foyer umfasst die Sommermonate inklusive der Spielpause, während bei der Querschnittserhebung überwiegend Messungen während der Spielzeit im Heizfall erfolgten. In der Spielpause ist das Theater ungenutzt, weshalb eine durchgängige Abschaltung der Lüftungsanlagen stattfindet. Im Gegensatz zu den Zuschauersälen, die mit Ausnahme des Scharoun Theaters Wolfsburg über keine Fensterflächen verfügen, besitzt das Foyer große Verglasungsanteile Richtung Nordosten. Die so entstehenden solaren Lasten können zumindest während der Spielpause aufgrund der unterbundenen Luftzirkulation nicht abgeführt werden, sodass es zu einer Aufheizung des Bereichs kommt. Dies spiegelt sich auch in der Betrachtung der monatlichen Durchschnittstemperaturen wieder. Hier liegen in den Monaten Juli 2018 und August 2018 deutlich höhere Werte als in den übrigen Monaten vor. Auch der prozentuale Anteil der Temperaturen, die mit mehr als 26°C die Behaglichkeitsgrenzen überschreiten, ist mit 70,5% im August 2018 und 72,4% im Juli 2018 besonders hoch. Erfolgt auch hier eine Fokussierung auf den Nutzungszeitraum, so liegen Überschreitungen der Behaglichkeitsgrenzen vor. Unter Einbeziehung des gesamten Messzeitraums beträgt der Anteil 15,4%. Durch die Betrachtung der Überschreitungen in den einzelnen Monaten der Messungen wird die starke Abhängigkeit zu den Außenlufttemperaturen deutlich. Besonders hervorzuheben sind hier die Monate Mai 2018 und Juni 2018, die sehr hohe maximale Außenlufttemperaturen zeigen und in denen zu mehr als zwei Dritteln der Zeit die Behaglichkeitsgrenzen überschritten werden. Zur Bestimmung, wie die thermische Umgebung während des Nutzungszeitraums einzuordnen ist, erfolgt eine Kategorisierung der gemessenen Lufttemperaturen. Durch den hohen Anteil von Messwerten, der die Behaglichkeitsgrenzen überschreitet, können im Foyer keine Erwartungen an die thermische Umgebung erfüllt werden. Es ist somit anzunehmen, dass zumindest zeitweise bei den Besuchern diesbezüglich Unzufriedenheit vorliegt.

Als weiteres Kriterium zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit und auch der Luftqualität wurde die relative Luftfeuchte erfasst. Die jeweiligen Mittelwerte von 37,0% im Kopfbereich sowie 37,8% im Fußbereich unterscheiden sich ebenso wie die Lufttemperaturen kaum voneinander, deuten jedoch auf annehmbare Bedingungen bezüglich der relativen Luftfeuchte hin. Die Maximalwerte in Höhe von 62,8% im Kopf- und 67,0% im Fußbereich zeigen jedoch zumindest eine zeitweise Überschreitung des empfohlenen Grenzwerts von 65%. Erfolgt hier eine Betrachtung der Häufigkeit des Auftretens, so wurden entsprechende Messwerte nur im September 2018 erfasst, sodass der Anteil dieser am Gesamtzeitraum lediglich 0,2% beträgt. Ebenso wie die Mittelwerte unterscheiden sich die Minimalwerte der beiden Bereiche nur geringfügig, da diese bei 16,8%, bzw. 16,1% liegen. Die Minimalwerte unterschreiten somit den unteren empfohlenen Grenzwert von 30%, unter dem die Trockenheit der Luft als unangenehm empfunden werden kann [siehe 5.5.1.2]. Auch im Fall der relativen Luftfeuchte ist vor allem der Nutzungszeitraum relevant. Währenddessen besteht ein Mittelwert von 34,2% im Kopfbereich, der somit unter dem Mittelwert des Gesamtzeitraums liegt. Tendenziell ist die relative

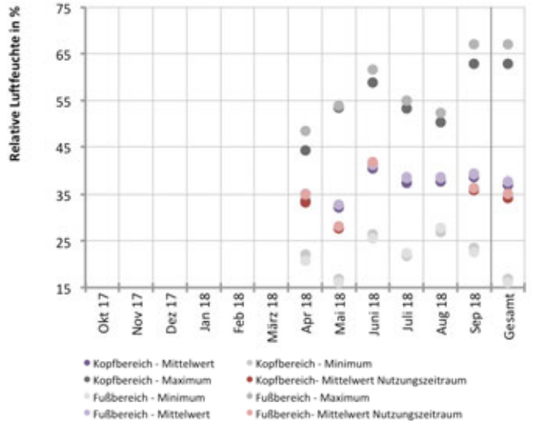

Abb. 399 Relative Luftfeuchte im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Foyer

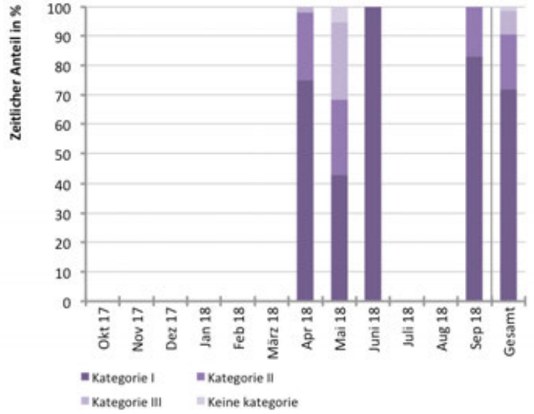

Abb. 400 Kategorisierung der relativen Luftfeuchte während des Messzeitraums im Foyer

Luftfeuchte folglich im Nutzungszeitraum geringer als im ungenutzten Zustand.
Anhand der unteren Behaglichkeitsgrenze von 30% zeigt sich, dass diese zu 15,2% der Zeit unterschritten wird. Erfolgt eine weitere Einordnung der Messwerte in die Behaglichkeitskategorien nach [5.5.1.2], so können 72,0% Kategorie I zugeordnet werden. Dagegen beinhalten Kategorie II 18,6% und Kategorie III 7,9% der Messwerte. Da im Hinblick auf die Definition der Kategorien erst relative Luftfeuchten unter 20% als unzumutbar eingestuft werden, befinden sich lediglich 1,5% der Messwerte außerhalb der Kategorien. Somit können für die relative Luftfeuchte moderate Anforderungen an das Raumklima bedient werden.
Neben der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte spielt auch die Luftgeschwindigkeit für das thermische Empfinden eine Rolle. Das gesamtthermische Empfinden kann erheblich beeinträchtigt werden, wenn lokale thermische Unbehaglichkeiten vorliegen, die durch Zugluft hervorgerufen werden. Während des Messzeitraums wurden sowohl im Kopf- als auch im Fußbereich zeitweise ruhende Luftschichten gemessen. Ein Unterschied wird jedoch bei den Maximalwerten sichtbar, da dieser im Kopfbereich mit 0,45 m/s leicht höher ausfiel als im Fußbereich mit 0,43 m/s. Dagegen liegt der Mittelwert in Höhe von 0,10 m/s im Fußbereich deutlich über dem des Kopfbereichs mit 0,03 m/s. Auch bezüglich der Zugluft muss vornehmlich der Nutzungszustand berücksichtigt werden. Ein Vergleich zwischen den Mittelwerten des Nutzungs- und Leerstandszeitraums zeigt, dass hier kaum Unterschiede bestehen. Lediglich im Nackenbereich liegen mit 0,04 m/s durchschnittlich leicht erhöhte Luftgeschwindigkeiten vor. Diese können auf die Bewegungen der Besucher oder auch die verstärkte Einbringung der Zuluft zurückgeführt werden. Da im Nackenbereich eine größere Empfindlichkeit gegenüber Zugerscheinungen als im Fußbereich besteht, werden für die nachfolgende

Kategorisierung die Messwerte des Nackenbereichs herangezogen. Im Nutzungszeitraum können 96,8% der Messwerte Kategorie I zugeordnet werden. Der verbleibende Anteil entfällt überwiegend auf Kategorie II, sodass hier hohe Erwartungen erfüllt werden können und im Foyer keine Beeinträchtigung aufgrund von Zugerscheinungen zu erwarten sind.
Ebenso wie Zugerscheinungen können auch vertikale Temperaturunterschiede zwischen Kopf- und Fußbereich zur lokalen thermischen Unbehaglichkeit führen. Betrachtet man die vorliegenden Messwerte über den gesamten Messzeitraum, so bestehen zu 14,5% keine Temperaturdifferenzen. Der größte Anteil mit 59,6% enthält Messwerte, bei denen die Temperatur im Fußbereich höher als im Kopfbereich ausfällt. Die durchschnittliche Temperaturdifferenz beträgt 0,34 K. Dieser Anteil ist, im Gegensatz zum umgekehrten Fall, jedoch nicht als Beeinträchtigung der Behaglichkeit zu bewerten, da höhere Temperaturen im Fußbereich nicht als unangenehm empfunden werden. Daher muss besonders der verbleibende Anteil von 25,9%, bei dem die Temperatur im Kopfbereich die Temperatur des Fußbereichs durchschnittlich um 0,26 K übersteigt, untersucht werden. Im Nutzungszeitraum beträgt die maximale Temperaturdifferenz 4,7 K und überschreitet somit den Anforderungswert von Kategorie III. Erfolgt jedoch eine Einordnung der gesamten Messwerte in die Kategorien, so zeigt sich, dass neben dem Anteil von 59,5% der Werte, bei denen die Temperatur des Fußbereichs die des Kopfbereichs überschreitet, die verbleibenden 40,5% in Kategorie I eingeordnet werden können. Somit stellt die maximale Temperaturdifferenz eine Ausnahme dar. Mit den vertikalen Temperaturdifferenzen lässt sich der vorhergesagte Anteil an Unzufriedenen mit der vorherrschenden Situation ermitteln. Da er durchschnittlich lediglich 0,2% beträgt, besteht keine Beeinträchtigung der lokalen thermischen Behaglichkeit durch vertikale Temperaturdifferenzen. Als Alternative zur vereinfachten Bewertung

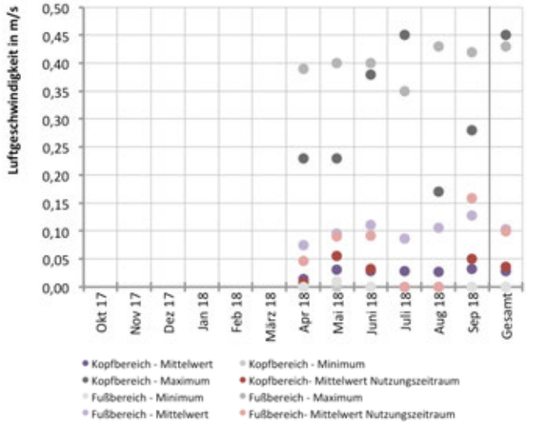

Abb. 401 Luftgeschwindigkeit im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Foyer

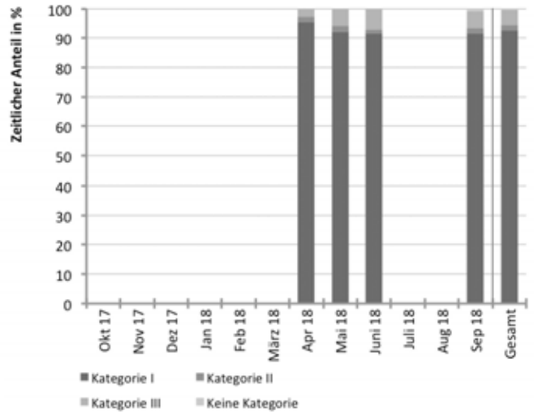

Abb. 402 Kategorisierung der Luftgeschwindigkeit während des Messzeitraums im Foyer

der einzelnen, die Empfindung der thermischen Umgebung beeinflussenden Parameter anhand der Behaglichkeitsbereiche kann auch die Berechnung des Predicted Mean Votes (PMV) erfolgen [siehe 5.5.1.2]. Zur Berechnung des PMV sind neben physikalischen Angaben zum Raumklima auch Informationen zum Tätigkeitsgrad und zur Bekleidung notwendig. Da es sich beim Messzeitraum um den Sommerfall handelt, wurde für die Berechnungen ein Bekleidungsfaktor von 0,5 clo angesetzt. Das berechnete PMV liegt während des gesamten Messzeitraums bei durchschnittlich 0,81 und zeigt somit eine Tendenz zu einer voraussichtlichen Bewertung des Umgebungsklimas als „eher warm". Wird der Betrachtungszeitraum auf die tatsächliche Nutzungsdauer des Foyers reduziert, so nähert sich das mittlere PMV mit 0,5 wieder stärker dem Neutralitätspunkt an. Erfolgt jedoch eine genauere

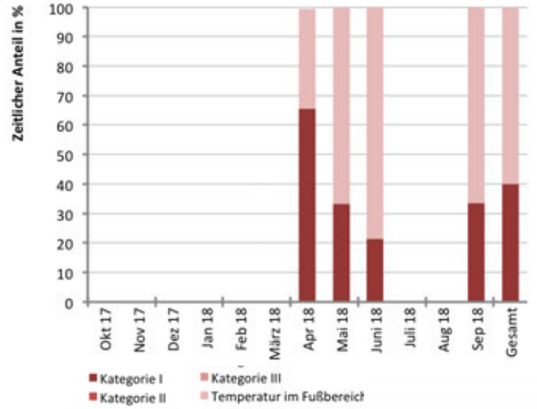

Abb. 403 Kategorisierung der vertikalen Temperaturdifferenz während des Messzeitraums im Foyer

Analyse der ermittelten PMVs, weisen diese eine Spannweite von -0,35, entsprechend einer thermischen Empfindung von tendenziell „neutral" bis „etwas kühl", bis 1,19 auf, was als „etwas warm" bis „warm" zu bewerten ist. Eine Betrachtung der monatlichen Verteilung ergibt, dass vorhergesagte thermische Empfindungen des Umgebungsklimas „eher kühl" nur bis Mitte April 2018 auftreten. In den übrigen Monaten besteht eine Tendenz zur Empfindung des Umgebungsklimas als „eher warm". Die Gegenüberstellung der jeweiligen prozentualen Anteile für Kälte- und Wärmeempfinden zeigt, dass im Nutzungszeitraum zu 87,9% der Zeit eher Unbehaglichkeit aufgrund zu hoher thermischer Empfindung vorliegt, da nur 12,1% der Messwerte ein Kälteempfinden erwarten lassen. Auf Basis des mittleren PMVs ergibt sich ein vorhergesagter Anteil an Personen, die mit dem vorliegenden Umgebungsklima unzufrieden sind (PPD), von 13,3%. Die Spannweite liegt zwischen einem minimalen Anteil von 5% und einem Maximalwert von 34,8%. Sowohl anhand der PMVs als auch mit PPD ist eine Kategorisierung der vorliegenden thermischen Raumsituation möglich. Da mit 37,7% der Messwerte ein großer Anteil keiner Kategorie zugeordnet werden kann, gilt keine der Kategorien als erfüllt. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem Resultat als der vereinfachten Bewertung der Lufttemperatur, bei der auch keine der Kategorien als erfüllt angesehen werden kann. Eine Gegenüberstellung der Kategorisierung zeigt jedoch, dass in diesem Fall die Bewertung der raumklimatischen Bedingungen mit PMV negativer ausfällt. Lag der Anteil der Messwerte, die keiner der Kategorien zugeordnet werden konnte, bei der vereinfachten Bewertung anhand der Lufttemperatur bei 15,4%, so fällt dieser bei Beurteilung des PMVs mit 37,7% mehr als doppelt so hoch aus. Insgesamt besteht in Hinblick auf die thermische Umgebung im Sommerfall Verbesserungspotential.

Zur Beurteilung der Raumluftqualität können die CO_2-Konzentrationen in der Raumluft herangezogen werden. Mit durchschnittlich 445 ppm wurde insgesamt eine geringe CO_2-Konzentration gemessen, die nur wenig über einer üblichen Außenluftkonzentration von 400 ppm liegt. Der geringste Wert wurde mit lediglich 408 ppm erfasst wohingegen das Maximum bei 1036 ppm lag. Das Maximum verdeutlicht, dass die Grenze zu hygienisch auffälligen CO_2-Konzentrationen von 1000 ppm nur geringfügig überschritten wurde. Somit wird bereits hier sichtbar, dass die Raumluftqualität wahrscheinlich als hygienisch undenklich einzustufen ist. Wie bereits bei den betrachteten Parametern zur thermischen Behaglichkeit, ist auch für die Raumluftqualität der Nutzungszeitraum ausschlaggebend. Auch hier ergibt sich lediglich ein Mittelwert von 502 ppm. Dieser ist somit, bedingt durch den CO_2-Ausstoß der Besucher, etwas höher als der gesamtdurchschnittliche Wert. Erfolgt eine Bewertung der Messwerte anhand der Raumluftkategorien [siehe 5.5.1.1], so können 99,8% in IDA I eingeordnet werden und erfüllen somit eine hohe Luftqualität. Unter [11.4.2.2] werden CO_2-Konzentrationen ausgewertet, die mit einer Messbox in der Garderobe erfasst wurden. Die Garderobe, in der die Absaugung der Abluft erfolgt, steht im direkten Luftverbund mit dem Foyer, sodass ein Vergleich der Ergebnisse sinnvoll erscheint. Der für die Messbox berechnete Mittelwert, der ausschließlich den Messzeitraum des Messtorsos im Foyer sowie den Nutzungszeitraum berücksichtigt, beträgt 671 ppm. Eine Gegenüberstellung der Messwerte des Messtorsos mit denen der Messbox hat ergeben, dass die im Bereich der Garderobe erfassten CO_2-Konzentrationen um durchschnittlich 178 ppm höher ausfallen und zu 99,9% der Zeit auch über denen des Messtorsos liegen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im Foyer des Scharoun Theater Wolfsburg während des Messzeitraums und innerhalb der Nutzungszeit keine großen Beeinträchtigungen durch lokale thermische Unbehaglichkeiten, weder bezogen auf Zugluft noch

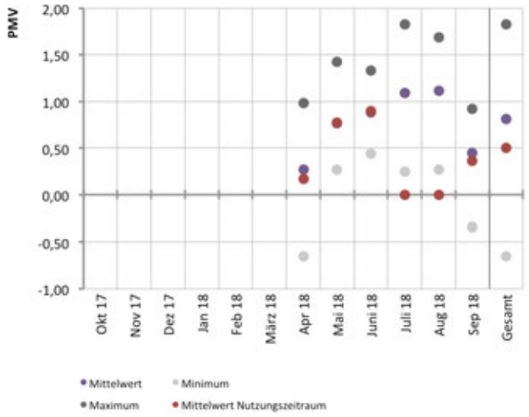

Abb. 405 Durchschnittliches PMV während des Messzeitraums im Foyer

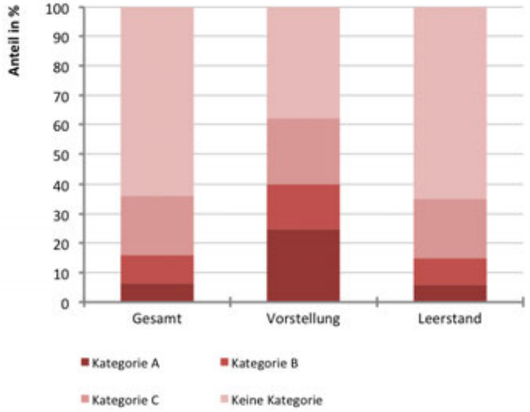

Abb. 404 Kategorisierung der Predicted Mean Votes im Foyer

auf vertikale Temperaturdifferenzen, bestehen. Auch die relative Luftfeuchte befindet sich überwiegend in einem annehmbaren Bereich genauso wie die CO_2-Konzentration, was auf eine hohe Raumluftqualität schließen lässt. Lediglich die Lufttemperaturen üben einen negativen Einfluss auf den Raumkomfort aus und könnten im Sommerfall verringert werden. Eine Reduzierung der Lufttemperaturen ist möglicherweise jedoch unter den vorliegenden Bedingungen nur schwierig umsetzbar. Die großzügige Verglasung des Foyers wurde im Zuge der Sanierung unter Gesichtspunkten des Denkmalschutzes erneuert, eine Verschattung durch entsprechende Systeme ist aufgrund des architektonischen Erscheinungsbilds ausgeschlossen und eine Möglichkeit zur mechanischen Kühlung des Foyers besteht nicht. So könnte nur eine Erhöhung der Luftwechselraten bei niedrigeren Außenlufttemperaturen zur Verringerung der Lufttemperaturen beitragen.

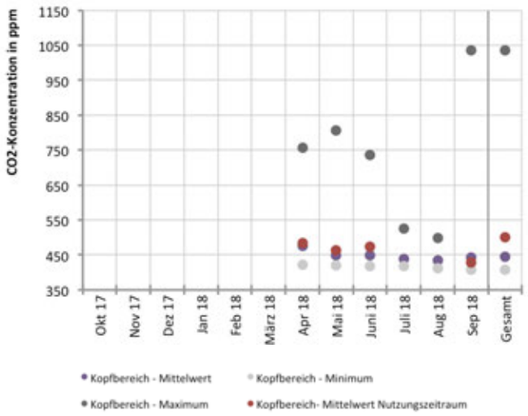

Abb. 400 Raumluftqualität während des Messzeitraums im Foyer

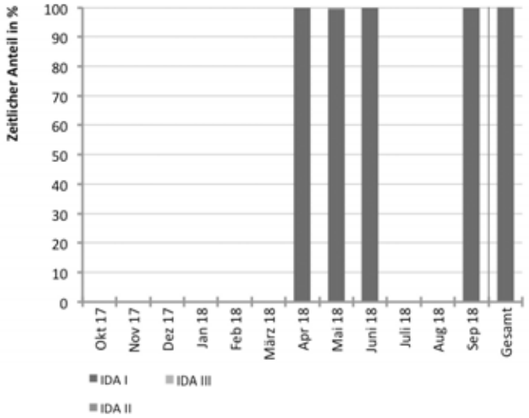

Abb. 401 Kategorisierung der Raumluftqualität während des Messzeitraums im Foyer

11.4.3 Raumkomforts in einem beispielhaften Büroraum

Neben den theaterspezifischen Zonen, welche den Theatersaal, das Foyer und die Probebühne umfassen, wurde auf Bitte der Mitarbeiter des Theaters auch ein Büroraum mit einer Messbox ausgestattet. Diese äußerten Unmut über die „schlechte Luft“ in ihren Arbeitsräumen. Diese Äußerungen wurden mit der Messbox überprüft. Bei dem untersuchten Büroraum V/EG 28 handelt es sich um einen 21,71 m^2 großen Raum mit einem Luftvolumen von 62,96 m^3, in dem 3 Arbeitsplätze vorgesehen sind. Er verfügt über ein nach Nord-Osten ausgerichtetes Fensterband und wird über Heizkörper und Fensterlüftung konditioniert. Die Messung dauerte von Oktober 2017 bis September 2018 an, sodass ein Zeitraum über ein gesamtes Jahr ausgewertet werden konnte. Die Nutzungszeiten im Verwaltungsbereich von Theaterspielstätten sind flexibler gestaltet als die Zeiten in typischen Büroräumen. Als Kernarbeitszeiten wurde jedoch an Wochentagen ein Zeitraum von 8.00 Uhr bis 17.00 Uhr identifiziert. Des Weiteren wurden die Theaterferien von Juli bis Mitte August berücksichtigt, in denen überwiegend in den Büroräumen nicht gearbeitet wird.

Zur Beurteilung der Luftqualität wurden die Messwerte zur CO_2-Konzentration betrachtet. Für den gesamten Messzeitraum wurden Werte zwischen 382 ppm und 2000 ppm erfasst, sodass sich eine Spannweite von 1619 ppm ergibt. Da der Messbereich des CO_2-Sensors auf 2000 ppm begrenzt ist, war zu befürchten, dass die tatsächlich im Raum auftretende CO_2-Konzentration diesen Wert noch überschreitet. Auf Basis dieser Messwerte lässt sich bereits sagen, dass die CO_2-Konzentration im Raum zumindest zeitweise eine hygienisch inakzeptable Situation zeigt.

Der Mittelwert während der definierten Nutzungszeiten liegt bei 822 ppm und ist damit gegenüber dem ungenutzten Zeitraum um 111 ppm erhöht. Eine Betrachtung der CO_2-Konzentration in Abhängigkeit der Monate verdeutlicht starke Unterschiede. Die gemessenen Minima sind relativ konstant und

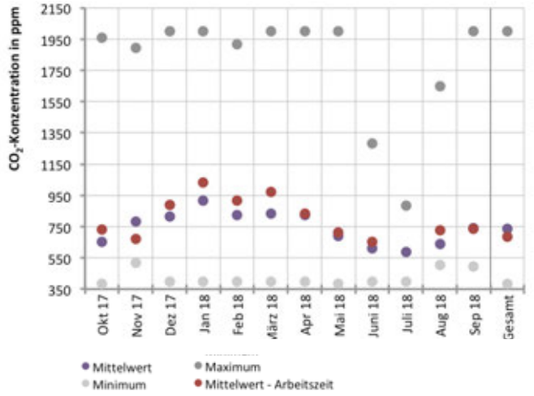

Abb. 406 CO_2-Konzentration im beispielhaften Büroraum während des Messzeitraums

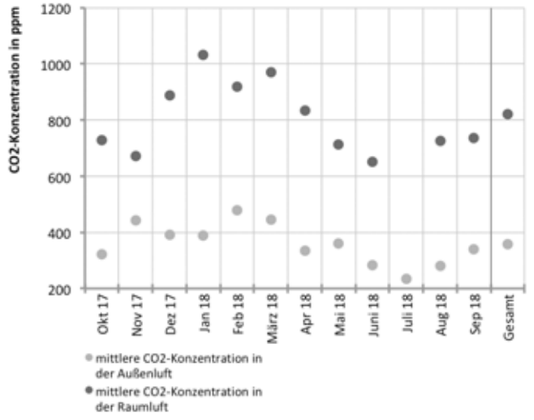

Abb. 407 Zusammenhang zwischen der CO_2-Konzentration in der Raum- und der Außenluft im beispielhaften Büroraum

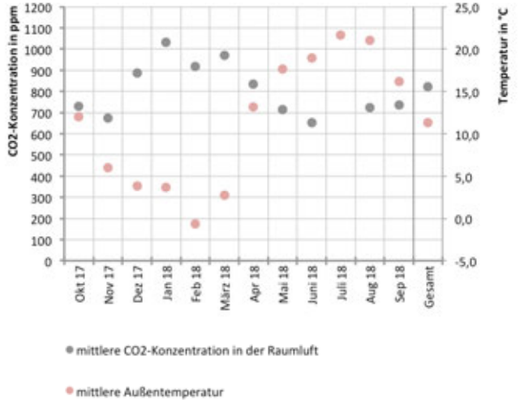

Abb. 408 Zusammenhang zwischen der mittleren CO_2-Konzentration und der mittleren Außenlufttemperatur im beispielhaften Büroraum

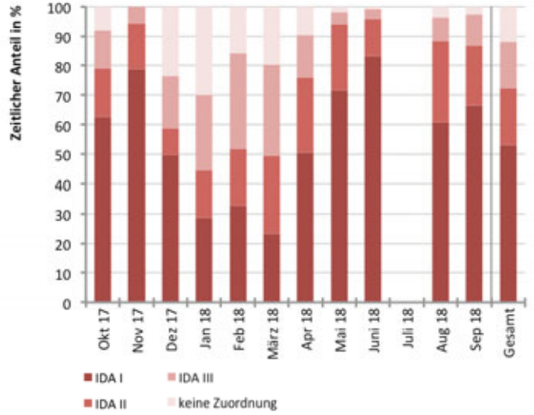

Abb. 409 Kategorisierung der Raumluftqualität anhand der CO_2-Konzentration im beispielhaften Büroraum

bewegen sich um 400 ppm. Sie liegen damit nur wenig über der in der Außenluft erfassten CO_2-Konzentration. Die einzigen Ausnahmen stellen November 2017 und August 2018 dar. Hier überschreiten die minimalen CO_2-Konzentrationen 500 ppm. Stellt man die durchschnittliche monatliche Außenluftkonzentration der durchschnittlichen CO_2-Konzentration im Innenraum gegenüber, so zeigt sich mit einer Korrelation in Höhe von 0,56 ein mittlerer linearer Zusammenhang. Da die Frischluftzufuhr über eine Fensterlüftung erfolgt, ist die CO_2-Konzentration tendenziell höher, wenn sie in der Außenluft steigt.

Die gemessenen Maximalwerte unterschreiten, mit Ausnahme von Juni 2018 und August 2018, in allen anderen Monaten 2000 ppm nicht. Die geringeren Maximalwerte können über mögliche Urlaubszeiten der Mitarbeiter erklärt werden.

Schlüsselt man auch die Mittelwerte während der Nutzungszeit nach Monaten auf, so liegen diese zwischen 652 ppm im Juni 2018 und 1033 ppm im Januar 2018. Die mittlere CO_2-Konzentration korrespondiert direkt mit der mittleren Monatsaußentemperatur. Sichtbar wird dies an der Korrelation von -0,75, die einem starken linearen Zusammenhang entspricht. Je geringer die Außentemperatur, desto höher ist also die mittlere CO_2-Konzentration in der Raumluft. Dies weist darauf hin, dass bei geringeren Außenlufttemperaturen weniger gelüftet wird, sodass das zugeführte Außenluftvolumen nicht ausreichend ist, um eine hygienisch unbedenkliche Situation herzustellen.

Erfolgt nun eine Einordnung der Messwerte in die Kategorien zur Bewertung der Raumluftqualität, so wird deutlich, dass nur zu einem geringen zeitlichen Anteil hohe Ansprüche an die Raumluftqualität bedient werden können. Die Grenze von 800 ppm wird zwischen 16,8% im Juni 2018 und 76,8% März 2018 überschritten. Dies zeigt, dass in keinem Monat IDA I erreicht wurde. Auch einem mittleren Anspruch an die Raumluftqualität kann in vielen Monaten nicht

entsprochen werden. Die Grenze von 1000 ppm und damit zum hygienisch bedenklichen Bereich wird oftmals überschritten. Ausnahmen bilden Mai 2018 und Juni 2018. In allen übrigen Monaten wurden die Anforderungen nicht erreicht. Hier variiert der prozentuale Anteil der Zeit, in der die Anforderung von IDA II nicht erreicht wurden, zwischen 5,6% im November 2017 und 32,3% im Februar 2018, sodass hier mindestens eine geringe Raumluftqualität vorliegt. In den Monaten Dezember 2017 bis April 2018 sowie Oktober 2018 wird auch die Grenze von 1400 ppm zwischen 7,4% im April 2018 und 24,2% im Oktober 2018 überschritten. Dies zeigt, dass selbst IDA III und somit eine geringe Raumluftqualität nicht erreicht wurde. Aufgrund der hohen CO_2-Konzentrationen in der Raumluft, die gesundheitliche Beeinträchtigungen nach sich ziehen können, besteht dringender Handlungsbedarf. Die Zuführung eines hygienisch notwendigen Mindestaußenluftvolumenstroms ist durch das bisherige Lüftungsverhalten nicht gesichert.

Ebenfalls geringe Behaglichkeitsbedingungen werden bei einer Betrachtung der Raumlufttemperaturen sichtbar. Die erfasste Temperaturspanne liegt zwischen 11°C im Dezember 2017, Februar 2018, März 2018 sowie September 2018 bis 33°C im Juli 2018. Die Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen bewegen sich zwischen 17,2°C im Dezember 2018 und 25,1°C im August 2018.

Auch hier besteht, wie durch den Luftaustausch über Fensterlüftung zu erwarten, eine Korrelation mit der Außentemperatur, die 0,98 beträgt und somit einem sehr starken linearen Zusammenhang entspricht.

Da es sich um einen Arbeitsraum handelt, muss bei der Bewertung der vorliegenden Raumlufttemperaturen die Arbeitsstättenrichtlinie berücksichtigt werden. Um den thermischen Komfort am Arbeitsplatz zu bewerten, ist in den meisten Fällen die Betrachtung der Lufttemperatur ausreichend. Diese soll laut Richtlinie 26°C nicht überschreiten. Ansonsten sollen

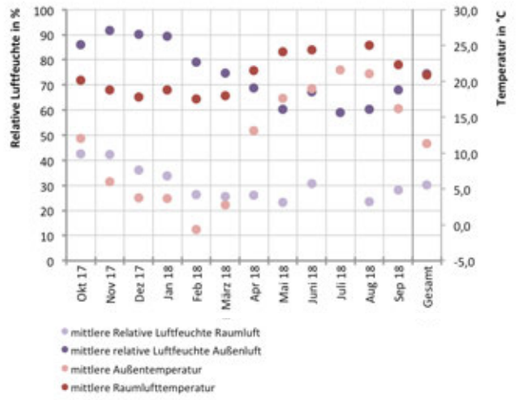

Abb. 411 Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Temperatur der Raum- und Außenluft im beispielhaften Büroraum

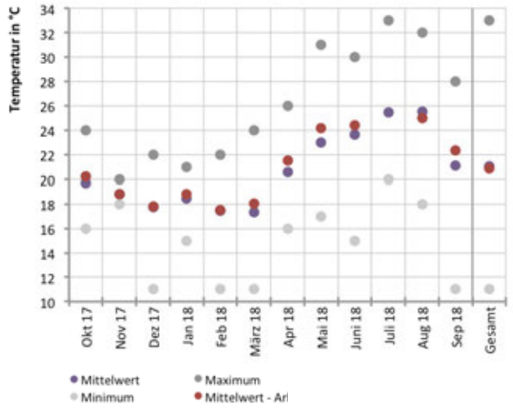

Abb. 410 Raumlufttemperatur während des Messzeitraums im beispielhaften Büroraum

weitere Maßnahmen, wie eine effektive Steuerung des Sonnenschutzes, ergriffen werden. Bei einer Überschreitung von Raumlufttemperaturen über 30°C ist die Ergreifung dieser Maßnahmen verpflichtend und bei Temperaturen über 35°C besteht keine Eignung mehr als Arbeitsraum. Die Überprüfung der Messwerte anhand dieser Kriterien zeigt, dass die Temperaturgrenze von 26°C in einigen Monaten zu einem erheblichen Zeitanteil überschritten wird. Im Mai 2018 beträgt dieser Anteil 33,7%, im Juni 2018 37,6%, im August 2018 49,7% und im September 2018 19,4%. Die 30°C-Grenze wird im Mai 2018 und Juni 2018 überschritten. Auf häufigsten ist dies im Mai 2018 mit 1,5% der Fall. In den Sommermonaten sollten also weitere Maßnahmen ergriffen werden, um eine behaglichere thermische Umgebung zu schaffen.

Anders als bei den anderen betrachteten theaterspezifischen Zonen, bei denen die Messwerte zum Raumkomfort anhand festgelegter Temperaturgrenzen bewertet wurden, muss hier ein anderer Ansatz gewählt werden. Als einziger betrachteter Bereich wird das Büro mit Ausnahme der Heizung nur durch Öffnen und Schließen des Fensters konditioniert. Dies führt dazu, dass nach DIN EN 15251 ein adaptiver Ansatz zur Bewertung angewendet wird. Hierbei wird in Abhängigkeit der Außentemperatur zunächst ein gleitender Mittelwert gebildet, um den anschließend im Abstand von 2K ein Behaglichkeitsbereich definiert wird. Es zeigt sich, dass mit Ausnahme von Juli 2018, der aufgrund der Ferienzeiten nicht bewertet wurde, der zeitliche Anteil der Messwerte außerhalb des Komfortbereichs zwischen 20,2% im April 2018 und 100% im Dezember 2017 beträgt.

Durch eine weitere Aufschlüsselung der Werte außerhalb des Komfortbereichs in einen Anteil über- und unterhalb des Komfortbereichs macht deutlich, dass die Raumlufttemperaturen in den meisten Fällen zu gering erscheinen. Dies gilt zu 100% für Oktober 2017 bis April 2018. Auch im September

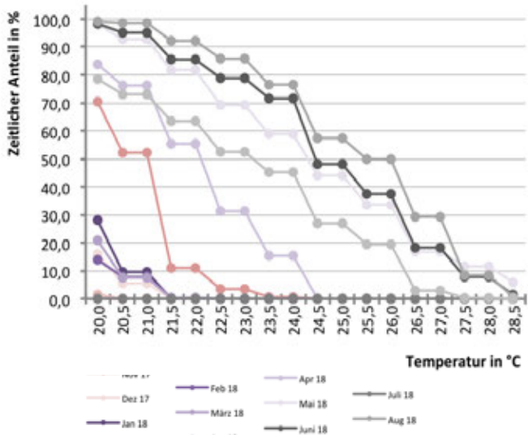

Abb. 412 Summenhäufigkeit der Raumlufttemperatur im beispielhaften Büroraum

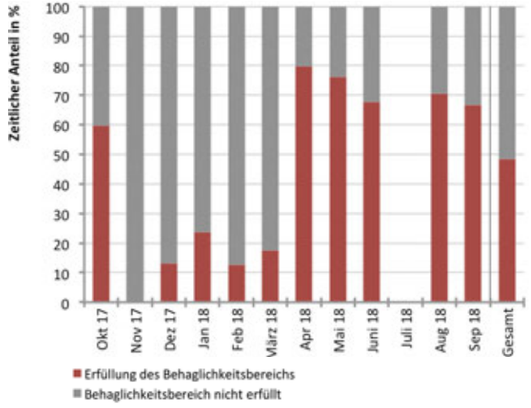

Abb. 413 Erfüllung des Komfortbereichs in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur im beispielhaften Büroraum

2018 überwiegt der zeitliche Anteil mit 84,5% in dem die Raumlufttemperaturen eher zu gering sind. Im Mai 2018 bis August 2018, mit Ausnahme des Julis 2018, wird die Behaglichkeit dann zu 71,1%, bzw. bis zu 96,6% aufgrund einer Überschreitung des Raumkomfortbereichs beeinträchtigt.

Um Gesundheit und Behaglichkeit nicht zu gefährden, sollten relative Luftfeuchten von 65% nicht über- und 30% nicht unterschritten werden. Die Messwerte zeigen, dass zu keinem Zeitpunkt der obere Grenzwert von 65% erreicht wurde, sodass zu hohe relative Luftfeuchten nicht auftreten. Zwischen Januar 2018 und September 2018 wurden jedoch zeitweise relative Luftfeuchten von weniger als 30% und sogar unter 20% gemessen, was zeigt, dass die Luft in diesen Zeitraum eher trocken ist.

Insgesamt ist zu beobachten, dass die relative Luftfeuchte in den Wintermonaten höher ausfällt als in den Sommermonaten. In der kalten Außenluft im Winter ist nur wenig Wasserdampf enthalten und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft ist in der Regel hoch. Dies führte in den meisten Fällen durch das starke Aufheizen der Frischluft zu einer geringen relativen Luftfeuchte. In dem untersuchten Büroraum wurde jedoch wenig gelüftet, was anhand der CO_2-Konzentration sichtbar wird, sodass die durch den Nutzer verursachten Feuchtelasten nur bedingt abgeführt wurden, und die mittleren Raumlufttemperaturen sind eher gering, sodass die Temperaturdifferenzen gering ausfallen. Des Weiteren weist die relative Luftfeuchte im Innen- und Außenraum mit 0,83 eine sehr starke Korrelation auf. So ist es zu erklären, dass die relative Luftfeuchte in diesem Fall im Winter höher ist als im Sommer.[36],[54]

Literatur:
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2012b)
[54] Hellwig, R.T. (2009)

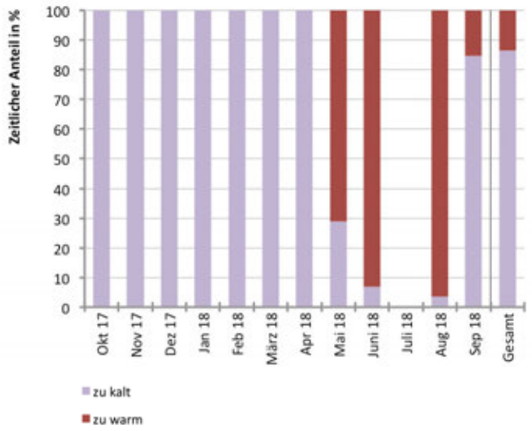

Abb. 414 Aufgliederung des Zeitraums, in dem der Komfortbereich im beispielhaften Büroraum nicht erfüllt wird

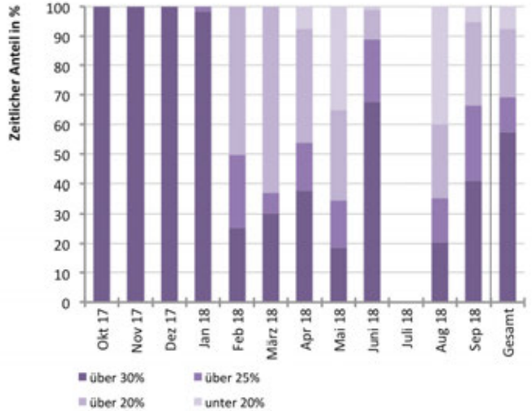

Abb. 415 Kategorisierung der relativen Luftfeuchte im beispielhaften Büroraum

11.4.4 Raumluftqualität in der Garderobe

In der Garderobe befinden sich an der Decke Schattenfugen zur Absaugung der Abluft aus dem Foyer, da die Garderobe in das Foyer integriert ist und somit mit diesem in einem Luftverbund steht. Zur Beurteilung, ob eine ausreichende Raumluftqualität in Bezug auf die CO_2-Konzentration erreicht wird, wurde auf Höhe der Schattenfugen eine Messbox angebracht. Besonders relevant sind die CO_2-Konzentrationen während der Nutzungszeiten des Foyers. Hierunter fallen die Vorstellungszeiten sowie hauptsächlich ein einstündiges Zeitfenster vor und nach der Vorstellung, da währenddessen das Foyer besonders stark durch die Theaterbesucher frequentiert ist. Für Juli 2018 und August 2018 konnten bei Betrachtung des Nutzungszeitraums keine Werte ermittelt werden, da sie in die Theaterferien fielen, in denen keine Veranstaltungen stattfanden.

Während des gesamten Messzeitraums von Oktober 2017 bis September 2018 wurde eine mittlere CO_2-Konzentration von 653 ppm erfasst. Das Minimum lag bei 525 ppm, während das Maximum 2000 ppm betrug. Das Minimum wurde zu einem Zeitpunkt erfasst, an dem keine Veranstaltungen im Scharoun Theater Wolfsburg stattfanden und somit keine personenbedingten Emissionen auftraten. Dahingegen wurde das hohe Maximum während der Nutzung des Foyers für den Drehbühnenball im März 2018 beobachtet.
Stellt man die mittleren CO_2-Konzentrationen der unterschiedlichen Nutzungszustände gegenüber, so zeigt sich während der definierten Nutzungszeiträume mit 719 ppm ein höherer Wert als im ungenutzten Zustand mit 583 ppm.
Betrachtet man die durchschnittliche CO_2-Konzentration unabhängig des Nutzungszustands über das Jahr hinweg, so bewegen sich die monatlichen Durchschnittswerte von 599 ppm im Februar 2018 bis 705 ppm im August 2018 und schwanken somit um 106 ppm. Höhere Schwankungen mit 250 ppm bei der monatlichen Durchschnittskonzentration zeigen sich bei alleiniger Betrachtung des Nutzungszeitraums. Für die Monate Juli 2018 und August 2018 liegen jedoch keine Durchschnittswerte vor, da in diesen Monaten aufgrund der Spielpause keine Veranstaltungen stattgefunden haben. In den anderen Monaten bewegen sich die Werte zwischen 649 ppm im April 2018 sowie Mai 2018 und 899 ppm im März 2018. Aber auch im Dezember 2017 wurde mit 869 ppm ein hoher Durchschnittswert ermittelt. Während im Dezember 2017 eine hohe Dichte an Vorstellungen herrschte und gleichzeitig eine hohe Auslastung vorlag, fand im März 2018 der Drehbühnenball statt, bei dem das Foyer des Theaters über einen längeren Nutzungszeitraum als gewöhnlich frequentiert wurde. Aufgrund der großen Besucherdichte in beiden Fällen kam es zu einer hohen CO_2-Emission durch die Besucher. Dies hatte zur Folge, dass die Lüftungsanlagen die Emissionen während des Nutzungszeitraums nicht vollständig abführen konnten, sodass die CO_2-Konzentration in der Raumluft nicht auf einem konstanten Niveau gehalten werden konnte. Der alleinige Anstieg der CO_2-Konzentration ist jedoch nicht bedenklich, sofern er nicht zu Werten im hygienisch auffälligen Bereich führt.
Erfolgt eine Betrachtung der Summenhäufigkeit der CO_2-Konzentrationen, so zeigt sich, dass sie während des Nutzungszeitraums in keinem der Monate 500 ppm unterschreiten. Als hygienisch auffällig werden CO_2-Konzentrationen jedoch erst ab 1000 ppm bezeichnet [siehe 5.5.1.1]. Während in den Monaten April 2018

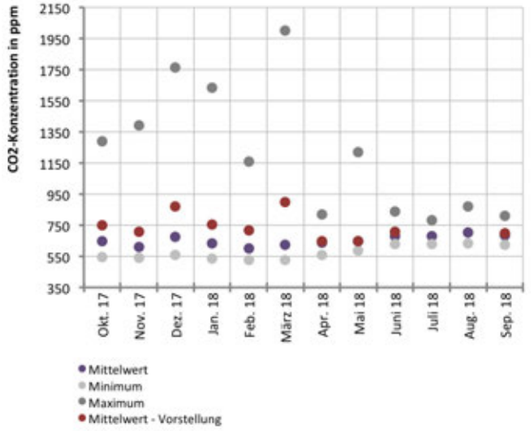

Abb. 416 CO_2-Konzentration in der Raumluft der Garderobe während des Messzeitraums

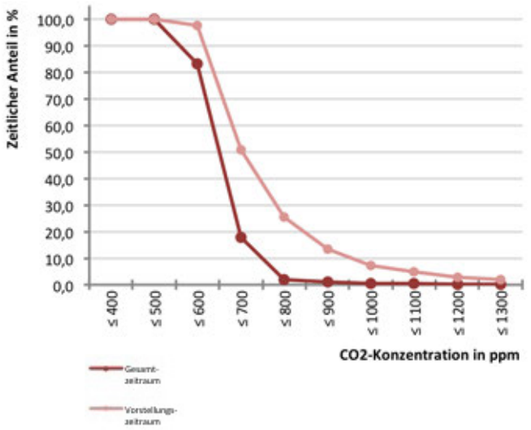

Abb. 417 Summenhäufigkeit der CO_2-Konzentration in der Garderobe im gesamten Messzeitraum

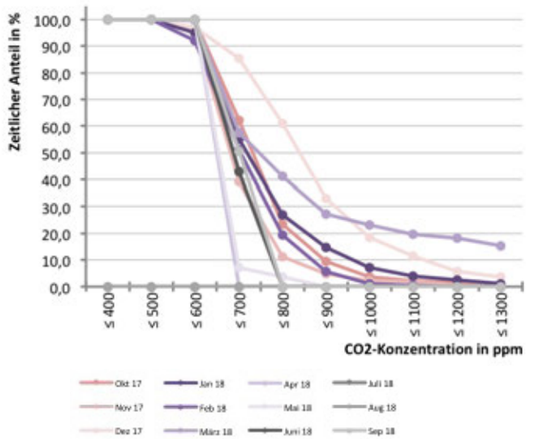

Abb. 418 Summenhäufigkeit der CO_2-Konzentration in der Garderibe nach Monaten

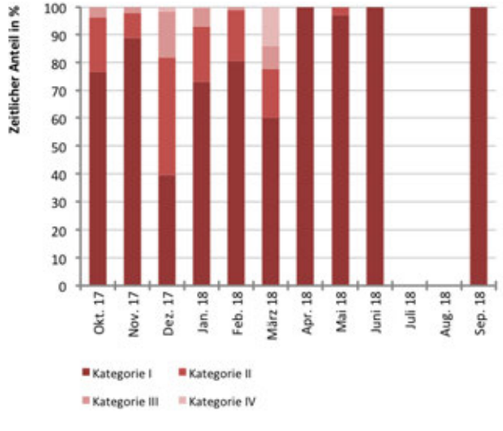

Abb. 419 Kategorisierung der CO_2-Konzentration in der Garderobe

11.4.5 Raumkomfort im Proberaum

bis Juni 2018 keine Messwerte über 1000 ppm zu beobachten waren, wird diese Grenze zwischen Oktober 2017 und März 2018 mit einem unterschiedlichen zeitlichen Anteil überschritten. Ein geringer Anteil unter 5% tritt in den Monaten Oktober 2017, November 2017 und Februar 2018 auf. Ebenfalls noch eher gering ist der Anteil im Januar 2018 mit 7,1%. Die Monate Dezember 2017 und März 2018, welche bereits eine hohe mittlere CO_2-Konzentration aufwiesen, zeigen dagegen mit 18,4%, bzw. 23,1% hohe zeitliche Anteile im hygienisch auffälligen Bereich. Im März 2018 erfolgte sogar zu 3,5% der Zeit eine Überschreitung der 2000 ppm-Grenze, ab welcher die Bedingungen als hygienisch inakzeptabel gelten. Diese Werte wurden jedoch ausschließlich beim Drehbühnenball gemessen. Während dieser Veranstaltung traten über einen Zeitraum von 22.30 Uhr bis 23.30 Uhr CO_2-Konzentrationen von über 2000 ppm auf. Auch die restliche Zeit des Abends lagen die Werte im hygienisch bedenklichen Bereich.

Neben der Bewertung der CO_2-Konzentration aus hygienischen Gesichtspunkten erfolgt außerdem die Kategorisierung der Messwerte nach dem in [5.5.1.1] beschriebenen außenluftkonzentrationsabhängigen Verfahrens. Über das gesamte Messjahr gesehen, wird mit den vorherrschenden Bedingungen derzeit Kategorie III erreicht. Die Anforderungen an Kategorie II werden nur knapp nicht erfüllt, da 7,2% der Messwerte der Kategorie III oder höher zuzuordnen sind. Erfolgt auch hier eine Betrachtung der einzelnen Monate, so fällt hier die Kategorisierung sehr unterschiedlich aus. Während in den Monaten Mai 2018 bis Juli 2018 sowie im September 2018 sogar hohe Anforderungen an die Raumluftqualität erfüllt werden, liegen im März 2018 große Anteile der Messwerte außerhalb der ersten drei Kategorien.

Abschließend lässt sich festhalten, dass bei längeren Nutzungszeiträumen des Foyers ein besonderer Fokus auf der Überwachung der CO_2-Konzentration in der Raumluft liegen sollte, da es hier zu Beeinträchtigung der Lufthygiene kommen kann.

Bei Proberäumen handelt es sich um zentrale Nutzungseinheiten in Theaterspielstätten. Besonders in Häusern, die über ein eigenes Ensemble verfügen, werden diese Räumlichkeiten regelmäßig und häufig frequentiert. Da es sich beim Scharoun Theater Wolfsburg um ein Gastspieltheater handelt, verfügt es über kein festes Ensemble. Daher wird der Proberaum hauptsächlich durch Kinder- und Jugendtheatergruppen sowie solche für Erwachsene genutzt, die parallel zur Spielzeit stattfinden. Die Kernnutzungszeiten sind daher auf Montag bis Donnerstag zwischen 16.00 Uhr und 20.00 Uhr festgelegt.

Während des einjährigen Messzeitraums von Oktober 2017 bis September 2018 kam es besonders in den Monaten Januar bis August 2018 zu Messausfällen, sodass für diesen Zeitraum nur punktuell Werte vorliegen. Aufgrund dessen können die erfassten Werte nur als Anhaltspunkte dienen. Auf eine stark differenzierte Auswertung wie unter [11.4.2.2] wird verzichtet.

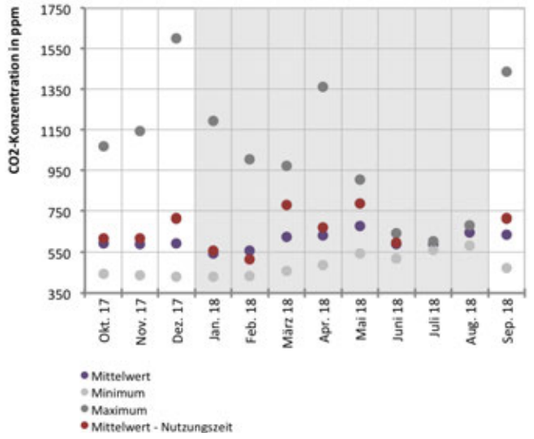

Abb. 420 CO_2-Konzentration in der Raumluft des Proberaums während des Messzeitraums

Die geringste im Messzeitraum erfasste CO_2-Konzentration liegt bei 429 ppm. Mit einem Wert von 1601 ppm ist das Maximum um 1172 ppm höher. Somit liegen in dem Proberaum zumindest zeitweise hygienisch auffällige Bedingungen vor. Eine Überschreitung der 1000ppm-Grenze, die hygienisch auffällige Werte markiert, erfolgt unter Berücksichtigung der Messausfälle nur zu 5,6% der Nutzungszeit. Eine gesundheitliche Beeinträchtigung durch zu hohe CO_2-Konzentrationen in der Raumluft ist daher unwahrscheinlich. Dies lässt sich auch aufgrund des Mittelwertes während der Nutzungszeit vermuten, der 659 ppm beträgt und gegenüber dem mittleren Wert von 593 ppm außerhalb der Nutzung ein wenig höher ist.

Die gemessenen Lufttemperaturen im Proberaum betragen im Nutzungszeitraum zwischen 22°C und 28°C. Die sollwertgesteuerte Heizung, bestehend aus einer Fußbodenheizung sowie Unterflurkonvektoren, trägt dazu bei, dass die Auslegungstemperatur von 21°C zu keinem erfassten Messzeitpunkt unterschritten wurde. Im Mai 2018 bis August 2018 treten die höchsten Maximaltemperaturen auf, die außerhalb des Nutzungszeitraums sogar bis auf 30°C ansteigen. Dies ist damit zu begründen, dass der Proberaum über eine raumhohe, nach Nordwesten ausgerichtete Verglasung verfügt. Eine Reduzierung der solaren Lasten wird zwar über ein strahlungsabhängig gesteuertes Verschattungssystem herbeigeführt, aber eine Kühlung der Raumluft erfolgt nicht. In den Monaten Juli 2018 und August 2018, welche die höchsten durchschnittlichen sowie maximalen Außenlufttemperaturen aufweisen, ist keine Beeinträchtigung der Raumnutzung zu erwarten, da während der Theaterferien keine Frequentierung des Raumes stattfindet.

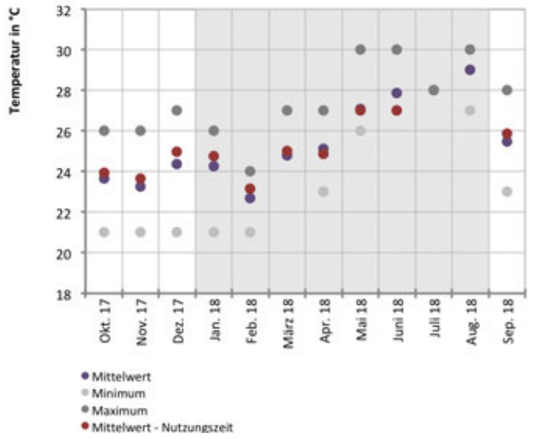

Abb. 421 Raumlufttemperatur im Proberaum während des Messzeitraums

11.5 Auswertung der Nutzerbefragung

11.5.1 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse

11.5.1.1 Gesamtergebnisse

Die Nutzerbefragung wurde im Zeitraum vom 01.03.2018 bis zum 30.04.2018 im Scharoun Theater durchgeführt. Während des Befragungszeitraums konnte ein Rücklauf von 299 Fragebögen verzeichnet werden. Zur Teilnahme an der Befragung wurde 290 Mal der Papierfragebogen genutzt, während nur neun Personen den Onlinefragebogen ausfüllten.
Die Gesamtanzahl der Fragebögen bezieht sich auf 25 Spieltage, an denen jeweils zwischen einer und 95 Personen teilnahmen, sodass das Mittel bei 12 Fragebögen pro Vorstellung liegt. Der Median von 5 verdeutlicht jedoch, dass es wenige Vorstellungen mit einem sehr hohen, aber viele mit einem geringen Rücklauf gab.
Um Angaben zu den teilnehmenden Personen zu erhalten, waren diese gebeten, sowohl ihr Geschlecht als auch ihr Alter anzugeben. Die Angaben zum Geschlecht zeigen, dass mit 66,8% gegenüber 33,2% doppelt so viele Frauen wie Männer an der Befragung teilnahmen. Die Analyse des Alters ergab, dass die Befragungsteilnehmer zwischen neun und 85 Jahre alt waren. Insgesamt liegt das Durchschnittsalter bei 57,8 Jahren. Die größte, an der Befragung teilnehmende Gruppe, ist zwischen 50 und 59 Jahre alt. Betrachtet man den Anteil derjenigen, über und unter der meist vertretenen Altersgruppe, so zeigt sich, dass die älteren Teilnehmer stärker vertreten sind, als die Jüngeren.

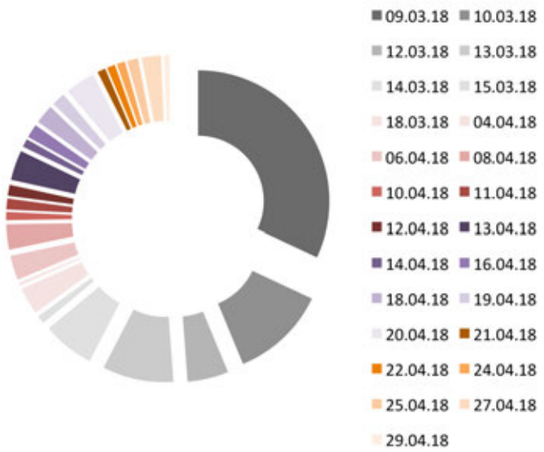

Abb. 422 Befragungsteilnehmer nach Veranstaltungsdatum

Die Zufriedenheit mit der Vorstellung kann Auswirkungen auf die persönliche Stimmung zum Zeitpunkt des Ausfüllens des Fragebogens haben. Der bei 1,4 liegende Mittelwert in Bezug auf die Zufriedenheit mit der Vorstellung zeigt, dass die Vorstellungen den Befragungsteilnehmern gut bis sogar sehr gut gefallen haben. Nur 3,7% der Befragten gaben an, dass ihnen die Vorstellung schlecht oder sehr schlecht gefallen habe. Somit sind keine gravierend negativen Auswirkungen, verursacht durch den Besuch der Vorstellung, auf die Stimmung zu erwarten. Die Stimmung kann wiederum dazu führen, dass die Sichtweise auf darauffolgend abgefragten Parameter negativer oder positiver ausfällt. Mit einem Mittelwert von 1,3 bewerteten die Teilnehmer ihre Stimmung aber ebenfalls als gut bis sehr gut. Auch hier ist mit 2,3% nur ein geringer Anteil der Befragten schlecht gestimmt. Folglich sind negative Auswirkungen auf die Befragungsergebnisse, bedingt durch die momentane Stimmung der Teilnehmer, nicht zu erwarten.
Bevor die Zufriedenheit mit dem Raumkomfort abgefragt wurde, wurden zunächst einige Fragen in Hinblick auf die Umgebung des Zuschauersaals gestellt. Die allgemeine Gestaltung des Zuschauersaals empfand die größte Personengruppe mit 50,2% sowie auch im Mittel mit 1,0 als gut. Auch die Akustik, die durchschnittlich mit 1,1, und der Sitzkomfort, der im Mittel mit 0,9 bewertet wurde, wurden als gut empfunden. Noch positiver wurden die Sichtbeziehung, mit einer mittleren Bewertung von 1,4, und die Beleuchtung mit durchschnittlich 1,3 eingeschätzt. Die guten Ergebnisse in Bezug auf die Einzelparameter spiegeln sich auch bei der Bewertung der Gesamtbehaglichkeit im Zuschauersaal wieder. Hier liegt der Mittelwert bei 1,6, was einer Einschätzung des Zuschauersaals aufgrund seiner Gestaltung als „etwas behaglich“ bis „behaglich“ entspricht.
Das Auftreten von Müdigkeit und Konzentrationsschwäche in großen Teilen von Personengruppen können Zeichen für eine zu hohe CO_2-Konzentration in der Raumluft sein, sodass in der Befragung auch die Beeinträchtigung der Zuschauer durch diese Symptome abgefragt wurde. Ein Anteil von 8,7% der Befragten gab an, während der Vorstellung durch Müdigkeit beeinträchtigt zu sein. Mit 9,4% war ein ähnlich geringer Anteil der Zuschauer auch in der Konzentration beeinträchtigt. Der geringe Anteil Beeinträchtigter bei beiden Parametern zeigt, dass die Beeinträchtigung wahrscheinlich nicht auf zu hohe CO_2-Konzentrationen zurückzuführen ist, zumal ein ebenso geringer Anteil mit 9,7% angab, Beeinträchtigung durch Konzentrationsschwächen und Müdigkeit zumindest als „etwas störend“ empfunden zu haben. Die Korrelation von 0,57, die einem mittlerer linearen Zusammenhang zwischen dem Müdigkeitsempfinden und der gesamten Beeinträchtigung zeigt, deutet darauf hin, dass Personen, die sich durch Müdigkeit beeinträchtigt fühlen, sich tendenziell auch in ihrem gesamten Empfinden gestört sehen. Stellt man diese Erkenntnis der Korrelation zwischen Konzentration und Gesamtbeeinträchtigung gegenüber, die mit 0,40 nur einen schwach linearen Zusammenhang aufweist, kann die Feststellung erfolgen, dass die Müdigkeit als Faktor stärker das Gesamtempfinden beeinträchtigt als Konzentrationsschwierigkeiten.
Der Hauptteil des Fragebogens befasst sich mit der Bewertung von Faktoren zum Raumklima, welche in Zuschauersälen hauptsächlich durch technische Einrichtungen, wie der Lüftungsanlage, beeinflusst werden. Die subjektive Bewertung des Raumklimas kann Hinweise auf möglichen Handlungsbedarf geben.

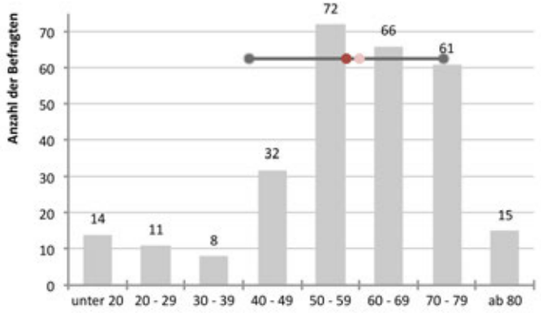

Abb. 423 Altersstruktur der Befragten

Beim ersten abgefragten Parameter handelt es sich um das Temperaturempfinden. Dieses wurde durchschnittlich mit 0,5 bewertet, was einem Empfinden von „neutral“ bis „etwas warm“ entspricht. Die größte Personengruppe mit 49,5%, ordnet die Temperatur als „neutral“ ein, während 8,0% diese als „eher kalt“ und 42,5% als „eher warm“ empfanden. Diese Verteilung der Befragungsergebnisse zeigt, dass die Temperatur tendenziell eher zu hoch als zu niedrig empfunden wurde.
Die Luftfeuchtigkeit, die der Mensch nur über sekundäre Symptome einschätzen kann, wird im Mittel mit 0,7 beurteilt, was einem Empfinden von „etwas trocken“ entspricht. Hier wird eine ähnliche Verteilung der Befragungsergebnisse wie bei der Temperatur sichtbar, da 52,0% die Feuchtigkeit als neutral, 4,0% als „etwas feucht“ und 44,0% als „etwas trocken“ empfinden.
Die Bewertung der Luftbewegung erfolgt durchschnittlich mit 0,8, was einem „neutralen“ bis „etwas stillem“ Empfinden entspricht. Insgesamt geben 17,4% der Befragten an, die Luftbewegung als

„eher zugig“ verspürt zu haben. Auch hier beurteilt ein größerer Anteil mit 31,1% die Luftbewegung als neutral, während der größte Anteil mit 51,5% diese sogar als „eher still“ erlebt hat. Bei einer Deutung aller Befragungsergebnisse, die mindestens die Angabe „etwas zugig“ umfassen als Unzufriedenheit aufgrund von „Zugempfinden“, so liegt der Anteil dieser Personengruppe unter 20%. Nach DIN EN 7730 kann das Raumklima in Hinblick auf die lokale thermische Unbehaglichkeit wegen Zugempfinden in Kategorie B eingeordnet werden.

Der letzte betrachtete Parameter Luftqualität wird durchschnittlich mit 0,6 beurteilt. Dies entspricht einer Empfindung der Luft als „neutral“ bis „etwas frisch“. Diese positive Bewertung der Raumluftqualität spiegelt sich auch in der Verteilung der Befragungsergebnisse wieder, bei der 35,1% die Luft als neutral, 15,8% als eher stickig und 48,3% sogar als eher frisch bezeichneten.

Bei einer Gesamtbetrachtung der Befragungsergebnisse zu den einzelnen Raumkomfortparametern zeigt sich insgesamt ein positives Ergebnis, das keinen Hinweis auf notwendige Änderungen gibt. Diese allgemeine Zufriedenheit mit dem Raumklima setzt sich auch bei der Gesamtbewertung fort. Die Einschätzung zur Behaglichkeit liegt im Mittel bei 1,0, was einem Empfinden von „etwas behaglich“ entspricht. Bei der Beurteilung der Annehmbarkeit des Raumklimas zeigt sich, dass 90,3% das Raumklima eher annehmbar als nicht annehmbar fanden, nur 9,7% bewerten dies andersherum. Auch die Frage nach der Erträglichkeit des Raumklimas zeigt, dass der größte Anteil mit 69,3% dieses mindestens als „erträglich“ einstuft, während 25,4% dieses immer noch als“ neutral“ bewerten und nur 4,4% dieses mindestens als „unerträglich“ beurteilen.

Im Anschluss an die Einschätzung des Empfindens zu den Parametern des Raumkomforts waren die Befragungsteilnehmer gebeten, ihre Präferenzen bezüglich der einzelnen Parameter anzugeben. Sollte der jeweilige Raumkomfortparameter nicht als neutral bewertet worden sein, bestand die Erwartung, dass die Präferenzen gegenteilig zum Empfinden ausfallen. Der Vermutung entsprechend gaben de Befragten ihre Präferenz das Temperaturempfinden betreffen, mit durchschnittlich -0,1 an. Somit wünschten sie sich tendenziell eine minimal geringere Temperatur. Die größte Personengruppe mit 53,8% präferierte eine Beibehaltung der aktuellen Temperatur.

Auch bei der Luftfeuchte, die durchschnittlich als „etwas trocken“ bewertet wurde, wurde mit der durchschnittlichen Angabe von -0,2 eine leicht höhere Luftfeuchtigkeit gewünscht. Ebenso wie bei der Präferenz zur Temperatur zeigte sich der größte Anteil der Befragten mit einer Beibehaltung der vorherrschenden Verhältnisse einverstanden.

Bei einer Gegenüberstellung der mittleren Empfindung mit der Präferenz wird deutlich, dass die Werte in Summe den Neutralitätspunkt nicht erreichen. Zwar stimmen die Tendenzen überein, jedoch liegt die gewünschte Veränderung immer unter der Höhe der Empfindung.

Eine Ausnahme zeigt die Präferenz zur Luftbewegung. Diese wird, trotz der Empfindung, dass diese eher gering sei, mit einem Mittelwert von -0,1 noch niedriger präferiert. Dieser Mittelwert ergibt sich, da 59,7% der Befragten keine Veränderung wünschen, dagegen aber 20,5% eine etwas geringere und nur 19,8% eine etwas stärkere Luftbewegung wünschen.

Zur weiteren Lokalisierung thermischer Unbehaglichkeit wurden Unterschiede bezüglich Temperatur und Zugempfinden zwischen Kopf- und Fußbereich abgefragt. Bezogen auf die Temperatur empfanden nur 10,4% der Personen, die Angaben hierzu machten,

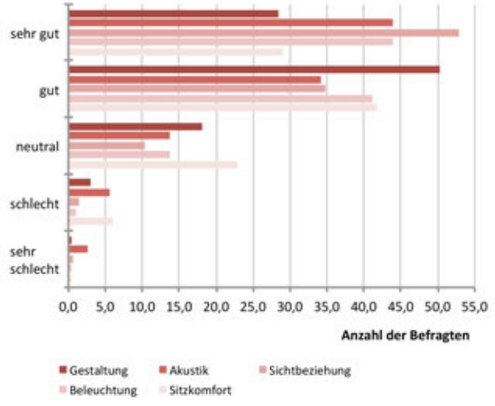

Abb. 424 Bewertung unterschiedlicher Parameter im Zuschauersaal

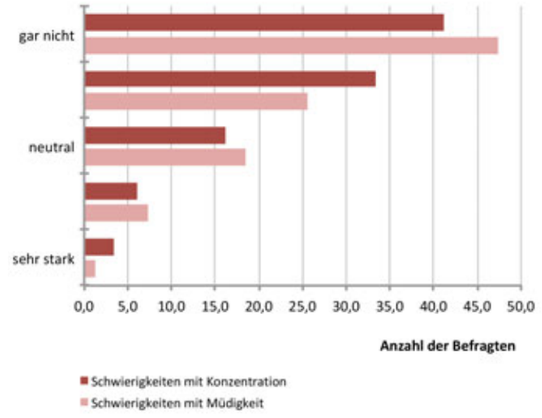

Abb. 425 Beeinträchtigung durch Müdigkeit und Konzentrationsschwächen

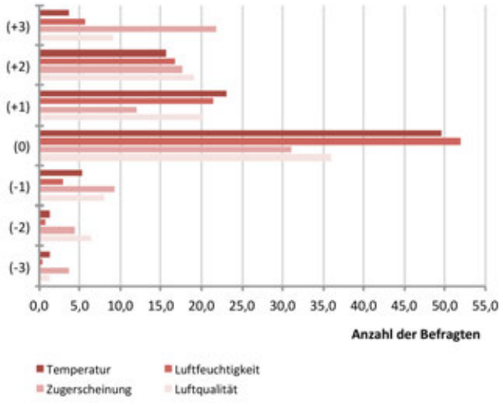

Abb. 426 Bewertung unterschiedlicher Parameter zum Raumkomfort

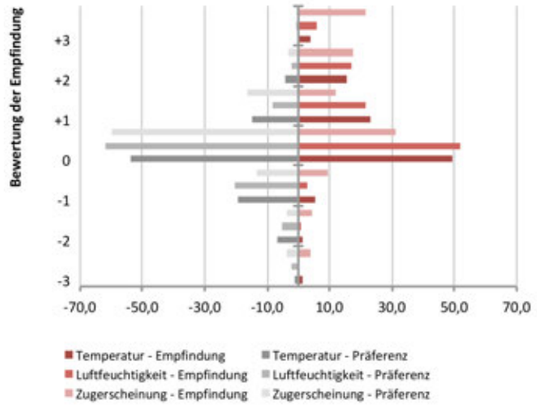

Abb. 427 Befragungsergebnisse zum Empfinden gegenüber den angegebenen Präferenzen

Unterschiede zwischen Kopf- und Fußbereich. Mit 12,1% verspürte nur ein geringfügig größerer Anteil Unterschiede in Bezug auf Zugerscheinungen. Für beide Parameter gab die größte Personengruppe an, gar keine Unterschiede bemerkt zu haben. Personen, die jedoch einen Unterschied gefühlt hatten, empfanden mit 7,8% die Temperatur im Fußbereich höher, demgegenüber stehen 13,3%, die dies für den Nackenbereich aussagten. Eine ähnliche Tendenz wird bei Beurteilung der Zugerscheinungen sichtbar. Mit einem Anteil von 20,1% empfanden mehr Personen die Zugerscheinungen stärker im Nackenbereich, während nur 5,8% sich im Fußbereich stärker betroffen fühlten. Dieses Ergebnis lässt sich über die Einbringung der Zuluft erklären. Diese erfolgt über die obere Kante der Sitzlehnen der Theaterstühle und ist somit in Höhe des Nackens angeordnet.
Wie bereits in Bezug auf die einzelnen Parameter zum Raumkomfort wurde auch hier im Anschluss an die Empfindung die Präferenz abgefragt. Für die Temperaturunterschiede zwischen Nacken- und Fußbereich ergibt sich ein Mittelwert von 0,0 der zeigt, dass durchschnittlich keine Änderungen gewünscht werden. Bei einer genaueren Betrachtung der Verteilung der Befragungsergebnisse hätten sich 9,8% einen geringeren Temperaturunterschied gewünscht, während 12,8% angaben, sogar einen größeren Unterschied zu präferieren.
Ein leicht anderes Ergebnis ergibt sich bei der Präferenz der gewünschten Luftbewegung. Hier zeigt der Mittelwert von -0,1, dass die Unterschiede tendenziell leicht geringer gewünscht worden wären. Dies wird ebenfalls in der Verteilung der einzelnen Aussagen sichtbar. Mit einem Anteil von 15,0% bevorzugen mehr Personen einen geringeren Unterschied, während 9,2% sich diesen stärker befürworten würden.

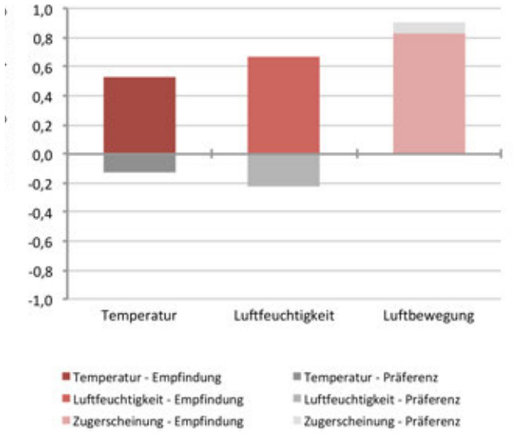

Abb. 434 Durchschnittlichen Empfindung gegenüber den Präferenzen

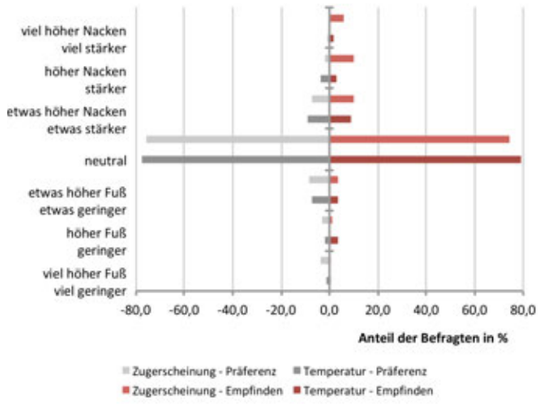

Abb. 435 Befragungsergebnisse zu Unterschieden im Nacken- und Fußbereich

11.5.1.2 Eine Vorstellung

Neben der Auswertung der Befragungsergebnisse über den gesamten Befragungszeitraum erfolgte die gesonderte Analyse einer Vorstellung. Im Gegensatz zur Auswertung über den gesamten Messzeitraum besteht der Vorteil darin, dass die Befragten den gleichen raumklimatischen Bedingungen sowie Parametern, die auf diese Einfluss nehmen, wie z.B. die Dauer der Vorstellung und Anzahl der Zuschauer, ausgesetzt waren. Dies ermöglicht eine aussagekräftige Bewertung des Raumklimas und lässt Rückschlüsse auf mögliche empfundene Unterschiede in verschiedenen Bereichen des Zuschauersaals zu.
Zur gesonderten Auswertung wurde die Vorstellung „Liebe“, ein Kabarett von Hagen Rether, das Freitag, den 09.03.2018 aufgeführt wurde, ausgewählt. Die Vorstellung wurde von 763 Personen besucht, dies entspricht einem Rücklauf von 12,1%.
Die Frage, wie Ihnen die Vorstellung gefallen habe, wurde im Mittel mit 1,5 beantwortet, was einer Bewertung von gut bis sehr gut entspricht. Ebenso war die Stimmung beim Ausfüllen der Fragebögen, bei einer mittleren Bewertung von 1,4, gut bis sehr gut, sodass nicht zu erwarten war, dass sich die Stimmungslage negativ auf die Befragungsergebnisse ausgewirkt hat.
Die persönlichen Angaben zu den befragten Personen zeigen, dass diese im Schnitt 55,4 Jahre alt waren. Mit einem Anteil von 29,5% war die größte Personengruppe zwischen 50 und 59 Jahre alt. Zwischen dem jüngsten Teilnehmer mit 17 Jahren und dem ältesten Befragten, der 80 Jahre alt war, liegt eine Spanne von 63 Jahren. Des Weiteren war der größte Anteil der Befragten mit 64% weiblich, dagegen waren nur 36% männlich.
Bei der Einschätzung, ob während der Vorstellung Schwierigkeiten mit Müdigkeitssymptomen oder der Konzentration auftraten, gaben nur 7,4% an, in diesem Bereich beeinträchtigt gewesen zu sein. Der geringe Anteil deutet darauf hin, dass dies eher auf individuelle Faktoren zurückzuführen und nicht über eine zu hohe CO_2-Konzentration in der Raumluft zu erklären ist.
Anschließend wurden die Befragten gebeten, verschiedene Faktoren des Raumklimas zu bewerten. Das Temperaturempfinden wurde durchschnittlich mit 0,5 beurteilt, liegt also zwischen „neutral“ bis „etwas warm“. Eine große Personengruppe mit einem Anteil von 43,2%, ordnete dieses als „neutral“ ein, 11,6% empfanden die Temperatur eher als „etwas kühl“ bis „kalt“ und 45,3% eher als „zu warm“. Gemäß dem Empfinden der Zuschauer scheint die Temperatur tendenziell eher zu hoch als zu niedrig zu sein.
Die Luftfeuchtigkeit wird im Mittel mit 0,6 bewertet, wird also als eher „etwas trocken“ empfunden, was sich auch an der Verteilung der Befragungsergebnisse ablesen lässt. Die Mehrheit mit 54,7% bewertet die Luftfeuchtigkeit mit neutral, während nur ein Anteil

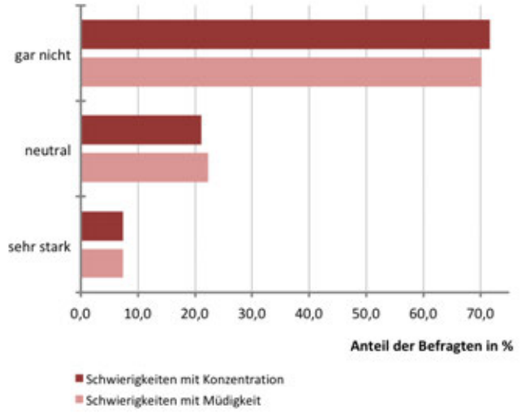

Abb. 428 Beeinträchtigung durch Müdigkeit und Konzentrationsschwierigkeiten einer Vorstellung

Parameter	Skala						
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Temperatur	kalt	kühl	etwas kühl	neutral	etwas warm	warm	heiß
Feuchtigkeit	sehr feucht	feucht	etwas feucht	neutral	etwas trocken	trocken	sehr trocken
Luftbewegung	sehr zugig	zugig	etwas zugig	neutral	etwas still	still	sehr still
Luftqualität	sehr stickig	stickig	etwas stickig	neutral	etwas frisch	frisch	sehr frisch

Abb. 429 Bewertungsskalen der Raumklimaparameter

von 5,3% die Luft als „eher feucht bis sehr feucht“ empfindet, dagegen aber 40,0% diese als „eher etwas trocken“ einschätzt.
Über Zugerscheinungen äußerten sich 24,2% der Befragten negativ, während 27,4% diese als „neutral“ bewerteten und 48,4% die Luftbewegung sogar als „eher still“ bezeichneten. Da Beeinträchtigung durch Zugluft zu lokaler thermischer Unbehaglichkeit führen kann, wird die Umgebung gemäß DIN EN 7730 anhand des prozentualen Anteils an Personen, die Zugluft empfinden, in drei Kategorien eingeteilt. Bis zu einem Anteil von 30% kann das Raumklima in Kategorie C eingeordnet werden, was auf Basis der Befragungsergebnisse möglich ist. Dies entspricht einem „annehmbaren, moderaten Maß an Erwartungen“ und sollte bei bestehenden Gebäuden erfüllt werden. Vor der Sanierung bestand eine starke Beeinträchtigung des Raumkomforts im Zuschauersaal durch Zugluft, da das Einblasen der Frischluft über die Rückenlehnen der Theatersessel mit zu großem Druck erfolgte. Diese Problematik wurde im Rahmen der Sanierung wissenschaftlich untersucht und durch Optimierungsmaßnahmen behoben. Das Befragungsergebnis deutet darauf hin, dass die Optimierungsmaßnahmen erfolgreich ausgeführt wurden.
Die Luftqualität wurde durchschnittlich mit 0,4 bewertet was einer Einschätzung der Luft als „eher frisch“ entspricht. Der größte Anteil mit 43,2% der Befragten beurteilte die Luft als neutral, während 38,9% diese sogar für „eher frisch“ hielten und nur 17,9% die Luft als „eher stickig“ empfanden. Diese Einschätzung spricht für eine gute Luftqualität im Zuschauersaal und bekräftigt die Schlussfolgerungen, die aus den Angaben zur Müdigkeit und Konzentration gezogen werden können.
Im Anschluss an die Einschätzung der Einzelparameter waren die Befragten dazu aufgefordert, das Raumklima im Gesamten zu bewerten. Hier beurteilten 90,5% das Raumklima als „eher annehmbar als nicht annehmbar“. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch darin wieder, dass 95,7% der Befragten das Raumklima als „neutral“ bis „völlig erträglich“ empfanden.
Zusätzlich zur Einschätzung der vorgefundenen Situation wurden die Befragungsteilnehmer gebeten, ihre Präferenzen in Bezug auf die einzelnen raumklimatischen Parameter anzugeben. Bezogen auf die Temperatur hätten es sich die Befragten mit einem Durchschnittswert von -0,2 eher ein wenig kälter gewünscht. Dies stimmt mit der Tendenz überein, dass die Temperatur mit einem Mittelwert von 0,5 eher als „etwas warm“ empfunden wurde. Die mittlere Präferenz zur Luftfeuchtigkeit von -0,3 zeigt, in Übereinstimmung mit der Einschätzung der Luft als eher trocken, dass auch hier eine leichte Steigerung der Luftfeuchtigkeit gewünscht wurde. Bei den Angaben zur Luftbewegung, die mit einer mittleren Angabe von 0,5 als „eher still“ bewertet wurde, zeigte sich, dass die Befragten diese im Mittel mit -0,1 nur geringfügig weiter reduzieren wollten.
Insgesamt deuten die Angaben zur Präferenz der Raumkomfortparameter darauf hin, dass nur geringe Änderungen gewünscht sind und allgemein Zufriedenheit mit dem Raumklima vorherrscht.[32],[36]

Literatur:
[32] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2006)
[36] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2012b)

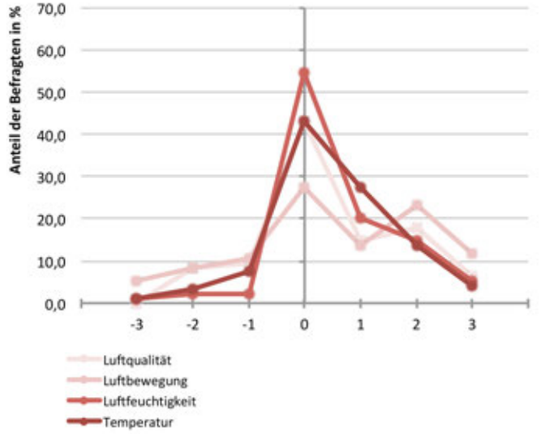

Abb. 430 Bewertung des Raumklimas einer Vorstellung

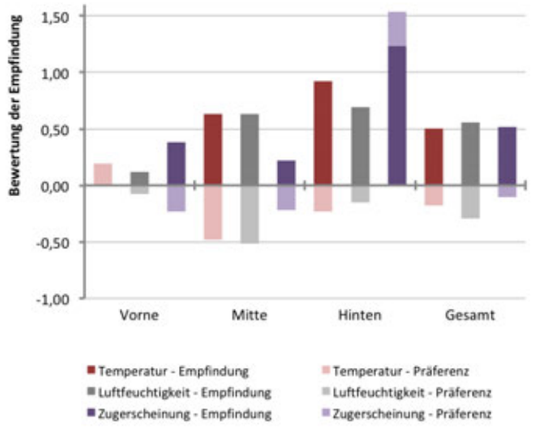

Abb. 431 Empfindung zum Raumkomfort gegenüber der Präferenz einer Vorstellung

Zur weiteren Analyse der Aussagen zum Raumklima wird der Zuschauersaal in sechs Bereiche eingeteilt. Diese entsprechen den Bereichen, in denen mittels des Messtorsos Daten zum Raumkomfort erhoben wurden. Die Bereiche ermöglichen es, den Zuschauersaal in Hinblick auf unterschiedliche Zusammenhänge gezielt zu beurteilen und mögliche Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Aufgrund der Geometrie des Zuschauersaals, die durch eine mittig verlaufende Trennung zwischen den Stuhlreihen gekennzeichnet ist, kann dieser in einen linken und rechten Bereich unterteilt werden. Eine weitere Untergliederung erfolgt in Abhängigkeit des Abstands zur Bühne in einen vorderen, mittleren und hinteren Bereich. Die ersten vier Bereiche, mit etwa gleicher Sitzplatzanzahl, liegen im Parkett des Zuschauersaals und umfassen „Bereich 01 - Parkett vorne links“, „Bereich 02 - Parkett vorne rechts“, „Bereich 03 - Parkett hinten links“ und „Bereich 04 - Parkett hinten rechts“. Zwei weitere Bereiche, mit „Bereich 05 - Rang links“ und „Bereich 06 - Rang rechts“, befinden sich auf dem Rang, der den höchstgelegenen Teil im Zuschauersaal bildet.
Bei einer Zusammenfassung der Bereiche 01/02, Bereiche 03/04 und Bereiche 05/06 können Unterschiede zwischen dem vorderen, mittleren und hinteren Teil beurteilt werden.
Der prozentuale Anteil der Befragungsteilnehmer in Bezug auf die vorhandenen Sitzplätze variiert in den unterschiedlichen Bereichen zwischen 2,6% in „Bereich 06 – Rang rechts“ und 15,8% in „Bereich 02 – Parkett vorne rechts“. Der größte Anteil der Fragebögen mit 28,8% stammt aus „Bereich 02 – Parkett vorne rechts“ und der geringste aus „Bereich 06 – Rang rechts“ mit 7,6%.
Bei Betrachtung der Bewertung der empfundenen Temperatur nach Bereichen zeigt sich, dass diese zwischen -0,1 in „Bereich 02 – Parkett vorne rechts“ und 1,1 in „Bereich 05 – Rang links“ liegt. Vergleicht man die Aussagen der Personen die auf der linken Seite saßen, mit denen auf der rechten, so wird die rechte Saalseite durchschnittlich, unabhängig der Saalbereiche Vorne, Mitten und Hinten, immer als kühler bewertet. Die Gründe hierfür konnten ohne eine Validierung der Befragungsergebnisse über die durch die Messtorsi erfassten Daten zum Raumkomfort nicht abschließend ermittelt werden. Es besteht die Möglichkeit, dass diese Unterschiede auf die Einbringung der Zuluft über Druckkammern unter dem Zuschauersaal oder aber auf die Raumgeometrie zurückzuführen sind.
Neben den Unterschieden zwischen der linken und rechten Saalseite lässt sich feststellen, dass die Temperatur mit größerer Entfernung zur Bühne und mit Ansteigen der Sitzplätze als höher empfunden wird. Dies ist damit zu erklären, dass die Luft an allen Stellen des Zuschauersaals mit der gleichen Temperatur eingebracht wird. Die durch Wärmelasten, verursacht durch Personen und Beleuchtung weiter erwärmte Luft

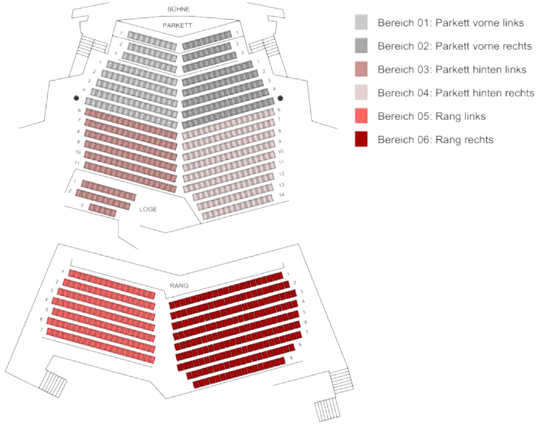

Abb. 432 Darstellung der Bereiche im Zuschauersaal

steigt nach oben und wird an der Decke abgesaugt. Die so erzeugte Temperaturschichtung wird im Rang, der die höchste Stelle des Zuschauersaals darstellt, deutlich.
Ebenso wie die Temperatur wurde auch die Luftfeuchtigkeit in den verschiedenen Bereichen unterschiedlich empfunden. Die Bewertung der Luftfeuchtigkeit liegt zwischen -0,1 im „Bereich 02 – Parkett vorne rechts“ und 1,0 „Bereich 05 – Rang links“. Mit der Bewertung von -0,1 im „Bereich 02 – Parkett vorne rechts“, die eine Tendenz zu eher hoher Luftfeuchtigkeit zeigt, bildet dieser Bereich eine Ausnahme. In allen anderen Bereichen wurde die Luft durchschnittlich als „eher trocken“ beurteilt. Die Bewertung der Luftfeuchtigkeit steht in Abhängigkeit zur empfundenen Temperatur. Je stärker die Temperatur als „warm“ wahrgenommen wird, desto stärker tendiert die mittlere Bewertung der Luftfeuchtigkeit Richtung „trocken“. Belegt werden kann diese Aussage durch die Überprüfung der Korrelation der durchschnittlichen Aussage in den unterschiedlichen Bereichen zu den jeweiligen Parametern. Da diese 0,83 beträgt, steht die durchschnittliche Bewertung der Temperatur mit der Luftfeuchtigkeit in einem stark linearen Zusammenhang.
Die Bewertung der Luftbewegung variiert zwischen 0,1 im „Parkett hinten rechts“ und 1,5 im „Bereich 05 – Rang links“. Bei einer Gegenüberstellung der unterschiedlichen Bereiche zeigt sich, dass die Luftbewegung im mittleren Teil des Saals am stärksten wahrgenommen wird. Die geringste Luftbewegung herrscht dagegen subjektiv im Rang. Sofern angenommen werden kann, dass die Luftgeschwindigkeit in allen Bereichen des Zuschauersaals ähnlich ist, wäre ein geringeres Zugluftempfinden im Rang darüber zu erklären, dass

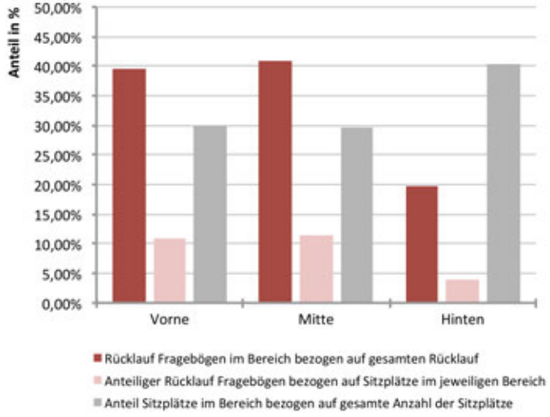

Abb. 433 Rücklaufs der Fragebögen nach Bereichen des Zuschauersaals

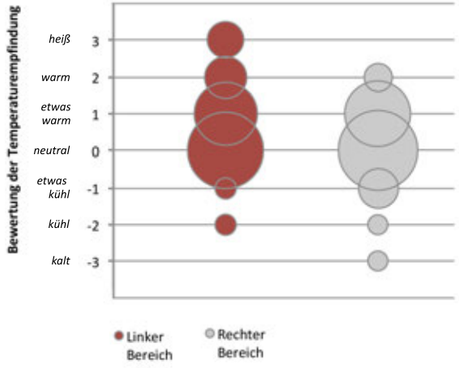

Abb. 434 Vergleich der Bewertungsergebnisse in Bezug auf die Temperaturempfindung in Abhängigkeit von linker und rechter Saalseite

Personen, die einer höheren Umgebungstemperatur ausgesetzt sind, weniger anfällig gegenüber Zugerscheinung sind. Eine ähnliche Tendenz zeigt sich beim Vergleich der linken und rechten Saalseite. Während die Temperatur auf der rechten Seite als geringer eingeschätzt wird, ist auch die Empfindung der Luftbewegung stärker ausgeprägt.
Eine weitere mögliche Erklärung dafür, dass das Zugempfinden im Rang geringer ausgeprägt ist, könnte auch an der Ausbildung der Druckkammern liegen. Vor der Sanierung konnte im Rang nur ein geringer Luftstrom verzeichnet werden, da der notwendige Druck zur Einbringung der Luft nicht aufgebaut werden konnte. Dies lag daran, dass die Konstruktion der Druckkammern große Undichtigkeiten aufwies, die im Zuge der Sanierung geschlossen wurden. Hier wäre ein Vergleich der Ausblasgeschwindigkeiten im Rang und Parkett sinnvoll.

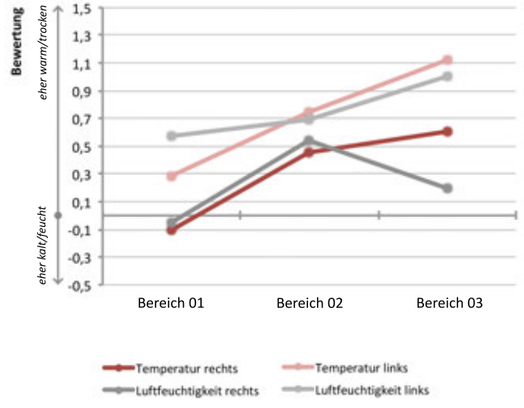

Abb. 435 Empfindung des Raumkomforts (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) in Abhängigkeit der linken und rechten Saalseite

Beide Interpretationen des Ergebnisses bieten keine Erklärung dafür, dass die Luftbewegung im mittleren Bereich stärker empfunden wird als im vorderen, obwohl die empfundene Temperatur dort höher ist.
Aufgrund der besonderen Raumgefüge, die Theatersäle in Zusammenhang mit dem Bühnenturm bilden, kann es zu komplexen Strömungsverhältnissen kommen, die nicht allein über Temperaturschichtung sowie physikalische Zusammenhänge erklärbar sind. Hier wären tiefergreifende Untersuchungen notwendig.
Bei Betrachtung der Aussagen zur Luftqualität zeigt sich, dass die Werte zwischen 0,1 im „Bereich 01 – Parkett vorne links" und 1,4 im „Bereich 06 – Rang rechts" liegen. Anhand der Kurven ist zu erkennen, dass die Luftqualität in der rechten Hälfte des Zuschauersaals als frischer bewertet wird als in der linken. Des Weiteren scheint die Luftqualität zu steigen, je weiter

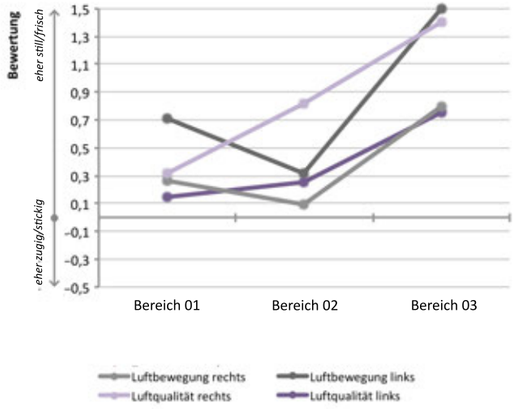

Abb. 436 Empfindung des Raumkomforts (Luftbewegung und Luftqualität) in Abhängigkeit der linken und rechten Saalseite

11.5.2 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Nutzerbefragung mit den Messergebnissen

die Bereiche von der Bühne entfernt sind, sodass die Luftqualität im Rang am besten bewertet wird. Dies ist konträr zur Theorie, dass die Ausblasgeschwindigkeit der Luft, aufgrund der andersartigen Ausbildung der Druckluftkammern im Rang, geringer sein könnte als im Parkett. Eine geringere Ausblasgeschwindigkeit hätte eine geringere Frischluftzufuhr zur Folge, was wiederum zu einer abnehmenden Luftqualität führen würde.
Aufgrund der komplexen Zusammenhänge kann die Nutzerbefragung allein nur Hinweise auf Unterschiede in verschiedenen Bereichen des Zuschauersaals geben. Erst in Zusammenhang mit der Auswertung der Ergebnisse aus den Raumkomfortmessungen können die subjektiven Empfindungen validiert und mit Messwerten hinterlegt werden. Anschließend können Lösungsmöglichkeiten für raumkomforttechnische Nachteile entwickelt werden.

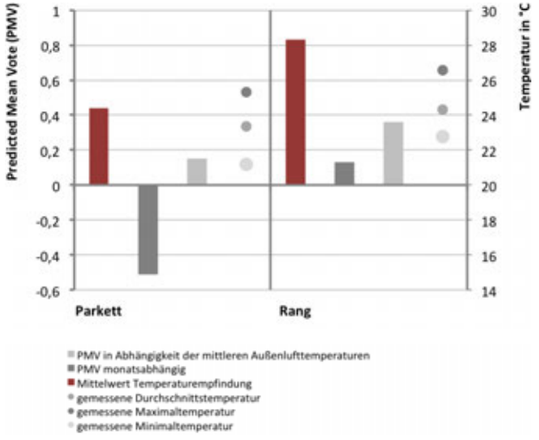

Abb. 437 Predicted Mean Vote aus Befragung und Berechnung

Zur umfassenden Beurteilung des Raumkomforts im Zuschauersaal des Scharoun Theaters Wolfsburg wurden sowohl über Messtorsi objektive Messwerte erfasst als auch auf Basis einer Zuschauerbefragung Daten zum subjektiven Empfinden der Umgebung aufgenommen. Um mögliche Diskrepanzen zwischen den objektiven Messwerten und den subjektiven Befragungsdaten aufzuzeigen, werden diese im Folgenden gegenübergestellt. Zunächst muss jedoch eine Eingrenzung des Betrachtungszeitraums erfolgen, da die Datenerhebungen nicht über die gleichen Zeiträume stattfanden. Den längsten Messzeitraum weist der stationäre Messtorso im Parkett des Zuschauersaals auf, der über ein gesamtes Jahr Messwerte erfasste. Dagegen wurde der mobile Messtorso im Zeitraum von Mitte Januar 2018 bis Mitte Juni 2018 im Rang platziert. Die Zuschauerbefragung wurde über den kürzesten Zeitraum vorgenommen und umfasst lediglich die Monate März und April 2018, sodass sich die Gegenüberstellung auf diesen Zeitraum beschränken muss. Zu berücksichtigen ist hier, dass es beim stationären Messtorso in diesem Zeitraum zu Messausfällen kam und daher zu Vergleichszwecken nur Messwerte von Mitte bis Ende April vorliegen.
Die Ergebnisse der Nutzerbefragung zur Temperaturempfindung zeigen, nach Durchführung des t-Tests, der signifikant unterschiedliche Ergebnisse zu Null ergab, dass diese im Rang mit einer mittleren Bewertung von 0,83 gegenüber 0,44 im Parkett höher ausfiel. Die Tendenz der Temperaturempfindung spiegelt sich auch in den gemessenen Temperaturen wieder. Sie fallen sowohl bei den Minimal-, den Maximal- und den Mittelwerten im Parkett geringer aus. Das Minimum betrug im Parkett 21,17°C während es im Rang bei 22,78°C lag. Die Maximalwerte wurden mit 25,32°C im Parkett und 26,57°C im Rang gemessen. Als Mittelwert wurde im Parkett 23,35°C und im Rang 24,31°C ermittelt, sodass sich durchschnittlich ein Temperaturunterschied von 0,96°C ergibt. Wird außerdem die Kategorisierung der Messwerte auf

Basis der Lufttemperatur betrachtet, so lässt sich für das Parkett ein Anteil von 73,8% mindestens Kategorie II zuordnen und erfüllt somit normale Anforderungen. Im Rang reduziert sich der Anteil dagegen auf 31,1%. Neben der Gegenüberstellung mit der gemessenen Lufttemperatur kann diese auch mit den ermittelten PMVs im Beziehung gebracht werden. Hier zeigt sich bei Betrachtung der Durchschnittswerte im Parkett ein geringeres vorhergesagtes Temperaturempfinden. Es liegt bei -0,51 und kann somit als Empfindung zwischen „neutral“ bis „etwas kühl“ bewertet werden. Im Rang ist das durchschnittliche PMV mit 0,13 etwas höher und liegt näher am thermischen Neutralitätspunkt. Dennoch weist es eine leichte Tendenz zu einer thermischen Empfindung als „etwas warm“ auf. Ein Vergleich der Befragungsergebnisse mit den berechneten Werten zeigt, dass die berechneten PMVs, anders als bei der Querschnittserhebung, durchschnittlich unter den Befragungsergebnissen liegen und die Umgebung subjektiv als „eher kalt“ bewertet wird, während sie objektiv als „eher warm“ gemessen wird. Neben der durchschnittlichen Temperaturwahrnehmung kann auch der Anteil an Befragten betrachtet werden, der die Umgebung als „eher kühl“ empfand. Er liegt im Parkett bei lediglich 9,7%, während es im Rang sogar nur 5,6% waren. Bei der Querschnittserhebung wurde die Diskrepanz zwischen Mess- und Befragungsergebnissen durch den zu hoch angesetzten Tätigkeitsgrad bei den Berechnungen erklärt. Im Fall des Scharoun Theaters würde eine Anwendung des unter [5.7.2.3] definierten Raumtyps jedoch zu einer Verstärkung der Diskrepanz führen. Der Unterschied zwischen Auswertung der Messwerte zur Querschnittserhebung und zum Intensivmonitoring besteht zum Teil in den verwendeten Bekleidungsfaktoren. Während für diese im gesamten Messzeitraum der Querschnittserhebung vom

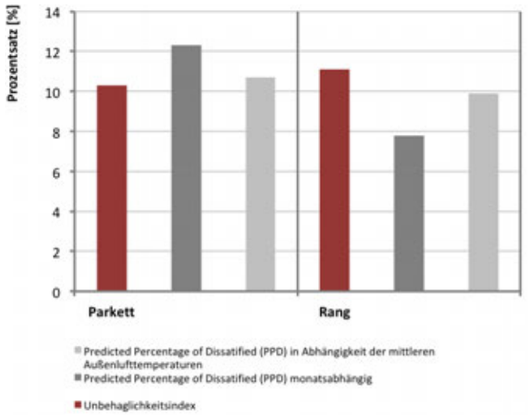

Abb. 438 Predicted Percentages of Dissatified aus Befragung und Berechnung

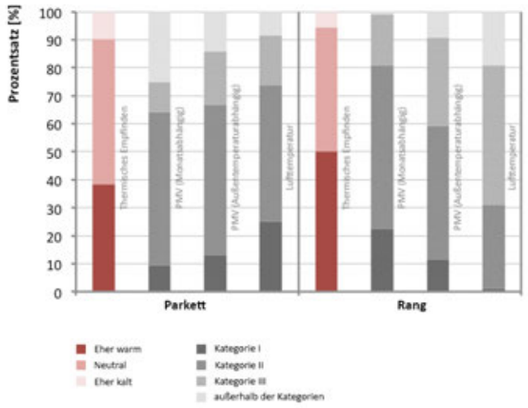

Abb. 439 Ergebnisse zur Kategorisierung der thermischen Umgebung

Heizfall ausgegangen wurde, da nahezu alle Messtage auch Heiztage waren, wurde beim Intensivmonitoring monatsabhängig in Heiz- und Kühlfall unterteilt, sodass im April bereits geringere Bekleidungsfaktoren angesetzt wurden. Bei einer genaueren Betrachtung des Außenklimas für diesen Monat kann jedoch festgestellt werden, dass die mittlere Außentemperatur an 20 von 30 Tagen unter der Heizgrenztemperatur von 15°C lag. Wird dies bei der Auswertung berücksichtigt und nur für Tage über der Heizgrenztemperatur geringere Bekleidungsfaktoren angesetzt, so erhöht sich der PMV im Parkett auf -0,15 während dieser im Rang auf 0,36 steigt. Trotz dieser Anpassung ist die durchschnittliche Temperaturempfindung, welche im Rahmen der Befragung geäußert wurde, weiterhin höher. Hier könnte möglicherweise eine Einzelbetrachtung der bewerteten Vorstellungen Aufschluss geben, die aufgrund der Messausfälle jedoch nicht vorgenommen werden konnte. Zur Kategorisierung der thermischen Umgebung ist besonders der berechnete PPD entscheidend, da anhand dessen Grenzwerte für die einzelnen Kategorien festgelegt werden [siehe 5.5.1.2]. Der mittlere PPD wurde anhand der Messwerte im Rang, ohne Unterscheidung zwischen Heiz- und Kühltagen in Abhängigkeit der mittleren Außenlufttemperatur, mit 7,8% und im Parkett mit 12,3% ermittelt. Auf Basis der Messergebnisse wäre somit zu erwarten, dass im Rang eine größere Zufriedenheit mit der vorherrschenden thermischen Situation besteht. Erfolgt jedoch eine Einbeziehung der mittleren Außenlufttemperatur bei der Berechnung des PMVs, so steigt der PPD im Rang auf 9,9% an, während er im Parkett auf 10,7% sinkt, sodass sich die Werte insgesamt stark annähern. Im Vergleich zu den Befragungsergebnissen, die im Parkett einen Unbehaglichkeitsindex in Höhe von 10,3% und im Rang von 11,1% zeigen, bestehen somit nur geringe Unterschiede.

Anhand des Unbehaglichkeitsindexes kann eine Kategorisierung der thermischen Umgebung erfolgen, sodass eine Gegenüberstellung mit den Bewertungen nach Lufttemperatur und PMV möglich ist. Aufgrund des PPDs kann die thermische Umgebung sowohl im Rang als auch im Parkett in Kategorie III einsortiert werden. Die Kategorisierung gemäß der Lufttemperatur hat jedoch gezeigt, dass weder auf dem Rang noch im Parkett eine der Kategorien als erfüllt angesehen kann. Bei Betrachtung des ursprünglichen PMVs wird im Rang Kategorie III erreicht, während die Werte im Parkett mit 25,0% wiederum zu oft außerhalb der Grenzen der Kategorien liegen. Auch bei Betrachtung des in Abhängigkeit der mittleren Außenlufttemperaturen berechneten PMVs zeigt sich, dass keine Kategorie erfüllt werden kann. Insgesamt besteht subjektiv auf Grund der Befragungen eine größere Zufriedenheit mit der thermischen Situation als auf Grund der objektiven Messwerte zu erwarten gewesen ist.

Anders als bei der Temperatur verfügt der Mensch über keine direkten sensorischen Möglichkeiten zur Einschätzung der relativen Luftfeuchte, sondern kann diese nur anhand sekundärer Parameter beurteilen [siehe 5.5.1.2]. Sowohl im Parkett als auch im Rang wurde die Luftfeuchte durch alle Befragten mit einem Median von 0,0 bewertet. Dennoch unterscheidet sich der Anteil an Personen leicht, der die Luft als „eher trocken“, bzw. „eher feucht“ empfunden hat. Im Parkett bewerteten 40,0% der Befragten die Raumluft als „eher trocken“, während 3,6% diese als „eher feucht“ empfanden. Dagegen fällt der Anteil an Personen im Rang, welcher die Raumluft als „eher trocken“ wahrnahm, mit 44,4% etwas höher aus. Gleichzeitig sinkt der Anteil der Personen, die ein Feuchtigkeitsempfinden ausdrückten, auf 0,0%. Obwohl beim Menschen keine sensorischen Fähigkeiten zur direkten Einschätzung der Luftfeuchte vorhanden sind, stimmen die Tendenzen der Nutzerbefragung mit den Messwerten überein. Die Kategorisierung der Messwerte zeigt, dass im Parkett normale Erwartungen an die Luftfeuchte der Raumluft erfüllt werden können, da Kategorie II erreicht wird. Ein Anteil von 77,4% der Messwerte entfällt hier sogar auf Kategorie I. Im Rang werden im Gegensatz zum Parkett mit Kategorie III

insgesamt nur etwas geringere Anforderungen befriedigt, aber auch hier können 74,9% der Messwerte in Kategorie I eingeordnet werden. Die Bewertung für Parkett und Rang zeigt, dass in beiden Fällen das Ergebnis aus der Nutzerbefragung mit einem Median von 0,0, welcher ein Neutralitätsempfinden wiederspiegelt, nachvollziehbar ist. Betrachtet man darüber hinaus den Durchschnittswert der relativen Luftfeuchte, so liegt er im Rang bei 33,8% und fällt somit gegenüber dem Parkett mit 34,9% etwas niedriger aus. Bringt man die durchschnittlich gemessene relative Luftfeuchte in Verbindung mit dem Anteil an Personen, welche die Luft als „eher trocken" empfinden, so zeigt sich hier eine übereinstimmende Tendenz, da im Rang gegenüber dem Parkett eine geringere mittlere Luftfeuchte vorliegt, während gleichzeitig ein größerer Anteil für eine Empfindung der Luft als „eher trocken" zu verzeichnen ist.
Ein weiterer Parameter, der die thermische Behaglichkeit beeinträchtigen kann, ist die Luftbewegung, sodass auch hier eine Gegenüberstellung der Befragungs- und Messergebnisse erfolgt ist. Die mittleren gemessenen Luftgeschwindigkeiten liegen im Parkett bei 0,02 m/s, während diese im Rang mit 0,06 m/s etwas höher ausfallen. Im Vergleich zu den Grenzwerten der jeweiligen Kategorien I bis III bewegen sich die mittleren Luftgeschwindigkeiten sowohl für die Heiz- als auch für die Kühlperiode unter den Grenzwerten von Kategorie I und sind somit eher gering. Auch die Maximalwerte in Höhe von 0,17 m/s im Parkett und 0,35 m/s im Rang lassen nur im Rang maximal temporär Zugerscheinungen erwarten. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Grenzwerte für Heiz- und Kühlperiode werden im Parkett durch das Erreichen von Kategorie I hohe Anforderungen erfüllt, da 95,2% der Messwerte dort einzuordnen sind, während im Rang mit Kategorie II normale Anforderungen erfüllt werden können. Dort entfallen dennoch 84,5%

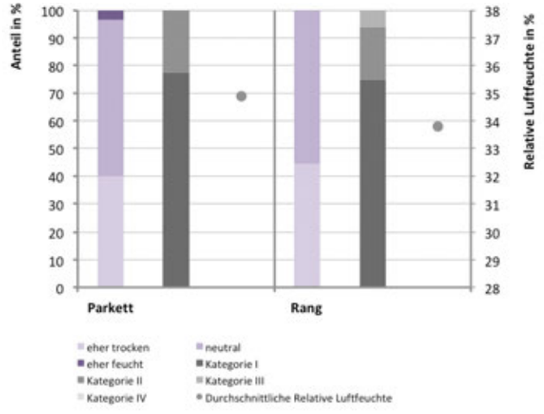

Abb. 440 Befragungs- und Messergebnisse zur Luftfeuchte

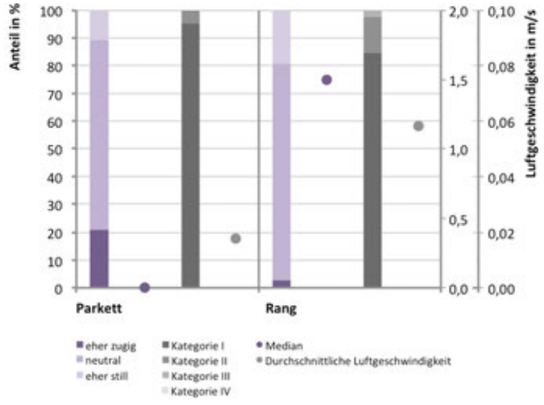

Abb. 441 Befragungs- und Messergebnisse zur Luftbewegung

der Messwerte auf Kategorie I. Im Vergleich zu den Befragungsergebnissen, die zum Einen für das Parkett einen Median von 0,0 und somit eine neutrale Bewertung ergaben und zum Anderen für den Rang eine mittlere Beurteilung von 1,5 zeigen, sodass die Luftbewegung als still bis sehr still wahrgenommen wird, ist eine gegenläufige Tendenz zu beobachten. Die Befragungsergebnisse zeigen im Gegensatz zu den Messergebnissen im Rang eine geringere Tendenz zu Zugerscheinungen. Dies wird auch dadurch bestätigt, dass im Parkett ein Anteil von 21,0% angab, Zug wahrzunehmen, während dies im Rang nur 2,8% äußerten. Übereinstimmend zeigt sich jedoch, dass weder subjektiv noch objektiv in Parkett und Rang Schwierigkeiten mit Zugerscheinungen auftreten.
Bei Gegenüberstellung der Ergebnisse der Nutzerbefragung und den Messungen in Bezug auf die Raumluftqualität ist keine Differenzierung zwischen Rang und Parkett möglich, da während des gesamten Betrachtungszeitraums im Rang ein Messausfall für die CO_2-Konzentration vorlag. Daher erfolgt lediglich ein Vergleich der Messwerte des stationären Messtorsos aus dem Parkett mit den Befragungsergebnissen von Personen, die ebenfalls dort platziert waren. Einen Hinweis, ob möglicherweise eine geringe Raumluftqualität vorliegt, geben Schwierigkeiten mit Müdigkeit und Konzentration. Nur 9,7% der Befragten gaben an, durch Müdigkeit beeinträchtigt gewesen zu sein. Mit 8,7% liegt ein noch geringerer Anteil vor, bei dem Konzentrationsschwierigkeiten auftraten. Beide Angaben geben keinen Hinweis darauf, dass Probleme hinsichtlich der Raumluftqualität bestehen. Die maximal gemessene CO_2-Konzentration in Höhe von 920 ppm liegt im hygienisch unbedenklichen Bereich und kann daher zu keiner körperlichen Reaktion in Form von Müdigkeit und Konzentrationsschwäche führen. Darüber hinaus sind keine extremen Empfindungen bezüglich der Raumluftqualität zu erwarten. Die Befragungsergebnisse zeigen, dass insgesamt 18,5% der Befragten die Raumluft als eher stickig empfanden, ein weitaus größerer Anteil empfand sie als neutral und 47,2% sogar eher als frisch, sodass auch durch die Befragungsergebnisse bestätigt werden kann, dass keine extremen Empfindungen bestehen. Der Median der Befragungsergebnisse liegt bei 0,0 und entspricht somit einem neutralen Empfinden gegenüber der Raumluftqualität. Diese Empfindung ist auf Grund der Messergebnisse nachvollziehbar, da die mittlere CO_2-Konzentration 662 ppm beträgt. 86,9% der Messwerte entfallen auf IDA I, während die restlichen 13,1% zu IDA II zählen, sodass mindestens normale Anforderungen an die Raumluftqualität erfüllt werden können. Dies spiegelt sich, wie beschrieben, auch in den Befragungsergebnissen wieder.
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Tendenzen zwischen subjektiven Befragungsergebnissen und objektiven Messwerten für nahezu alle untersuchten Parameter übereinstimmen und keine großen Diskrepanzen bestehen.

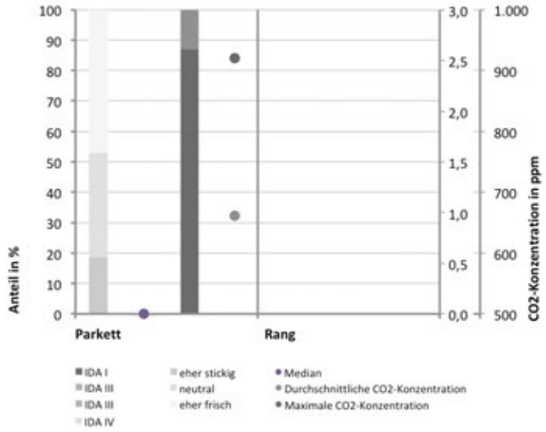

Abb. 442 Befragungs- und Messergebnisse zur Raumluftqualität

12. Zusammenfassung der Ergebnisse zum Intensivmonitoring

Im Zuge des Intensivmonitorings wurden im Scharoun Theater Wolfsburg, das bis Januar 2016 trotz Denkmalschutz mit hohen energetischen Zielen saniert worden ist, über ein Jahr Messungen zum Energieverbrauch und Raumkomfort vorgenommen.

Die Messungen des Energieverbrauchs haben auf endenergetischer Ebene gezeigt, dass er beim Scharoun Theater Wolfsburg im Verhältnis zur Querschnittserhebung knapp unter dem ermittelten Durchschnittswert liegt. Der größte absolute Endenergiebedarf besteht für die Bereiche Theatersaal, Foyer und Lager/Technik. Im Gegensatz zur Querschnittserhebung sind die Anteile der einzelnen Nutzungsbereiche am absoluten Endenergieverbrauch wesentlich ungleichmäßiger verteilt, sodass die Bereiche Theatersaal, Foyer und Lager/Technik mit Abstand die größten Verbrauchsanteile aufweisen. Ausschlaggebend für den großen Anteil am absoluten Endenergieverbrauch ist teilweise die überdurchschnittlich große Fläche der Nutzungsbereiche, aber auch der hohe Energieaufwand für die Klimatisierung. Insbesondere in den zuschauerfrequentierten Bereichen Theatersaal und Foyer fallen hohe spezifische Bedarfswerte für die Luftförderung an. Im Foyer entsteht durch die hohen Transmissionswärmeverluste aufgrund der großen Fensterflächen sowie die Lüftungswärmeverluste zusätzlich ein hoher spezifischer Bedarf für die Heizung. Besonders hoch ist der spezifische Gesamtbedarf jedoch im Theatersaal, da neben der Luftförderung ein hoher spezifischer Bedarf für die Beleuchtung und auch für die Kühlung anfällt. Die Verteilung des Endenergieverbrauchs auf einen Anteil Strom und Heizung/Warmwasser zeigt, dass der Verbrauch für Heizung/Warmwasser beim Intensivmonitoring gegenüber der Querschnittserhebung deutlich überwiegt.

Im Vergleich zur Querschnittserhebung ist auch der spezifische Verbrauch für Heizung/Warmwasser im Scharoun Theater Wolfsburg überdurchschnittlich hoch. Zurückzuführen ist dies zum einen auf die Gebäudekubatur sowie die großen Verglasungsflächen, die beide hohe Transmissionswärmeverluste begünstigen, und zum anderen auf die energetische Qualität der Gebäudehülle. Durch die Sanierung, infolge derer die energetische Qualität der Gebäudehülle verbessert wurde, indem unter anderem Undichtigkeiten geschlossen sowie einzelne Bauteile nachträglich gedämmt wurden, konnte eine erhebliche Verringerung des Verbrauchs für Heizung/Warmwasser erzielt werden. Der verbleibende Verbrauch entfällt im Scharoun Theater Wolfsburg ebenso wie in den anderen betrachteten Theaterspielstätten überwiegend auf die Beheizung. Anders als bei den meisten anderen Theaterspielstätten entsteht jedoch auch ein großer Anteil für die Dampferzeugung, da die Lüftungsanlage des Zuschauersaals über eine Einheit zur Zuluftbefeuchtung verfügt. Ein Anteil für die Warmwasserversorgung ist allerdings kaum vorhanden, da diese im Zuge der Sanierung mit Ausnahme des zentralen Künstlerduschbereichs auf eine dezentrale elektrische Erzeugung umgestellt wurde. Im Künstlerduschbereich besteht nur ein geringer Bedarf an Warmwasser, weil der Sanitärbereich aufgrund des Gastspielbetriebs nur wenig frequentiert wird. Da der Warmwasserbedarf als einziger Bedarfsanteil für Heizung/Warmwasser nutzungsbedingt ist, dieser aber sehr gering ist und es sich bei der Beheizung und der Dampferzeugung um klimaabhängige Bedarfe handelt, zeigt der Bedarf für Heizung/Warmwasser eine starke Abhängigkeit von den Außentemperaturen.

Im Rahmen der Querschnittserhebung wurde festgestellt, dass die Höhe des Stromverbrauchs in Abhängigkeit der Größe der Häuser, des Technisierungsgrads und der Nutzungsstruktur stark variiert. Das Scharoun Theater Wolfsburg weist im Verhältnis zu den anderen Theaterspielstätten trotz hohen Technisierungsgrads einen geringen spezifischen Stromverbrauch auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich, anders als bei den meisten Theaterspielstätten der Querschnittserhebung, um ein Gastspieltheater handelt und somit energieintensive Nutzungen, wie Werkstätten, aber auch der Probebetrieb, entfallen. Darüber hinaus wurden während der Sanierung mit Ausnahme der szenischen Beleuchtung große Teile der Beleuchtung auf LED-Technologie umgerüstet, sodass der spezifische Beleuchtungsenergiebedarf gesenkt werden konnte und im Vergleich zum Durchschnitt aus der Querschnittserhebung deutlich geringer ausfällt. Im Zuge der Querschnittserhebung wurde außerdem festgestellt, dass die Anschlussleistung der Lüftungsanlagen sowie der szenischen Beleuchtung Indikatoren für die Höhe des Stromverbrauchs sind. Obwohl das Scharoun Theater Wolfsburg einen überdurchschnittlich großen Anteil an belüfteter Fläche sowie eine hohe Anschlussleistung der Lüftungsanlagen aufweist, ist der Stromverbrauch dennoch insgesamt verhältnismäßig gering. Die Höhe der Anschlussleistung der Lüftungsanlagen sowie der szenischen Beleuchtung können auf das Scharoun Theater als Gastspielbetrieb also nicht als Indikatoren angewendet werden. Aufgrund des großen Anteils mechanisch belüfteter Fläche sowie der Reduzierung des Endenergiebedarfs für künstliche Beleuchtung entsteht der größte Anteil am Gesamtstrombedarf, nicht wie bei der Querschnittserhebung für die Beleuchtung, sondern für die Luftförderung.

Ebenso wie bei der Querschnittserhebung wurden bei dem Intensivmonitoring für den Gesamtstromverbrauch Monats- und Wochenverbrauchsprofile erstellt. Aufgrund der detaillierteren Messungen im Zuge des Intensivmonitorings konnte der Gesamtstromverbrauch außerdem einzelnen Stromkreisen zugeordnet werden. Das Monatsprofil wird zum einen durch die differierende Tagesanzahl der Monate geprägt und zum anderen durch die Vorstellungsanzahl, da ein starker Unterschied zwischen dem durchschnittlichen Stromverbrauch an Vorstellungs- und Leerstandstagen besteht. Im Fall des Intensivmonitorings charakterisieren vor allem die Spielpause im Sommer sowie die Monate November und Dezember das Monatsverbrauchsprofil. Während in der Spielpause keine Vorstellungen stattfinden und der Verbrauch dementsprechend niedrig ist, ist der Verbrauch in der Weihnachtszeit, bedingt durch die engere Taktung der Vorstellungen, stark erhöht. Gegenüber der Querschnittserhebung, die ein vergleichbares Profil zeigt, sticht der Monat Dezember jedoch stärker heraus. Besonders Stromkreise, bei denen in Abhängigkeit der Vorstellungen Verbräuche anfallen, zeigen in diesem Zeitraum erhöhte Verbrauchswerte. Hierbei handelt es sich vor allem um Verbräuche rund um die szenische Beleuchtung, zur Nutzung der Werkstätten, zur Bespielung des Foyers sowie bei der gastronomischen Versorgung von Besuchern und Personal des Theaters. Grund für die erhöhten Verbräuche ist, dass für die Vorbereitung der einzigen jährlichen Eigenproduktion in Form eines Weihnachtsmärchens ein regelmäßiger Probe- und Werkstattbetrieb stattfindet, der wegen des Gastspielbetriebs über das restliche Jahr entfällt.

Auch das Wochenprofil des Scharoun Theaters Wolfsburg ist mit dem der Querschnittserhebung vergleichbar, weist jedoch ebenfalls Unterschiede auf, die auf den Gastspielbetrieb zurückzuführen sind. Während das Wochenprofil der Querschnittserhebung deutliche Unterschiede zwischen den Wochentagen zeigt, sind diese beim Intensivmonitoring weniger ausgeprägt. Der dennoch leicht variierende Verbrauch an den verschiedenen Wochentagen entsteht durch die Anzahl an Vorstellungen, die je nach Wochentag über das Jahr hinweg unterschiedlich ist. Bei der Querschnittserhebung bestand ein großer Unterschied zwischen dem Verbrauch an Wochentagen und am Wochenende, der in dieser Art beim Intensivmonitoring nicht vorliegt. Im Scharoun Theater Wolfsburg ist der Verbrauch am Wochenende nur leicht reduziert, da der größte Anteil des Verbrauchs infolge der Vorbereitung und Durchführung von Vorstellungen anfällt. Die vorstellungsunabhängige Nutzung in einigen Bereichen des Gastspieltheaters, die hauptsächlich an Wochentagen stattfindet und am Wochenende entfällt, ist für den Stromverbrauch weniger prägend als in einem Repertoirebetrieb. Deutlich wird dies durch den Stromverbrauch der Stromkreise, die eine regelmäßige vorstellungsunabhängige Nutzung zeigen, wozu Verwaltungs- und Probebereiche gehören. In diesen Bereichen sind die Verbräuche am Wochenende reduziert.

Zur Analyse des Stromverbrauchs im Tagesverlauf wurden in Abhängigkeit der Jahreszeiten und des Nutzungszustands Referenzlastprofile erstellt. Anhand derer wurde festgestellt,

dass jahreszeitlich bedingt im Scharoun Theater Wolfsburg keine Unterschiede bestehen, sich die Tagesverläufe jedoch infolge des Nutzungszustands unterscheiden. Besonders deutliche Unterschiede treten zwischen Leerstands- und Nutzungstagen auf. Leerstandstage werden durch einen flachen Verlauf ohne große Lastausschläge charakterisiert, wohingegen am Vorstellungstagen bereits mit Beginn der Vorbereitungen für die Vorstellungen ein starker Lastanstieg auftritt. Insgesamt zeigt sich beim Scharoun Theater Wolfsburg ein sehr inkonstantes Lastverhalten. Auch dieses lässt sich auf den Gastspielbetrieb zurückführen, da vor allem während der Vorstellungen Spitzenlasten auftreten, welche sich im Verhältnis zu den anderen Theaterspielstätten im mittleren Bereich bewegen. Die Grund- und Mittellasten fallen dagegen verhältnismäßig gering aus, da außerhalb der Vorstellungszeiten nur wenig stromintensive Nutzungen anfallen. Erfolgt eine Einordnung aller Messwerte in Grund-, Mittel- und Spitzenlastbereich, so kann anhand der prozentualen Verteilung zwischen den Betriebsarten Repertoire-, EnSuite- und Gastspielbetrieb unterschieden werden.

Die Betrachtung der aus den einzelnen Stromkreisen resultierenden Lasten, die durch ihre Überlagerung das charakteristische Referenzlastprofil ergeben, verdeutlicht die unterschiedlichen Auslöser für das Auftreten der Lasten. Zum einen bestehen Stromkreise, deren Lasten vorstellungs- oder außenklimaabhängig und daher variabel auftreten, und zum anderen regelmäßig wiederkehrende Lasten, die sich nach Nutzungszeiten bestimmter Bereiche oder nach Betriebszeiten der Anlagentechnik richten. Während auf der einen Seite der Zeitpunkt des Auftretens der Lasten die Charakteristik des Tagesreferenzlastprofils bestimmt, wird dieses auf der anderen Seite auch durch die Höhe der Lasten aus den einzelnen Stromkreisen bestimmt. Durch die unterschiedliche Höhe der Lasten ist ihr Einfluss auf das Referenzlastprofil nicht gleich stark. Stromkreise, die zuschauerfrequentierte Bereiche bedienen sowie die Anlagentechnik und szenische Beleuchtung umfassen, zeigen die größten Auswirkungen auf den Lastverlauf.

Die Betrachtung des Energieverbrauchs auf endenergetischer Ebene hat gezeigt, dass der Verbrauch für Heizung/Warmwasser beim Scharoun Theater Wolfsburg gegenüber dem Stromverbrauch stark überwiegt. Erfolgt die Gegenüberstellung auf primärenergetischer Ebene, so gleichen sich die beiden Anteile stärker an, da die Deckung des Bedarfs für Heizung/Warmwasser, wie in den meisten Theaterspielstätten, über einen Fernwärmeanschluss an das öffentliche Netz erfolgt, das einen geringeren Primärenergiefaktor als Strom besitzt. Im Verhältnis zur Querschnittserhebung zeigt das Scharoun Theater Wolfsburg einen unterdurchschnittlichen Primärenergieverbrauch, da es einen geringeren Stromverbrauch aufweist.

Neben der Reduktion des Energieverbrauchs besteht bei Sanierungen gleichzeitig das Ziel, den Raumkomfort beizubehalten oder zu verbessern. Ein wichtiges Kriterium zur Bewertung des Raumkomforts ist die Lufttemperatur. Im Rahmen der Querschnittserhebung wurde festgestellt, dass die Lufttemperatur im Zuschauersaal im Vergleich mit entsprechenden Normen tendenziell zu hoch ausfällt. Auch im Scharoun Theater Wolfsburg wurden verhältnismäßig hohe Lufttemperaturen erfasst, die besonders bei einer verstärkten Frequentierung des Zuschauersaals und dem damit einhergehenden hohen Wärmeeintrag auftraten. Übereinstimmend mit den Messergebnissen wurde die Lufttemperatur auch nach Auswertung der Nutzerbefragung subjektiv als eher etwas zu hoch eingeschätzt. Anders als bei der Querschnittserhebung wurden im Rahmen des Intensivmonitorings nicht nur an einer Stelle, sondern an verschiedenen Stellen des Zuschauersaals Parameter zum Raumkomfort erfasst. Die Aufgliederung der Befragungs- und Messergebnisse auf Parkett und Rang ergab objektiv und subjektiv höhere thermische Empfindungen im Rang.

Die Messungen zur Luftgeschwindigkeit zeigten, dass im Scharoun Theater Wolfsburg vor allem im Heizfall temporär zu hohe Werte vorliegen, sodass zeitweise eine Beeinträchtigung der Zuschauer durch Zugerscheinungen zu befürchten ist.

Neben dem thermischen Komfort kann auch die Luftqualität das Behaglichkeitsempfinden beeinflussen. Besonders in Theaterspielstätten ohne Möglichkeit der Zuluftbefeuchtung wurden sehr niedrige relative Luftfeuchten festgestellt. Im Scharoun Theater Wolfsburg konnten aufgrund der Zuluftbefeuchtung besonders niedrige Werte während der Vorstellungszeit vermieden werden, dennoch bewegt sich die relative Luftfeuchte tendenziell im unteren Behaglichkeitsbereich. Auch hier stimmen die Messergebnisse in der Tendenz mit den Befragungsergebnissen überein.

Ernsthafte Auswirkungen auf die Gesundheit kann die CO_2-Konzentration in der Raumluft ausüben. Im Verhältnis zur Querschnittserhebung zeigt das Scharoun Theater Wolfsburg im Mittel geringe CO_2-Konzentrationen. Nur temporär überschritten die Messwerte die Grenze zum hygienisch auffälligen Bereich. Die geringen Durchschnittswerte sind auf die CO_2-gesteuerte Lüftungsanlage zurückzuführen, für die während des Messzeitraums sehr niedrige Sollwerteinstellungen vorlagen.

Die Gegenüberstellung der angestrebten energetischen Sanierungsziele mit dem realisierten Energieverbrauch hat gezeigt, dass die Ziele in den bisherigen Betriebsjahren noch nicht vollständig erreicht werden konnten. Während für den Verbrauchsanteil Heizung/Warmwasser bereits eine Erreichung der Zielwerte festgestellt wurde und somit anhand des Scharoun Theaters Wolfsburg deutlich wird, dass trotz Auflagen des Denkmalschutzes auch durch geringe Eingriffe in die Gebäudesubstanz Energieeinsparungen realisiert werden können, wurde der angestrebte Zielwert beim Stromverbrauch noch überschritten. Gründe hierfür sind vor allem Einstellungen bei der Anlagentechnik. Insbesondere betrifft dies die Lüftungsanlage im Zuschauersaal. Hier sollten die Betriebszeiten stärker in Anlehnung an die Nutzung ausgelegt werden und auch die Sollwerte der CO_2-Konzentration in der Raumluft sollten überprüft und unter Berücksichtigung der Außenluftkonzentration gewählt werden. So kann die Förderung eines aus hygienischen Gründen überdimensionierten Luftvolumens verhindert werden. Durch Optimierungen bei den Einstellungen der Lüftungsanlage besteht außerdem die Möglichkeit, Lüftungswärmeverluste zu verringern und so weitere Einsparungen für den Verbrauchsanteil Heizung/Warmwasser zu generieren.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Kälteanlage aufgrund der hohen Temperaturen in der Löschwasserzisterne, die zur Rückkühlung der Kälteanlage verwendet wird, in ihrer Kühlfunktion eingeschränkt ist. Hier sollten alternative Lösungsansätze zur Rückkühlung entwickelt werden, um auch bei hohen Außentemperaturen im Zuschauersaal angenehme Temperaturen zu gewährleisten.

Mit dem Intensivmonitoring konnte das Potential energetischer Sanierungen, auch unter Berücksichtigung von Auflagen des Denkmalschutzes, aufgezeigt werden. Moderate Maßnahmen an der Gebäudehülle können bereits zu einer starken Reduzierung des Verbrauchs für Heizung/Warmwasser beitragen. Ebenfalls großen Einfluss haben Lüftungswärmeverluste auf die Höhe des Verbrauchs für Heizung/Warmwasser, da insbesondere in zuschauerfrequentierten Bereichen große Luftvolumina umgesetzt werden. Über die Reduzierung des Außenluftvolumenstroms auf das hygienisch notwendige Maß sowie den Einbau einer Wärmerückgewinnung besteht weiteres Einsparpotential. Der Stromverbrauch kann durch die Umrüstung der Beleuchtungsanlagen reduziert werden. Vor allem Einstellungen der Anlagentechnik, die nicht auf die Nutzungssituation abgestimmt sind, können für die Nichterreichung energetischer Zielsetzungen verantwortlich sein.

Durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Querschnittserhebung, die überwiegend Repertoirehäuser umfasst, mit dem Intensivmonitoring, welches mit dem Scharoun Theater Wolfsburg einen Gastspielbetrieb beinhaltet, hat sich die Auswirkung der Betriebsform von Theaterspielstätten auf den Energieverbrauch gezeigt, da sich Größe und Frequentierung der verschiedenen Nutzungsbereiche einer Theaterspielstätte aus den Anforderungen der jeweiligen Betriebsform ergeben. Dies sollte zukünftig bei der Einordnung des Energieverbrauchs von Theaterspielstätten sowie der Zieldefinition bei Sanierungen berücksichtigt werden.

Zusammenfassung

13. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde für Theaterspielstätten nicht nur in einer Querschnittserhebung von ausgewählten Spielstätten der Energieverbrauch ermittelt und aus diesen Kennwerte gebildet, sondern auch Faktoren aufgezeigt, die maßgeblich auf die Entstehung des Energieverbrauchs Einfluss nehmen. Mit den generierten Vergleichskennwerten ist es zukünftig möglich, den Energieverbrauch von Gebäuden dieser Typologie besser einzuordnen und zu bewerten. Darüber hinaus können aus den Erkenntnissen über die Einflussfaktoren Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energieverbrauchs abgeleitet werden, die insbesondere vor dem Hintergrund vieler anstehender Theatersanierungen in der Praxis Anwendung finden können.

Durch die intensive Auseinandersetzung mit den untersuchten Theaterspielstätten ist auch die Komplexität dieses Gebäudetypus deutlich hervorgetreten. Bei der Produktion und Aufführung eines Theaterstücks sind Akteure unterschiedlicher Berufsgruppen beteiligt, sodass differenzierte Anforderungen an die Räumlichkeiten bestehen, in denen die entsprechenden Tätigkeiten ausgeführt werden. Da die vielen unterschiedlichen Nutzungen zur Sicherstellung optimaler Arbeitsabläufe weitestgehend alle unter einem Dach untergebracht sind, handelt es sich bei Theaterspielstätten um große Gebäude mit komplexen Raumstrukturen. Um die raumkomforttechnischen Anforderungen bedienen zu können, sind umfangreiche und energieintensive gebäudetechnische Maßnahmen erforderlich, zu denen insbesondere auch Lüftungsanlagen zählen. Bei der Abfrage der vorhandenen Gebäudetechnik wurde festgestellt, dass in vielen Fällen nur unvollständige Anlagenkataster vorliegen, was zum einen auf das Alter der Anlagen und zum anderen auf die gewachsenen technischen Strukturen zurückzuführen ist. Der technische Direktor von Theaterspielstätten ist für alle technischen Abläufe eines Theaters verantwortlich, sodass sein Aufgabengebiet die Koordination verschiedener Berufsgruppen umfasst. Zu diesen zählen vor allem theaterspezifische Berufszweige wie Beleuchter und Tontechniker. Auch die technische Aufsicht über die Werkstätten und die Anlagen- und Klimatechnik fallen in sein Aufgabengebiet. Da seine Tätigkeiten in erster Linie jedoch auf die erfolgreiche Durchführung der Vorstellungen ausgerichtet ist und er oftmals selbst ursprünglich aus einem theaternahen Berufszweig stammt, zählt die Expertise im Bereich der Anlagen- und Klimatechnik meist nicht zur Kernkompetenz eines technischen Direktors. Hinzu kommt, dass aufgrund des sehr begrenzten Budgets bei den öffentlichen Trägern der Repertoirebetriebe nur in wenigen Theaterspielstätten ein eigener Mitarbeiter für Anlagen- und Klimatechnik zur Verfügung steht, sodass die Betreuung dieses Bereichs durch Mitarbeiter anderer Berufsgruppen übernommen wird. Um einen optimalen Betrieb der Anlagentechnik sicherzustellen und somit vorhandene Energieeinsparpotentiale ausschöpfen zu können, müsste zunächst eine lückenlose Aufnahme der vorhandenen technischen Anlagen erfolgen. Anschließend könnten diese auf ihre Laufzeiten und Einstellungen überprüft werden, um gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. Das Beispiel des Scharoun Theaters hat gezeigt, dass hier große Einsparpotentiale vorhanden sind. Darüber hinaus werden zur optimalen Einstellung der Anlagen die Expertise eines Anlagen- und Klimatechnikers benötigt sowie Zeitkapazitäten des technischen Personals am Theater.

Die Arbeitsabläufe haben sich mit Fortschreiten der technischen Möglichkeiten geändert, was sich in einem gesteigerten Platzbedarf niederschlägt, der vielerorts durch Anbauten an die bestehende Gebäudesubstanz bedient wurde. Gebäudepläne oder Raumbücher, welche die aktuelle bauliche und nutzungstechnische Situation zeigen, bestehen nicht immer, sodass hier eine Aufnahme des Gebäudes oder eine Aktualisierung der vorhandenen Pläne erfolgen muss, um die Gebäudestruktur vollständig erfassen zu können. Des Weiteren sind durch die Anbauten Gebäudeensembles entstanden, die sich aus Bauteilen unterschiedlicher Epochen und somit energetischer Standards zusammensetzen, die durch die Konstruktionsarten jeweils verschiedene Situationen bergen. Hinzu kommt, dass die Aufbauten der einzelnen Bauteile sowohl für den Originalbau als auch für die Anbauten oftmals nicht ausreichend dokumentiert sind, sodass über die energetische Qualität der Gebäudehülle Annahmen auf Grundlage der Baualtersklasse getroffen werden oder Untersuchungen erfolgen müssen. Bei der baulichen und energetischen Ertüchtigung der Gebäudesubstanz von Theaterspielstätten bestehen somit differenzierte Herausforderungen, die zusätzlich durch den Denkmalschutz, dem viele der Gebäude unterliegen, erweitert werden. Da wie beim Scharoun Theater Wolfsburg große Eingriffe in die äußere Gestaltung der Gebäude ausgeschlossen sind, sind nur bedingt Möglichkeiten zur Reduzierung von Transmissionswärmeverlusten vorhanden. Somit kommt der Ausschöpfung der energetischen Einsparpotentiale im Betrieb der Anlagentechnik eine Schlüsselrolle zu.

Einen weiteren Einfluss auf den Energieverbrauch üben die Nutzungsabläufe im Gebäude aus. In Theaterspielstätten unterliegen diese in bestimmten Bereichen zwar Regelmäßigkeiten, jedoch steht die Nutzung zuschauerfrequentierter Bereiche in direkter Abhängigkeit zu den Vorstellungen. Dies stellt besonders im Betrieb der Anlagentechnik eine Herausforderung dar, da besonders die raumklimatischen Anlagen, die den Zuschauersaal bedienen, hohen Komfortansprüchen gerecht werden müssen und gleichzeitig große Anschlussleistungen aufweisen. Um einen energetisch optimierten Betrieb zu gewährleisten, müsste die Anlagensteuerung, beispielsweise bei Laufzeiten, Einstellung von Temperaturen und Volumenströmen, flexibel auf die verschiedenen Nutzungssituationen reagieren. Hierzu bieten viele der Anlagen aufgrund ihres Alters jedoch weder technisch die Steuerungsmöglichkeiten noch können Einstellungen zentral erfolgen, da sie nicht an Gebäudeleitsysteme angeschlossen sind. Darüber hinaus fehlen in den Theaterspielstätten, wie bereits erläutert, die Mitarbeiterkapazitäten und auch die erforderlichen Fachkenntnisse.

Da die Nutzungsabläufe in den einzelnen Theaterspielstätten einen Einfluss auf den Energieverbrauch ausüben, ist für dessen Höhe sowie die tägliche und monatliche Verteilung auch die Betriebsform entscheidend. Im vorliegenden Forschungsprojekt erfolgte innerhalb der Querschnittserhebung eine Fokussierung auf Theaterspielstätten im Repertoirebetrieb. Die Gegenüberstellung mit den im Zuge des Intensivmonitorings generierten Ergebnissen des Scharoun Theaters Wolfsburg, welches ein Gastspielhaus ist, hat bereits Unterschiede in der Nutzung und damit auch im Energieverbrauch offenbart. Eine weitere differenziertere Untersuchung der Betriebsformen Repertoire-, Ensuite- und Gastspieltheater könnte weitere Erkenntnisse bringen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden nicht nur der Energieverbrauch untersucht, sondern auch Behaglichkeitsaspekte, indem in den Zuschauersälen Messungen zum thermischen Komfort und zur Luftqualität durchgeführt wurden. Physikalisch lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch für Strom sowie Heizung/Warmwasser und dem Raumkomfort ableiten. Je enger die Anforderungsbereiche für die Temperaturen und weitere Behaglichkeitsparameter gesteckt sind, desto energieverbrauchsintensiver sind die Klimatisierungsmaßnahmen. Ziel ist es daher nicht, durch eine Reduzierung der Klimatisierungsmaßnahmen Energieeinsparungen zu generieren, sondern diese durch eine effizientere Steuerung der Anlagen bei gleichzeitig hohem Raumkomfort herbeizuführen. Es konnte im Zuge der Forschungsarbeit jedoch kein

direkter Zusammenhang zwischen dem Standard des Raumklimas in den Zuschauersälen und dem Energieverbrauch festgestellt werden, da zum einen der Zuschauersaal nur eine Teilnutzung einer Theaterspielstätte ausmacht und zum anderen zu viele technische und bauliche Faktoren eine Rolle spielen.
Immer stärker rückt die Auseinandersetzung mit dem Thema Nachhaltigkeit in deutschen Theaterspielstätten in den Fokus. Dies wird auch aufgrund von Bestrebungen seitens übergeordneter Theaterverbände und durch die Zunahme externer Zwänge begünstigt.
Besonders die „Deutsche Theatertechnische Gesellschaft“ (DTHG) hat in den letzten Jahren dazu beigetragen, das Thema voranzubringen. Mit der Ernennung einer Beauftragten für Nachhaltigkeit wurde den Mitgliedern eine Ansprechpartnerin zur Seite gestellt, durch welche auch die Initiative „Energieeffizienz und Nachhaltigkeit am Theater“ (EnAT) ins Leben gerufen wurde, die sich vor allem in Workshops dem Thema nähert und durch Beispiele aus der Praxis Wege für mehr Nachhaltigkeit am Theater aufzeigt. Auch auf den regelmäßig stattfindenden „Bühnentechnischen Tagungen“ (BTT) wird dem Thema vermehrt in Vorträgen und Workshops Raum gegeben und auf der Fachmesse „Stage|Set|Scenery“ werden immer mehr alternative und nachhaltigere Produkte für die Produktion von Vorstellungen gezeigt. Eine breite Kommunikation des Themas unter den Bühnenangehörigen findet durch das Erscheinen von Artikeln in der „Bühnentechnischen Rundschau“ (BTR) statt, ebenso wie im „Podium“, einem Journal der DTHG, und im Fachblatt der Genossenschaft deutscher Bühnen-Angehöriger (GBDA).
Auf Grund veränderter gesetzlicher Regelungen sowie dem baulichen und technischen Zustand der Gebäudesubstanz besteht für die Theaterspielstätten ein externer Zwang sich mit dem Thema Energie und Nachhaltigkeit auseinanderzusetzen.
Da die Instandhaltung der Theaterspielstätten nicht zuletzt aufgrund der finanziellen Lage der Kommunen, der Länder und des Bundes lange Zeit vernachlässigt wurde, befinden sich viele in einem schlechten Zustand, der eine umfangreiche Sanierung erforderlich macht, um auch eine zukünftige Nutzung der Gebäude zu ermöglichen. Schätzungen zu Folge weisen 80% der Theaterspielstätten einen massiven Sanierungsbedarf auf. Etwa für ein Drittel des Gebäudebestands bestehen konkrete Planungen oder die Sanierungsmaßnahmen haben bereits begonnen. Um die Planungen in Bezug auf die Gebäudesubstanz und die Anlagentechnik anzustoßen, ist zunächst eine tiefgreifende Bestandsaufnahme notwendig, zu der auch eine Auseinandersetzung mit dem Energieverbrauch gehört, damit anschließend Zielsetzungen erarbeitet werden können. Eine Hilfestellung, wie die Planung von Sanierungsmaßnahmen erfolgen kann, gibt die DTHG, die sich im Rahmen des Projekts „Theaterlandschaft – Baukultur für die Zukunft sichern“ intensiv mit dem Thema auseinandergesetzt hat. In einer Reihe von Symposien sind Erkenntnisse gewonnen worden, die im Leitfaden „Bau und Sanierung von Kulturbauten“ zusammengefasst worden sind. Zu den wenigen Theaterspielstätten, bei denen die Sanierungsmaßnahmen bereits abgeschlossen sind, zählt das Scharoun Theater Wolfsburg, das in Hinblick auf die hohen energetischen Zielsetzungen trotz Denkmalschutz als Vorbild für andere Theaterspielstätten dienen kann. Ebenso mit energetischen Zielsetzungen wurden das Schauspielhaus des Staatstheaters Nürnberg sowie das Theater und Orchester Heidelberg saniert. Planungen zur Sanierung, die in der Öffentlichkeit stark diskutiert werden, bestehen für das badische Staatstheater Karlsruhe, das Nationaltheater Mannheim und die Städtischen Bühnen Frankfurt am Main. Besonders bei den Städtischen Bühnen Frankfurt am Main findet exemplarisch eine intensive Auseinandersetzung mit den grundlegenden Sanierungsmöglichkeiten sowie eine Gegenüberstellung der finanziellen Aufwendungen statt, die auch einen Abriss und Neubau einbeziehen. Im Zuge dessen ist, initiiert vom Deutschen Architekturmuseum (DAM), die Wanderausstellung „Große Oper – Viel Theater“ entstanden, die eine Auswahl neuerrichteter und sanierter europäischer Bühnenbauten beispielhaft vorstellt. Ein besonderer Fokus der Ausstellung liegt neben dem Aspekt der gesellschaftlichen Bedeutung auf den Bau- und Sanierungskosten. Gerade die Finanzierung der Sanierungsmaßnahmen, die eine erhebliche Belastung der öffentlichen Träger darstellt, ist Grund für das lange Herauszögern der notwendigen Maßnahmen, infolgedessen der Sanierungsstau entstanden ist. Neben der Bausubstanz ist es vor allem die veraltete Gebäude- und Anlagentechnik, die nicht nur die künstlerischen Möglichkeiten eingeschränkt, sondern die Gefahr einer Schließung des Theaters im Falle eines Ausfalls birgt. Gerade die zentrale Gebäude- und Anlagentechnik stellt jedoch aufgrund des technischen Fortschritts bei der Planung und Sanierung einen großen Unsicherheitsfaktor dar und ist oftmals für eine ungünstige Kostenentwicklung verantwortlich, sodass die Träger sich vor den Investitionen trotz der Einsparmöglichkeiten, die aufgrund der hohen jährlichen Energiekosten bestehen, scheuen.
Eine Lösung zur Vermeidung finanzieller Risiken, bei der lediglich Sanierungsmaßnahmen an der Haus- und Anlagentechnik stattgefunden haben, zeigen die Deutsche Oper Berlin, das Staatstheater Hannover und die Theater Chemnitz. Als Vorreiter hat als erstes die Deutsche Oper Berlin im Jahr 2009 ein Energiespar-Contracting abgeschlossen. Hierbei übernimmt das Energiedienstleistungsunternehmen Investitionen für Effizienzmaßnahmen im Bereich der Gebäudetechnik und garantiert dem Vertragspartner eine festgelegte jährliche Energieeinsparung. Im Gegenzug erfolgt die Refinanzierung der Investitionen des Energiedienstleistungsunternehmens durch die Kosteneinsparung aufgrund gesunkener Energiekosten. Im Falle des Staatstheaters Hannover wurden im Jahr 2015 zahlreiche Maßnahmen im Bereich der Klimatechnik, der Wärmeversorgung und der Beleuchtung realisiert, wobei solche mit Auswirkungen auf künstlerische Möglichkeiten ausgeschlossen wurden. Durch diese Maßnahmen konnte eine erhebliche Kosteneinsparung herbeigeführt werden. Ähnliches ist bei den Theatern Chemnitz zu beobachten. Hier könnte ein weiterer Ansatz in der Untersuchung alternativer Finanzierungsmodelle bestehen.
Ergänzend zu den drohenden Schließungen der Theaterspielstätten aufgrund sicherheitstechnischer Mängel hat die Bundesregierung mit der gesetzlichen Verpflichtung zur Durchführung von Energieaudits bis Dezember 2015 im Zuge ihrer Energiepolitik dazu beigetragen, die Theaterspielstätten mit der Auseinandersetzung zum Energieverbrauch zu konfrontieren. In Abhängigkeit der Beschäftigtenanzahl sowie der prozentualen Beteiligung einer oder mehreren öffentlichen Stellen sind Klein- und Mittelständische Unternehmen (KMU), zu denen in vielen Fällen auch Theater zählen, zur Bestandsaufnahme aller energetischen Verbraucher ihrer Liegenschaften und zur Entwicklung von Maßnahmen, die einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess herbeiführen, verpflichtet, sodass langfristig ein höherer Energieeffizienzstandard erreicht wird. Eine Umfrage der DTHG unter den Theatern hat gezeigt, dass viele dieser Maßnahme vor ihrer Durchführung eher negativ gegenüberstanden. Vergleichbare energetische Bestandsaufnahmen auf freiwilliger Basis waren aufgrund fehlender Personalressourcen sowie eines geringen Eigenengagements nur in wenigen Häusern vorhanden. Die ablehnende Haltung hat sich jedoch nach der Durchführung der Energieaudits erheblich gewandelt, sodass nun in den Theatern eine deutlich positivere Haltung gegenüber der Auseinandersetzung mit dem Energieverbrauch und dem Umgang mit Ressourcen besteht. Eine zentrale Gegenüberstellung

der Energieaudits, eine Überwachung der weiteren Entwicklung des Energieverbrauchs sowie eine Veröffentlichung der Ergebnisse wären wünschenswert. Es ist zu vermuten, dass nicht zuletzt die Energieaudits den Anstoß für die Durchführung einzelner Effizienzmaßnahmen in Theaterspielstätten gegeben haben. Wie auch in der Querschnittserhebung, wurde die Beleuchtung in vielen Theatern als Verursacher für einen großen Anteil des Stromverbrauchs identifiziert. So wurde in den Staatstheatern Wiesbaden, Kassel und Darmstadt sowie im Stadttheater Münster große Teile der vorhandenen Beleuchtung durch LED-Technologie ersetzt. Größtenteils ausgenommen ist dabei noch die szenische Beleuchtung, da keine Einschränkungen bei bisherigen künstlerischen Möglichkeiten hervorgerufen werden sollen. Bei anderen Theaterspielstätten hatte sich bereits vor der Durchführung der Energieaudits ein Bewusstsein für die Notwendigkeit einer nachhaltigeren Energieversorgung entwickelt. Beispielhaft ist hier das Schauspielhaus Hamburg zu nennen, welches seit 2008 Ökostrom bezieht und somit CO_2-neutral arbeitet. Nichtsdestotrotz sind die bisher in deutschen Theaterspielstätten umgesetzten Maßnahmen ausbaufähig.

Ein Hemmnis für die Durchführung von Energieeffizienzmaßnahmen aus eigenem Antrieb ist unter anderem das Finanzierungsmodell deutscher Theaterspielstätten. Je nach Rechtsform des Theaters erfolgt eine Finanzierung des Theateretats hauptsächlich aus Geldern der Kommunen, der Länder und des Bundes. Im Theateretat enthalten sind Gelder zur Beschäftigung des Personals und zur Produktion der Theaterstücke, nicht jedoch zur Unterhaltung des Theatergebäudes. Diese werden von den Trägern zusätzlich zum Theateretat übernommen, sodass eine Budgetverwaltung für die Energiekosten nicht durch den technischen Direktor stattfindet. Werden an dieser Stelle also Einsparungen generiert, kommen diese nicht dem Theater zu Gute, sondern entlasten die öffentlichen Kassen. Infolgedessen besteht für die Theater kein direkter finanzieller Anreiz, den Energieverbrauch durch selbst initiierte Maßnahmen, die sie mit Hilfe der knappen vorhandenen Personalkapazitäten umsetzen müssen, zu reduzieren. Um hier die Motivation zu erhöhen, müsste ein Modell gefunden werden, bei dem zumindest ein Teil der eingesparten Gelder an die Theater zurückfließen. Eine alternative Möglichkeit, die im Staatstheater Hannover im Zuge des Energiespar-Contractings initiiert wurde, ist die Festlegung einer leistungsorientierten Bezahlung in den Tarifverträgen für Mitarbeiter im technischen Bereich.

Ein anderer Weg, der erst durch ein abweichendes System der Subventionierung möglich wird, wurde in England eingeschlagen. Der Arts Council England entscheidet national anhand von festgeschriebenen Kriterien über die Vergabe öffentlicher Gelder zur Förderung von Kultureinrichtungen. Da hier die Überzeugung besteht, dass Kultureinrichtungen eine wichtige Rolle bei der Stärkung des Umweltbewusstseins in der Gesellschaft zukommen, zählt seit 2012 die Nachhaltigkeit einer Organisation, die anhand von Berichten und Konzepten hierzu bewertet wird, zu den Förderungskriterien. Unterstützung erhalten die kulturellen Einrichtungen bei der Erstellung der Berichte und Konzepte von der gemeinnützigen Organisation Julie's Bicycle, die Aktionen, Workshops und Beratungsmöglichkeiten anbietet. Die Auflagen des Arts Council England haben dazu geführt, dass der Energieverbrauch im Kultursektor gegenüber 1990 um 23% gesenkt werden konnte.

Neben der Aufführung von Theaterstücken, die sich offensiv dem Thema Nachhaltigkeit widmen, unternehmen die subventionierten Theater konkrete Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs. Diese bestehen, so wie in den deutschen Theatern, zum einen oftmals in der Umrüstung auf LED-Beleuchtung, zum anderen jedoch auch in einer effizienteren Wärmeerzeugung oder der Eigenproduktion von Strom. So hat das Theatre Brycheiniog in Brecon Photovoltaik auf dem Dach installiert, das Arcola Theater im Osten Londons Wasserstoff-Brennstoffzellen angeschlossen und das National Theater verfügt über ein eigenes Blockheizkraftwerk. Das Belgrade Theatre in Coventry hat ein „Green Team" im Haus gebildet, welches Mitglieder aus allen Fachbereichen beinhaltet und Initiativen im Bereich der Nachhaltigkeit entwickelt. Allgemein üblich ist es bereits, dass die Energiepolitik der jeweiligen Theater auf den Homepages der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Im deutschsprachigen Raum wurde das Thema Nachhaltigkeit in der Oper Zürich und im Theater Winterthur aufgegriffen, indem eine Ökobilanzierung für das gesamte Theater durchgeführt wurde.

Ebenfalls wichtig, um eine Reduzierung des Energieverbrauchs bei öffentlich subventionierten Betrieben herbeizuführen, ist die Transparenz. In Schweden sind Staatsbetriebe seit 2008 dazu verpflichtet, eine jährliche Berichterstattung zu ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten vorzunehmen. So veröffentlichen das Königlich dramaturgische Theater und die Königliche schwedische Nationaloper ihre Zahlen zum Energie- und Materialverbrauch, dem Abfallaufkommen sowie den CO_2-Emissionen.

Die bisherigen Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs in deutschen Theaterspielstätten zeigen, dass bereits ein Wandel begonnen hat. Die mittlerweile positive Grundstimmung gegenüber dem Thema Nachhaltigkeit kann genutzt werden, um weitere Potentiale auszuschöpfen. Wichtige Impulse zu alternativen und transparenten Herangehensweisen geben hierbei die internationalen Beispiele.

Jede Theaterspielstätte ist jedoch baulich und technisch sehr individuell, sodass spezifische Lösungen erarbeitet werden müssen. Die anstehenden Sanierungen bieten jedoch eine einmalige Chance, die Substanz des Gebäudebestands „Theaterspielstätte" energetisch zu ertüchtigen und durch die Berichterstattung in öffentlichen Medien das Thema weiter in das Bewusstsein der Gesellschaft zu rücken.

Literatur:

[01] Adam, C., Döring, R. (2018)
[03] Baumast, A. (2016)
[04] Baumast, A., Spruck, W., [111] Wilcken, L. (2016)
[08] Bosold, U., Hüppe, H. (2016)
[20] Dege, S. (2019)
[24] Deutscher Bühnenverein (2019)
[23] Deutscher Bühnenverein (2016)
[47] Gerdemann, C. (2016)
[56] Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2018)
[69] Julie's Bicycle (2019a)
[70] Julie's Bicycle (2019b)
[83] Rhode, W. (2019)
[86] Rowohlt, J. (2018)
[87] Rowohlt, J. (2019)
[88] Sächsische Energieagentur GmbH (2016)
[101] The Belgrade Theatre (2019)
[111] Wilcken, L. (2016)
[112] Williams, H. (2015)

14. Glossar

Abluft [°C]
Bezeichnung der aus einem Raum abgeführten Luft. Angabe in der Einheit Grad Celsius.

Absolute Luftfeuchte [g/m³]
Beschreibung der Wasserdampfmasse in einem bestimmten Luftvolumen. Angabe in der Einheit Gramm pro Kubikmeter.

Absoluter Verbrauch - Strom, Heizung und Warmwasser [kWh]
Benennung des Gesamtenergieverbrauchs der Bereiche Strom, Heizung und Warmwasser eines betrachteten Gebäudes. Angabe in der Einheit Kilowattstunden.

A/V-Verhältnis [m^{-1}]

Bezeichnung des Verhältnisses von wärmeübertragender Hüllfläche zum beheizten Volumen eines Gebäudes und Maß für die Kompaktheit des Baukörpers. Angabe in der Eins pro Meter.

Bekleidungsfaktor [clo]
Kennzeichnung des Wärmedurchlasswiderstands der Bekleidung. Angabe in der Einheit clothing (Englisch: Kleidung).

Betrachtungszeitraum Jahr [a], Tag [d], Stunde [h]
Angabe des Zeitraums, über den eine Auswertung erfolgt, zur Schaffung einer zeitbasierten Vergleichsmöglichkeit. Angabe der Einheit in Jahren, Tagen und Stunden.

CO_2-Emissionen [g/kWh]
Bezeichnung der Emissionen von Treibhausgasen, welche durch die Verbrennung kohlenstoffhaltiger Materialen freigesetzt werden. Angabe der Einheit in Gramm pro Kilowattstunde.

CO_2-Konzentration [ppm]
Bezeichnung des in der Luft enthaltenen Volumenanteils des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid. Angabe der Einheit in parts per million (Englisch: Anteile pro Millionen).

Draught Rating – DR [%]
Bezeichnung eines Indexes, welcher eine quantitative Vorhersage des prozentualen Anteils von Personen darstellt, welcher sich durch Zugluft beeinträchtigt fühlt. Angabe in der Einheit Prozent.

Endenergie [kWh]
Anteil der Primärenergie, welcher welcher nach Umwandlungs- und Übertragungsverlusten dem Verbraucher zur Verfügung steht. Angabe in der Einheit Kilowattstunde.

Energieumsatz [met], [W/m²]
Definition als Energie, die ein Mensch zur Aufrechterhaltung der Lebensvorgänge im Körper in Abhängigkeit zum Tätigkeitsgrad benötigt. Angabe als metabolisches Äquivalent oder in der Einheit Watt pro Quadratmeter Hautoberfläche.

Fortluft [°C]
Bezeichnung der aus einem Raum ins Freie abgeführten Luft. Angabe in der Einheit Grad Celsius.

Frischluftanteil [%]
Beschreibung des Anteils von Außen zugeführter Luft in der Mischluft. Angabe in der Einheit Prozent.

Frischluft [°C]
Bezeichnung der einem Raum von Außen zugeführten Luft. Angabe in der Einheit Grad Celsius.

Kaltwassersatz
Beschreibung eines Kältesystems, welches einem Medium im Kühlwasserkreislauf thermische Energie entzieht um dieses abzukühlen und anschließend zur Kühlung einzusetzen.

Kühlleistung [kW]
Kennzeichnung der thermischen Energie, die einem Raum mittels eines Kühlsystems je Zeiteinheit entzogen werden kann. Angabe in der Einheit Kilowatt.

Löschwasserzisterne
Bezeichnung eines unterirdischen Behälters, welcher einen Vorrat an Löschwasser enthält, um bei Bedarf die Erfüllung und Sicherung des Brandschutzes zu gewährleisten.

Luftbewegung [m/s]
Bezeichnung der Bewegung der Luft innerhalb eines Raumes. Relevanz für das lokale thermische Empfinden aufgrund von Zugluft. Angabe in der Einheit Meter pro Sekunde.

Lufttemperatur [°C]
Bezeichnung der Temperatur, welche innerhalb eines Gebäudes bei Messung der Raumluft erfasst wird. Angabe in der Einheit Grad Celsius.

Messintervall [I]
Definition des zeitlichen Abstands zwischen der Aufzeichnung zweier Messwerte. Bezeichnung einer Viertelstündigen Zeitspanne im vorliegenden Forschungsprojekt. Angabe in der Einheit Intervall.

Mischluft [°C]
Bezeichnung einer Mischung aus Umluft und Außenluft. Angabe in der Einheit Grad Celsius.

Nettogrundfläche [m²]
Bezeichnung der Summe aller nutzbaren Flächen eines Gebäudes. Angabe in der Einheit Quadratmeter.

Percentage Dissatified - PD [%]
Bezeichnung eines Indexes, welcher eine quantitative Vorhersage des prozentualen Anteils von Personen darstellt, bei denen wegen lokaler thermischer Unbehaglichkeiten aufgrund unterschiedlicher Einflüsse Unzufriedenheit besteht. Einflüsse können Strahlungsasymmetrie, vertikale Temperaturunterschiede sowie warme und kalte Fußböden sein. Angabe in der Einheit Prozent.

Nutzenergie [kWh]
Bezeichnung der Energie, welche nach Abzug der Transport- und Umwandlungsverlusten innerhalb eines Gebäudes von der Endenergie für den Nutzer tatsächlich zur Verfügung steht. Angabe in der Einheit Kilowattstunde.

Predicted Mean Vote - PMV [Einheitslos]
Bezeichnung eines Indexes, welcher eine durchschnittliche Klimabewertung durch eine große Personengruppe durch Berücksichtigung der Parameter Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Relative Luftfeuchte, Luftbewegung, Tätigkeitsgrad und Bekleidung vorhersagt. Angabe ist Einheitenlos und kann mittels einer 7-stufigen Skala in thermische Empfindungen übersetzt werden.

Predicted Percentage oft Dissatified - PPD [%]
Bezeichnung eines auf Basis des PMVs ermittelten Indexes, der eine quantitative Vorhersage des prozentualen Anteils von Personen darstellt, bei denen aufgrund ihres thermischen Empfindens mit einem bestimmten Umgebungsklima Unzufriedenheit besteht. Angabe in der Einheit Prozent.

Primärenergie [kWh]
Bezeichnung des Energieinhalts, welcher in natürlich vorkommenden Energiequellen ohne weitere Bearbeitung enthalten ist. Angabe in der Einheit Kilowattstunde.

Pufferspeicher
Definition eines Speicherorts für Heizungs- und Warmwasser zur Gewährleistung einer gleichmäßigen und bedarfsgerechten Wärmeversorgung oder zum Abfangen systembedingter Schwankungen.

Relative Luftfeuchte [%]
Bezeichnung des Verhältnisses zwischen dem gegenwärtigen Dampfdruck des Wassers und dem Sättigungsdampfdruck der Luft bei der vorliegenden Temperatur. Relevanz besteht für das menschliche Wohlbefinden. Angabe in der Einheit Prozent.

Rückkühlleistung [kW]
Kennzeichnung der thermischen Leistung, welche durch den Rückkühlkreislauf einer Kältemaschine abgeführt werden kann. Angabe in der Einheit Kilowatt.

Rücklauftemperatur [°C]
Bezeichnung der Temperatur des zurückströmenden Heiz- oder Kühlwassers kurz vor Widereintritt in den Wärme- oder Kälteerzeuger. Angabe in der Einheit Grad Celsius.

Rückwärmzahl - fortluftbezogen [%]
Definition des Wirkungsgrads einer Apparatur zur Wärmerückgewinnung über die Bildung des Verhältnisses von Temperaturabnahme der Abluft zur Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Außenluft. Angabe des Anteils der fühlbaren Wärme, welcher der Abluft entzogen wird. Angabe in der Einheit Prozent.

Sitzplätze im Zuschauersaal [S]
Bezeichnung der Anzahl der vorhandenen Sitzplätze innerhalb des betrachteten Bereichs. Angabe in der Einheit Anzahl der Sitzplätze.

Spezifischer Jahresverbrauch - Strom, Heizung und Warmwasser [kWh/m²a], [kWh/Sa]
Benennung des auf einen Vergleichskennwert bezogenen Gesamtenergieverbrauchs der Bereiche Strom, Heizung und Warmwasser für ein betrachtetes Gebäude über den Zeitraum eines Jahres. Bezug auf einen Vergleichskennwert ermöglicht die Gegenüberstellung des Gebäudes mit anderen Objekten. Angabe in den Einheiten Kilowattstunden pro Quadratmeter im Jahr oder Kilowattstunden pro Sitzplatz im Jahr.

Spezifischer Tagesverbrauch - Strom, Heizung und Warmwasser [Wh/m²d]
Benennung des auf die Nettogrundfläche bezogenen Gesamtenergieverbrauchs der Bereiche Strom, Heizung und Warmwasser für ein betrachtetes Gebäude über den Zeitraum eines Tages. Bezug auf die Nettogrundfläche ermöglicht die Gegenüberstellung des Gebäudes mit anderen Objekten. Angabe in der Einheit Wattstunden pro Quadratmeter am Tag.

Temperaturspreizung [K]
Bezeichnung einer Temperaturdifferenz bei Systemen zum Transport von Wärme, z.B. Heiz- und Kühlsystem. Angabe in der Einheit Kelvin.

(Vertikale) Temperaturdifferenz [K]
Beschreibung des Unterschiedes zwischen zwei Temperaturmesspunkten. Relevanz besteht für das menschliche Wohlbefinden bei zu hohen vertikalen Temperaturunterschieden zwischen Kopf- und Fußbereich. welche zu lokaler thermische Unbehaglichkeit führen kann. Angabe in der Einheit Kelvin.

Umluft [°C]
Bezeichnung der Abluft, welche einem Raum mittels eines mechanischen Lüftungssystems wieder zugeführt wird. Angabe in der Einheit Grad Celsius.

Umluftanteil [%]
Bezeichnung des Anteils der Abluft, welcher dem Raum innerhalb der Mischluft wieder zugeführt wird. Angabe in der Einheit Prozent.

Volumenstrom [m³/h], [m³/l]
Bezeichnung des Volumens eines Gases oder einer Flüssigkeit, welches innerhalb einer festgelegten Zeitspanne durch einen bekannten Querschnitt transportiert wird. Angabe in den Einheiten Kubikmeter pro Stunde oder Kubikmeter pro Messintervall.

Vorlauftemperatur [°C]
Bezeichnung der Temperatur des zugeführten Heiz- oder Kühlwassers nach Austritt aus dem Wärme- oder Kälteerzeuger. Angabe in der Einheit Grad Celsius.

Wärmedurchgangskoeffizient - U-Wert [W/m²K]
Bezeichnung des Maßes für die Wärmedurchlässigkeit eines Bauelements aufgrund der Wärmeleitung. Abhängigkeit besteht von der Materialität und Dicke der Bauteilschichten des Bauelements. Angabe in der Einheit Watt pro Quadratmeter und Kelvin.

Wärmetauscher
Bezeichnung einer Apparatur mithilfe derer sich thermische Energie von einem Medium auf ein anderes übertragen lässt zwecks erneuter Nutzung der bereits verwendeten Energie.

Zugluft
Bezeichnung einer als unangenehm empfundenen Luftbewegung. Einflussnahme auf das lokale thermische Behaglichkeitsempfinden, da die Luftbewegung den konvektiven Wärmeaustausch zwischen Mensch und Umgebung begünstigt und somit die höhe des Wärmeverlusts beeinflusst.

15. Literaturverzeichnis

[01] Adam, C., Döring, R. (2018): Theater in Deutschland – Die große Sanierungswelle rollt an, <https://www.svz.de/deutschland-welt/kultur/die-grosse-sanierungswelle-rollt-an-id20368477.html>, 13.12.2019.

[02] Barthmann, K., Curti, R., Froberg, N. (2013): Hans Scharouns Theater für Wolfsburg 1973 – 2013, Forum Architektur der Stadt Wolfsburg (Hrsg.), Berlin: jovis Verlag GmbH.

[03] Baumast, A. (2016): Schwerpunkt Nachhaltigkeit an der 53. Bühnentechnischen Tagung in Bremen – Ein Rückblick, in: Podium, Deutsche Theatertechnische Gesellschaft (Hrsg.), 04/2016, S. 5.

[04] Baumast, A., Spruck, W., Wilcken, L. (2016): Workshop in Köln – Energieeffiziente Sanierungen in öffentlichen Kulturinstitutionen – Chancen, Stolpersteine und Anforderungen, in: Podium, Deutsche Theatertechnische Gesellschaft (Hrsg.), 06/2016, S. 13.

[05] Bernard, S., Voss, K. (2012): Energieverbrauch in der Hotellerie – Zunehmende Bedeutung für Ressourcen- und Klimaschutz, in: DBZ Spezial, 10/2012, S. 38-41.

[06] Bibliographisches Institut (2015): Duden - Deutsches Universalwörterbuch ; das umfassende Bedeutungswörterbuch der deutschen Gegenwartssprache, Berlin: Duden.

[07] Boerner, S. (2002): Führungsverhalten und Führungserfolg – Beitrag zu einer Theorie der Führung am Beispiel des Musiktheaters, Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.

[08] Bosold, U., Hüppe, H. (2016): Verbrauch senken - Kosten sparen – Energiecontracting der Niedersächsischen Staatstheater Hannover GmbH, in: Bühnentechnische Rundschau, Stuttgart: Der Theaterverlag, 5/2016, S. 74-76.

[09] Brenne, W. et al. (2016): Erhalten. Ertüchtigen. Erneuern. – Generalsanierung Theater Wolfsburg 2014 – 2015, Forum Architektur der Stadt Wolfsburg (Hrsg.), Berlin: jovis Verlag GmbH.

[10] Brinkmann, U. (2016): Theater in Wolfsburg, in: Bauwelt, Nr. 25.2016.

[11] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (1994): Auslegung zu § 2 Abs. 2 der Wärmeschutzverordnung vom 16.08.1994, <https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Archiv/WaermeschutzV/WaermeschutzV1995/Ausl/Auslegung_5.html>, [04.01.2019].

[12] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

[13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009a): Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand.

[14] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009b): Bekanntmachung der Regeln für die Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand vom 30. Juli 2009, Berlin

[15] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2009): Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden. Vergleichswerte für Energieausweise, BBSR-Online-Publikation Nr. 09/2009.

[16] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2012): Forschung für Energieoptimiertes Bauen – Förderkonzept der Forschungsinitiative EnOB im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung „Forschung für umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“.

[17] Bundesregierung (2014): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), Beuth Verlag GmbH.

[18] Cognos Institut (2010): Ergebnisdarstellung und Managementzusammenfassung zur Besucherbefragung im Staatstheater Braunschweig, Staatstheater Braunschweig (Hrsg.).

[19] Cosinus Messtechnik GmbH (2018): Rogowski-Stromschleifen, https://www.cosinus.de/produkte/rogowski-stromschleifen/, [27.08.2018]

[20] Dege, S. (2019): Große Oper, viel Theater – warum Europas Bühnenbauten oft Millionen verschlingen, <https://www.dw.com/de/große-oper-viel-theater-warum-europas-bühnenbauten-oft-millionen-verschlingen/a-48103088>, [16.12.2019].

[21] Deutsche UNESCO-Kommission (2019a): Deutsche Theater- und Orchesterlandschaft, <https://www.unesco.de/kultur-und-natur/immaterielles-kulturerbe/immaterielles-kulturerbe-deutschland/bundesweites-61>, [29.08.2019].

[22] Deutsche UNESCO-Kommission (2019b): Deutsche Theater- und Orchesterlandschaft für UNESCO-Liste nominiert, <https://www.unesco.de/kultur-und-natur/immaterielles-kulturerbe/immaterielles-kulturerbe-weltweit/zwischenstaatlicher>, [29.08.2019].

[23] Deutscher Bühnenverein (2016): Sanierungs-/Modernisierungsmaßnahmen an Theatern und Orchestern, in: Geschäftsbericht 2016, S.47.

[24] Deutscher Bühnenverein (2019): Einzelne Theaterberufe – Technische/r Direktor/in,<http://www.buehnenverein.de/de/jobs-und-bildung/berufe-am-theater-einzelne.html?view=46>, [12.12.2019].

[25] Deutscher Bundestag (2017): Sachstand Primärenergiefaktoren, Wissenschaftliche Dienste.

[26] Deutscher Wetterdienst (2018a): CDC (Climate Data Center), <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html>, [21.09.2018].

[27] Deutscher Wetterdienst (2018b): Gradtage, <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100932&lv3=101064>, [04.10.2018].

[28] Deutscher Wetterdienst (2018c): Kostenfreie Gradtagzahlen/Gradtage, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/gtz_kostenfrei/gtz_kostenfrei.html>, [04.10.2018].

[29] Deutscher Wetterdienst (2019): Klimafaktoren für den Energieausweis, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimafaktoren/klimafaktoren.html>, [03.09.2019].

[30] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2002): DIN EN 7726 – Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[31] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2003): DIN V 4108-6: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[32] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2006): DIN EN ISO 7730 - Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[33] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2011a): DIN EN 18599-1: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[34] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2011b): DIN EN 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[35] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012a): DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[36] DIN Deutsches Institut für Normung e. V (2012b): DIN EN 15251 - Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[37] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2003): DIN V 4108-6: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[38] DIN-Normenausschuss Bauwesen (2016): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. .

[39] Dreisbach, G. (2008): Wie Stimmungen unser Denken beeinflussen, Institut für Allgemeine Psychologie, Biopsychologie und Methodenlehre, Technische Universität Dresden (Hrsg.), in: report psychologie, Ausgabe 6/2008, S.289 – 298.

[40] energydesign braunschweig GmbH (2013): Sanierungskonzept Scharoun Theater Wolfsburg - Integrales Energiekonzept.

[41] Erhorn-Kluttig, H. et al. (2017): Messleitfaden. Neuer gemeinsamer Messleitfaden für Demonstrationsvorhaben im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.), S.8-9..

[42] Europäisches Komitee für Normung (2001): EN ISO 10551 Ergonomie des Umgebungsklimas – Beurteilung des Einflusses des Umgebungsklimas unter Anwendung subjektiver Bewertungsskalen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[43] Fast Forward (2015): „EnergyCam digitalisiert Zähler“, in: TGA Fachplaner, Stuttgart: Alfons W. Gentner Verlag GmbH&Co. KG, Nr. 01.2015.

[44] Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP (2013): BNB Komfort Tool v0.3.

[45] Fraunhofer Institut für Bauphysik (2017): Messleitfaden – EnOB / EnEff:Stadt, Energiewendebauen Wissenschaftliche Begleitforschung (Hrsg.).

[46] Genossenschaft Deutscher Bühnen-Angehöriger (2015): Deutsches Bühnen Jahrbuch – Das grosse Adressbuch für Bühne, Film, Funk und Fernsehen, Hamburg: Verlag der Bühnenschriften-Vertriebs-Gesellschaft mbH.

[47] Gerdemann, C. (2016): Schlussbericht – KSI: Beleuchtungssanierung mit LED Technik im Stadttheater Münster, Stadt Münster (Hrsg.).

[48] German Metering GmbH (2011): Der optische Auslesekopf, Optical Probe oder Optical Head, <http://www.optical-probe.de/ir_auslesedopf/produkte.html>, [27.08.2018]

[49] Graubner, G. (1970): Theaterbau – Aufgabe und Planung, München: Verlag Georg D.W. Callwey.

[50] Grossauer, E. (2008): Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden – Eine Feldstudie – Analyse von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Komfortparametern am Arbeitsplatz, Universität Karlsruhe (Hrsg.).

[51] Ham, R. (1987): Theatres: Planning Guidance for Design and Adaptation, Association of British Theatre Technicians (Hrsg.), Cambridge: University Press.

[52] Hausladen, G., Liedl, P., de Saldanha, M. (2012): Klimagerecht Bauen – Ein Handbuch, Basel: Birkhäuser.

[53] Heathfield, H., Bottrill, C. (2012): Assessing energy performance benchmarks for performing arts buildings using a new dataset, in: Journal of Building Services Engineering Research & Technology, 34(I), S. 41 – 53.

[54] Hellwig R. T. (2009): Komfortforschung und Nutzerakzeptanz – Thermohygrischer, visueller und akustischer Komfort sowie Einflussnahme des Nutzers als Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Bürogebäuden, Kongress „Nachhaltig Bauen und Bewerten“, S. 59-69.

[55] Hellwig R. T. et. al. (2008): Kriterien des nachhaltigen Bauens: Bewertung des thermischen Raumklimas – ein Diskussionsbeitrag, in: Bauphysik, Frauenhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.), Heft 3, Nr. 30 (2008), Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, S. 152-162.

[56] Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2018): Im Großen Haus des Staatstheaters Wiesbaden sorgen LED-Lampen für energiesparendes Saallicht, <https://CO_2.hessen-nachhaltig.de/de/aktuelles/hessens-staatstheater-erhalten-energieeffiziente-led-beleuchtung.html>, [16.12.2019].

[57] Hoffmann, H.-C. (1966): Die Theaterbauten von Fellner und Helmer, Forschungsunternehmen der Fritz-Thyssen-Stiftung – Arbeitskreis Kunstgeschichte (Hrsg.), München: Prestel-Verlag.

[58] Hörner, M., Knissel, J. (2015): Teileenergiekennwerte von Nichtwohngebäude (TEK) – Berechnungsgrundlagen des TEK-Tools Version TEK 6.3, Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.), Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.

[59] Infas enermetric GmbH (2009): Leitfaden – Energieeffizienz für Krankenhäuser, EnergieAgentur. NRW (Hrsg.).

[60] Institut für Wohnen und Umwelt (2018): Gradtagszahlen_Deutschland, <https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/…/Gradtagszahlen_Deutschland.xls>, [02.10.2018].

[61] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2013a): Handbuch zum TEK-Tool – Forschungsprojekt: Teilenergiekennwerte von Nicht-Wohngebäuden, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.

[62] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2013b): Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden, <http://www.iwu.de/forschung/energie/laufend/teilenergiekennwerte-von-nicht-wohngebaeuden/>, [19.01.2018].

[63] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2014): Teilenergiekennwerte – Neue Wege in der Energieanalyse von Nichtwohngebäuden im Bestand.

[64] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2018): Das IWU – Wir über uns, <https://www.iwu.de/das-iwu/>, [03.12.2018].

[65] Jacob, D., Herkel, S. (2010): Leitfaden Hochrechnung Teilenergiekennwerte von Nicht-Wohngebäuden, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Hrsg.).

[66] Jacob, D., Herkel, S. (2013): Teilenergiekennwerte bei Nichtwohngebäuden – Leitfaden zur Hochrechnung von Kurzzeitmessungen, Fraunhofer ISE (Hrsg.).

[67] Jacobshagen, A. (2012): Musiktheater, Bonn: Deutsches Musikinformationszentrum.

[68] Jobst, J., Boerner, S. (NN): Die Bewertung eines Theaterbesuchs aus Zuschauerperspektive – Eine empirische Analyse zum Einfluss persönlicher Merkmale, < http://www.fachverband-kulturmanagement.org/wp-content/uploads/2014/09/10.pdf>, [27.09.2018].

[69] Julie's Bicycle (2019a): About us, <https://juliesbicycle.com/why-we-exist/about-us/>, [16.12.2019]

[70] Julie's Bicycle (2019b): The Arts Council England Programme, https://juliesbicycle.com/ace/, [16.12.2019].

[71] Kleber, M., Hartloff, M., Wagner, A. (NN): Leitfaden Lastgangmessung – für das Projekt Teilenergiekennwerte, Fachgebiet Bauphysik & technischer Ausbau (fbta), Karlsruher Institut für Technologie (Hrsg.).

[72] Kliment, T. (2016): Das Publukum von Theater und Oper - Soziale Zusammensetzung und die Wirksamkeit von Zugangshürden, <https://www.kulturmanagement.net/Themen/Das-Publikum-von-Theater-und-Oper-Soziale-Zusammensetzung-und-die-Wirksamkeit-von-Zugangshuerden,2132>, [27.09.2018].

[73] Kumpf, L. (2016): Entwicklung von Referenzlastprofilen für Schulen und Kitas anhand von Realdaten, Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau (Hrsg.).

[74] Lahrz, T. et al. (2008): Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, in: Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz, Heft 11, ohne Ort: Springer Medizin Verlag, S. 1358–1369.

[75] Leitermann, G. (2017): Theater Planning – Facilities for Performing Arts ans Live Entertainment, New York: Routledge Taylor & Francis Group.

[76] Löffler, T. (2011): Energiekennzahlen für Betriebsvergleiche, Sächsische Energieagentur SAENA GmbH (Hrsg.).

[77] Loga, T. et al. (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.

[78] LSW Energie GmbH & Co. KG (2019): Fernwärme, <https://www.lsw.de/fernwaerme/>, [08.07.2019].

[79] Lutz, M. (2013): Besucherbindung im Opernbetrieb – Theoretische Grundlagen, empirische Untersuchungen und praktische Implikationen, Wiesbaden: Springer VS.

[80] Maas, A. (2013): Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten (DIN V 18599-10), in: Bauphysik-Kalender 2013: Nachhaltigkeit und Energieeffizienz, Fraunhofer IBP, Foud, Nabil A. (Hrsg), S.415-428.

[81] Meier, H. et. Al. (1999): Repräsentative VDEW-Lastprofile, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Energiewirtschaft (Hrsg.), Frankfurt: VDWE.

[82] Reinhard, A. et al. (2016): Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung – Diskussionsbeitrag des Umweltbundesamts, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

[83] Rhode, W. (2019): Theaterlandschaft – Baukultur für die Zukunft sichern, < https://sharingheritage.de/projekte/theaterlandschaft-baukultur-fuer-die-zukunft-sichern/>, [16.12.2019].

[84] Ricciardi, P., Buratti, C. (2015): Thermal comfort in the Fraschini theatre (Pavia, Italy): Correlation between data from questionnaires, measurements, and mathematical model, in: Energy and Buildings, S. 243-252.

[85] Richter, W. (2007): Handbuch der thermischen Behaglichkeit – Sommerlicher Kühlbetrieb, Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

[86] Rowohlt, J. (2018): Theatersanierungen – Baustelle Bühne, in: Fachblatt der Genossenschaft deutscher Bühnen-Angehöriger, 11/2018.

[87] Rowohlt, J. (2019): Nachhaltigkeit am Theater – Kultur & Klima, in: Fachblatt der Genossenschaft deutscher Bühnen-Angehöriger, 10/2019.

[88] Sächsische Energieagentur GmbH (2016): Modellprojekt: Durchführung eines Energiespar-Contractings an der Städtischen Theater Chemnitz gGmbH.

[89] Schakib-Ekbatan, K., Gropp, T., Wagner, A. (2011): INKA - Instrument für Nutzerbefragungen zum Komfort am Arbeitsplatz, Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau (Hrsg.).

[90] Schieferdecker, B., Fuenfgeld, C., Bonneschky, A. (2006): Energiemanagement-Tools – Anwendung im Industrieunternehmen, Bernd Schieferdecker (Hrsg.), Berlin: Springer-Verlag.

[91] Schild, K., Brück, H. (2010): Energie-Effizienzbewertung von Gebäuden – Anforderungen und Nachweisverfahren gemäß EnEV 2009, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

[92] Schmal, C. et al. (2018): Grosse Oper – viel Theater? Bühnenbauten im europäischen Vergleich, Frankfurt am Main: Deutsches Architekturmuseum.

[93] Schmidt Reuter (2009): Leitfaden für Energiebedarfsausweise im Nichtwohnungsbau – Ausgabe EnEV 2009, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.).

[94] Schmidt, T. (2017): Theater, Krise und Reform – Eine Kritik des deutschen Theatersystems, Wiesbaden: Springer VS.

[95] Schmolke, B. (2011): Handbuch und Planungshilfe Bühnenbauten, NN: DOM publishers.

[96] Schönwetter, C. (2016): Die Kunst des Unsichtbaren, in: Deutsche Bauzeitung.

[97] Schubert, H. (1971): Moderner Theaterbau – Internationale Situation, Dokumentation, Projekte, Bühnentechnik, Stuttgart: Karl Krämer Verlag.

[98] Seeed Technology Co., Ltd. (2018a): Grove – CO_2 Sensor, <http://wiki.seeedstudio.com/Grove-CO_2–Sensor/>, [24.01.2019].

[99] Seeed Technology Co., Ltd. (2018b): Grove – Temperature&Humidity Sensor, <http://wiki.seeedstudio.com/Grove-CO_2–Sensor/>, [24.01.2019].

[100] Statista GmbH (2018): Jährlicher Stromverbrauch eines 2-Personen-Haushalts in Deutschland nach Gebäudetyp im Jahr 2018, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/558277/umfrage/stromverbrauch-einen-2-personen-haushalts-in-deutschland/>, [04.12.2018].

[101] The Belgrade Theatre (2019):Belgrade Theatre Environment Policy – Striving to be Green, <http://www.belgrade.co.uk/about-us/environmental-policy/>, [16.12.2019].

[102] Theater Engineering Ingenieursgesellschaft mbH (2019): Scharoun Theater Wolfsburg. Sanierung, <http://www.te-ing.de/scharoun_theater_wolfsburg.html>, [15.05.2019].

[103] Toutenburg, H. et. al. (2006): Arbeitsbuch zur deskriptiven und induktiven Statistik, Berlin: Springer-Verlag.

[104] Verein deutscher Ingenieure e.V. (2007): VDI 4710 Blatt 2– Meteorologische Daten in der technischen Gebäudeausrüstung – Gradtage, Beuth Verlag GmbH.

[105] Verein deutscher Ingenieure e.V. (2013): VDI 3807 Blatt 1– Verbrauchskennwerte für Gebäude – Grundlagen, Beuth Verlag GmbH.

[106] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2014): VDI 4661: Energiekenngrößen – Grundlagen – Methodik, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[107] Von Düffel, J. (2003): „Kleine Theatergeschichte. Ein Schnelldurchlauf“, in: Theater muss sein. Fragen. Antworten. Anstöße., Köln: Deutscher Bühnenverein.

[108] Vorwerk, C. (2012): Qualität im Theater – Anforderungssysteme im öffentlichen deutschen Theater und ihr Management, Wiesbaden: Springer VS.

[109] Voss, K. (2006): Nutzerakzeptanz- und Zufriedenheit im Wohnheim Neue Burse, Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung (Hrsg.).

[110] Voss, K. et al. (2016): Performance von Gebäuden. Kriterien – Konzepte – Erfahrungen, FIZ Karlsruhe (Hrsg.), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

[111] Wilcken, L. (2016): Energie-Audit – und dann?, in: Bühnentechnische Rundschau, Berlin: Der Theaterverlag, 4/2016.

[112] Williams, H. (2015): British theatres going green as venues across the land do their bit to reduce carbon emissions, <https://www.independent.co.uk/environment/british-theatres-going-green-as-venues-across-the-land-do-their-bit-to-reduce-carbon-emissions-a6678941.html>, [16.12.2019].

[113] Winands, G. (2019): Grußwort, in: Die Pfosten sind, die Bretter aufgeschlagen – Leitfaden Bau und Sanierung von Kulturbauten, Deutsche Theatertechnische Gesellschaft (Hrsg.), Sonderausgabe 2019, S.6.

[114] Wirtschaft und Verkehr, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2017): Sachstand – Primärenergiefaktoren, Berlin: Deutscher Bundestag, WD5 5 – 3000 – 103/16.

[115] Wosnitza, F.; Hilgers H. (2012): Energieeffizienz und Energiemanagent – Ein Überblick über heutige Möglichkeiten und Notwendigkeiten, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

[116] Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (2009): Fortschreibung der Nutzungsrandbedingungen für die Berechnung von Nichtwohngebäuden, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BBSR) (Hrsg.), BBST-Online-Publikation 18/2009.

[117] Zürcher, C., Frank, T. (2010): Bauphysik – Bau & Energie, ETH Zürich (Hrsg.), Zürich: vdf Hochschulverlag AG.

16. Abbildungsverzeichnis

Abb. 01 Klimaziele der Bundesregierung 10
Abb. 02 Projektziele 13
Abb. 03 Angewandte Untersuchungsmethoden 15
Abb. 04 Begriffsdefinition Theater 16
Abb. 05 Einordnung und Bezeichnung des Theaterbetriebs anhand der Rechtsträgerschaft 17
Abb. 06 Produktionsformen des Theaters 18
Weinardt, H. (2011): Koblenz im Buga-Jahr 2011 - Das Theater mit dem Clemensbrunnen (Obelisk), < https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Koblenz_im_Buga-Jahr_2011_-_Theater_01.jpg >, [30.03.2020]
Hajotthu (2016): Stadttheater Regensburg Bismarckplatz, < https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f7/Bismarckplatz_Theater_Regensburg_20160928_%281%29.jpg >, [30.03.2020]
Abb. 07 Darstellung der Sparten und ihren Unterformen 19
Abb. 08 Innere Organisation von Theaterspielstätten 20
Abb. 09 Äußeres Erscheinungsbild von Theaterspielstätten 21
Abb. 10 Haupt- und Nebenmerkmale zur Kategorisierung von Theaterspielstätten 23
Abb. 11 Einflussfaktoren auf die Proportionen eines Zuschauersaals 24
Abb. 12 Anzahl der Theaterspielstätten in Deutschland nach Baujahr 25
Abb. 13 Anzahl der Theaterspielstätten in Deutschland nach Sitzplatzkapazität in 100er-Schritten 27
Abb. 14 Anteil der Theaterspielstätten nach Sparten und Organisationsform 27
Abb. 15 Auswahlschema für Theaterspielstätten 29
Abb. 16 Teilnehmende Theaterspielstätten an der Querschnittserhebung 33
KiEZ Ferienpark Feuerkuppe e.V. (2020): Theater Nordhausen, <https://ferienpark-feuerkuppe.de/ausflugsziele/theater.html>, [30.03.2020]
Germany travel (2020): Theater Osnabrück, <http://s2.germany.travel/media/content/staedte___kultur_1/staedte/osnabrueck/Os_Theater_4TK_RET_1024x768.jpg>, [30.03.2020]
Szenik.eu (2020): Theater Freiburg, <https://www.szenik.eu/de/das-theater-freiburg-sucht-zum-beginn-der-spielzeit-2020-2021-14-september-2020-drei-ausstattungsassistenten-w-m-d-30088>, [30.03.2020]
Reinhard aus Sachsen (2005): Opernhaus in Chemnitz, <https://de.wikipedia.org/wiki/Opernhaus_Chemnitz#/media/Datei:Opernhaus_in_Chemnitz.jpg>, [30.03.2020]
baukunst-nrw (2020): Landestheater Detmold, <https://www.baukunst-nrw.de/bilder/full/DSC03423_99935.jpg>, [30.03.2020]
Niteshift (2005): Staatstheater, Großes Haus, <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/25/Schwerin_Mecklenburgisches_Staatstheater_2013-08-12_22_nc.jpg>, [30.03.2020]
Stage Entertainment (2020): Theater des Westens, <https://www.berlin.de/sehenswuerdigkeiten/3561238-3558930-theater-des-westens.html>, [30.03.2020]
hhp Süd Sachverständige (2020): Opernhaus Nürnberg, <https://hhp-süd.de/portfolio/staatstheater-nurnberg-schauspiel-und-opernhaus/>, [30.03.2020]
Killig, O. (2017): Schauspielhaus Chemnitz, <https://www.freiepresse.de/chemnitz/defizit-am-theater-intendant-raeumt-probleme-ein-artikel10083652>, [30.03.2020]
Stadt Nürnberg(2020): Schauspielhaus Nürnberg, <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/2f/56/ee/2f56eea2279033ea57d61864e6775edc.jpg>, [30.03.2020]
Theater Krefeld Mönchengladbach (2020): Theater Krefeld, große Bühne, <https://theater-kr-mg.de/spielstaetten/>, [30.03.2020]
Bilderbuch-Bonn (1968): Opernhaus Bonn, <http://www.bilderbuch-bonn.de/Fotos/zentrum_opernhaus_historisch_oper_172638>, [30.03.2020]
Lokalmatador (2020): Nationaltheater Mannheim, <http://www.lokalmatador.de/storage/11/d4ddbff2bb54425a82ba8c8eeab5a139_l.jpg>, [30.03.2020]
Abb. 17 Fragebogen zur Erhebung von Daten zum Theatergebäude 35
Abb. 18 Messzeiträume für die Querschnittserhebung 36
Abb. 19 Erfassung der Wetterdaten 38
Abb. 20 Überblick über die Wetterstationen des Deutschen Wetterdiensts 39
Abb. 21 Messung der Energieströme in den einzelnen Theaterspielstätten 40
Abb. 22 Datenerfassung in den Theaterspielstätten während der Querschnittserhebung 41
Abb. 23 Einflussfaktoren auf die Behaglichkeit 43
Abb. 24 Messfigur „Torsion“ 44
Abb. 25 Aufbaumöglichkeiten des Messtorsos 45
Abb. 26 Messtoleranzen der verwendeten Sensoren 46
Abb. 27 Schematische Darstellung des technischen Konzepts des Messtorsos 47
Abb. 28 Platzierung der Sensoren am Messtorso 48
Abb. 29 Datenübermittlungsstruktur des Messtorsos 49
Abb. 30 Bevorzugte Platzierung des Messtorsos im Zuschauersaal 50
Abb. 31 Raumgeometrien von Theatersälen 51
Abb. 32 Foyer des Landestheaters Detmold 53
Abb. 33 Materialien zur Nutzerbefragung 56
Abb. 34 Nettogrundfläche der Theaterspielstätten 58
Abb. 35 Nettogrundfläche bezogen auf die Sitzplatzkapazität der Theaterspielstätten 58
Abb. 36 Beziehung zwischen Nettogrundfläche und Sitzplatzkapazität ohne Nebenspielstätten 59
Abb. 37 Beziehung zwischen Nettogrundfläche und Sitzplatzkapazität inklusive Nebenspielstätten 59
Abb. 38 Anteil der drei Organisationsbereiche in Theaterspielstätten an der Gebäudefläche 60
Abb. 39 Flächenverteilung in den Theaterspielstätten 60
Abb. 40 Zusammenhänge zwischen verschiedenen Flächen in den Theaterspielstätten 61
Abb. 41 Referenzklima des Standorts Potsdam 62
Abb. 42 Außenlufttemperatur am Standort der Theaterspielstätten während des Messzeitraums 62
Abb. 43 Prozentuale Verteilung der gemessenen Temperaturen 63
Abb. 44 Klimatologische Kenntage in Abhängigkeit des Standorts 63
Abb. 45 Gradtage und Monatsklimafaktoren im Verhältnis zum Referenzmonat März für den Standort Potsdam 64
Abb. 46 Relative Außenluftfeuchte am Standort der Theaterspielstätten während des Messzeitraums 64
Abb. 47 Prozentuale Verteilung der gemessenen relativen Luftfeuchte 65
Abb. 48 Absolute Außenluftfeuchte am Standort der Theaterspielstätten während des Messzeitraums 65
Abb. 49 Potentieller zeitlicher Anteil relativer Luftfeuchten für die Norminnenraumtemperatur in Abhängigkeit der absoluten Außenluftfeuchte 66
Abb. 50 Energieverbrauchskennwerte für die Nutzung „Opernhäuser, Theatergebäude“ 67
Abb. 51 Absoluter Tagesstromverbrauch während des Messzeitraums 68
Abb. 52 Anteil des durchschnittlichen Tagesstromverbrauchs am Jahresstromverbrauch 68

Abb. 53 Verhältnis des minimalen zum maximalen Tagesstromverbrauch während des Messzeitraums 69
Abb. 54 Verhältnis des Verbrauchs an Vorstellungs- gegenüber Leerstandstagen 69
Abb. 55 Durchschnittlicher spezifischer Tagesstromverbrauch während des Messzeitraums 70
Abb. 56 Maximal-, Minimal- und Durchschnittslasten im Stromlastgang 71
Abb. 57 Belastungsfaktor und Lastverhältnis im Stromlastgang 71
Abb. 58 Prozentualen Verteilung der Lasten auf Grund-, Mittel- und Spitzenlastbereich 72
Abb. 59 Durchschnittslasten in Abhängigkeit der Tageszeiten 73
Abb. 60 Schema zur Definition der Standardlastprofile für Theaterspielstätten 75
Abb. 61 Standardlastprofile für Theaterspielstätten auf Basis der Messergebnisse für den Winter 76
Abb. 62 Standardlastprofile für Theaterspielstätten auf Basis der Messergebnisse für den Sommer 76
Abb. 63 Kumulativer Energieverbrauch in Abhängigkeit der Typtage 77
Abb. 64 Absoluter Tagesverbrauch für Heizung/Warmwasser während des Messzeitraums 78
Abb. 65 Anteil des durchschnittlichen Tagesverbrauchs für Heizung/Warmwasser am Jahresverbrauch 78
Abb. 66 Spezifischer und klimabereinigter Tagesverbrauch für Heizung/Warmwasser während des Messzeitraums 79
Abb. 67 Korrelationskoeffizient der mittleren Tagesaußenlufttemperatur und dem Tagesenergieverbrauch für Heizung/Warmwasser 79
Abb. 68 Durchschnittlicher spezifischer Verbrauch für Heizung/Warmwasser an Vorstellungs- und Leerstandstagen 81
Abb. 69 Stromverbrauch im Messjahr gegenüber des durchschnittlichen Jahresstromverbrauchs 82
Abb. 70 Monatliche Verteilung des Jahresstromverbrauchs in den einzelnen Theaterspielstätten 82
Abb. 71 Monatsprofil des Stromverbrauchs und Faktoren zur Hochrechnung des Monatsverbrauchs auf ein ganzes Jahr 83
Abb. 72 Durchschnittlicher Tagesstromverbrauch während der Spielzeit und der Spielpause 83
Abb. 73 Stromverbrauchsanteil nach Wochentag während der Spielzeit 84
Abb. 74 Stromverbrauchsanteil nach Wochentag während der Spielpause 84
Abb. 75 Wochenprofil des Stromverbrauchs 85
Abb. 76 Durchschnittliche Tagesstromverbräuche im Messzeitraum gegenüber des Jahresdurchschnitts 85
Abb. 77 Verhältnis des hochgerechneten zum gemessenen Jahresstromverbrauch 86
Abb. 78 Gradtage im Messzeitraum für die Standorte der Theaterspielstätten 88
Abb. 79 Durchschnittlicher gemessener gegenüber dem hochgerechneten Jahresverbrauch für Heizung/Warmwasser 88
Abb. 80 Anteiliger Monatsverbrauch im Verhältnis zum Gesamtjahresverbrauch nach Institut Wohnen und Umwelt GmbH [01] 89
Abb. 81 Fernwärmeverteilung im Opernhaus Bonn 89
Abb. 82 Bildung des durchschnittlichen Stromverbrauchs aus drei aufeinanderfolgenden Jahren 90
Abb. 83 Absoluter Endenergieverbrauch für Strom und Wärme/Warmwasser 90
Abb. 84 Endenergieverbrauchskennwerte für Strom 91
Abb. 85 Endenergieverbrauchskennwerte für Heizung/Warmwasser 91
Abb. 86 Endenergieverbrauchskennwerte für Strom gegenüber des Vergleichskennwerts 92

Abb. 87 Endenergieverbrauchskennwerte für Heizung/Warmwasser gegenüber des Vergleichskennwerts 92
Abb. 88 Gesamtendenergieverbrauchskennwerte gegenüber des Vergleichskennwerts 93
Abb. 90 Gegenüberstellung der Verbrauchsanteile für Strom und Wärme/Warmwasser auf primärenergetischer Ebene 93
Abb. 89 Verbrauchsanteile für Strom und Heizung/Warmwasser auf endenergetischer Ebene 93
Abb. 91 Primärenergieverbrauchskennwerte für Strom und Heizung/Warmwasser 94
Abb. 92 Energiebezugswerte für Theaterspielstätten 95
Abb. 93 Sitzplätze im Zuschauersaal des Theaters Krefeld 96
Abb. 94 Klassifizierung des Stromverbrauchs auf endenergetischer Ebene 97
Abb. 95 Benchmarking des flächenbezogenen Stromverbrauchs auf endenergetischer Ebene 98
Abb. 96 Benchmarking des flächenbezogenen Verbrauchs für Heizung/Warmwasser auf endenergetischer Ebene 99
Abb. 97 Klassifizierung des Verbrauchs für Heizung/Warmwasser auf endenergetischer Ebene 100
Abb. 98 Benchmarking des flächenbezogenen Gesamtenergieverbrauchs auf endenergetischer Ebene 101
Abb. 99 Klassifizierung des Gesamtverbrauchs auf endenergetischer Ebene 102
Abb. 100 Benchmarking des flächenbezogenen Gesamtverbrauchs auf primärenergetischer Ebene 103
Abb. 101 Klassifizierung des Gesamtverbrauchs auf primärenergetischer Ebene 104
Abb. 102 Außenansicht des Stadttheaters Nordhausen 104
Abb. 103 Sitzplatzbezogene Energiekennwerte für Heizung/Warmwasser 105
Abb. 104 Sitzplatzbezogene Energiekennwerte für Strom 105
Abb. 105 Sitzplatzbezogene Energiekennwerte für Primärenergie 106
Abb. 106 Einordnung der Messwerte zum Primärenergieverbrauch anhand des Bewertungsschemas 106
Abb. 107 Bewertungsschema für den sitzplatzbezogenen Primärenergieverbrauch 107
Abb. 108 Anteile der Verbraucher am Bedarf für Brennstoffe, bzw. Fernwärme 108
Abb. 109 Anteile der Verbraucher am Bedarf für elektrische Energie 109
Abb. 110 Anteile der Zonen am Endenergiebedarf 111
Abb. 111 Spezifischer Endenergiebedarf nach Zonen 112
Abb. 112 Zusammenhang zwischen der Energetischen Qualität der Gebäudehülle sowie der Lüftung und dem Energiebedarf für Heizung 112
Abb. 113 Spezifischer Energiebedarf für Heizung nach Zonen 113
Abb. 114 Spezifischer Energiebedarf für Beleuchtung nach Zonen 113
Abb. 115 Spezifischer Energiebedarf für Luftförderung nach Zonen 114
Abb. 116 Spezifischer Energiebedarf für Kälte nach Zonen 115
Abb. 117 Garderobenbereich des Opernhauses Chemnitz 115
Abb. 118 Hygienische Bewertung der CO_2-Konzentration nach Pettenkofer [74] 116
Abb. 119 Kategorisierung der CO_2-Konzentration nach DIN EN 13779 [35] 116
Abb. 120 Darstellung Raumluftklassen (IDA) 117
Abb. 121 Beschreibung der Kategorien zur Bewertung des thermischen Komforts nach DIN EN 15251 [36] 118
Abb. 122 Gestaltungskriterien nach DIN EN 15251 für den Raumtypen „Hör, bzw. Zuschauersäle“ [36] 119
Abb. 123 Anforderungsbereiche für Relative Luftfeuchte und Operative Temperatur nach den Kategorien 120

Abb. 124 Anforderungsbereiche für Zugluft und Vertikale Temperaturunterschiede nach den Kategorien 120
Abb. 125 Minimale, maximale und durchschnittliche CO_2-Konzentrationen in den Theaterspielstätten 121
Abb. 126 Durchschnittlichen CO_2-Konzentrationen während der Nutzungs- und des Leerstandszeiten 121
Abb. 127 Theaterspielstätten mit einem schwachen linearen Zusammenhang zwischen CO_2-Konzentration und Auslastung 122
Abb. 128 Theaterspielstätten mit einem mittleren linearen Zusammenhang zwischen CO_2-Konzentration und Auslastung 122
Abb. 129 Theaterspielstätten mit einem starken linearen Zusammenhang zwischen CO_2-Konzentration und Auslastung 123
Abb. 130 Einordnung der Messwerte zur CO_2-Konzentration in die Kategorien der Raumluftqualität 124
Abb. 131 Minimale, maximale und durchschnittliche Lufttemperaturen in den Theaterspielstätten 125
Abb. 132 Zuschauersaal des Staatstheaters Freiburg 125
Abb. 133 Vergleich der durchschnittlichen Lufttemperaturen während der Vorstellungen und der Leerstandszeiten 126
Abb. 134 Kategorisierung der Lufttemperaturen während der Vorstellungszeiten 126
Abb. 135 Vergleich der durchschnittlichen Temperaturänderung während der Vorstellungs- und Leerstandszeiten pro Messintervall 127
Abb. 136 Maximale Temperaturerhöhung und –absenkung während den Vorstellungszeiten innerhalb einer Stunde 127
Abb. 137 Vergleich der Standardabweichungen während der Vorstellungs- und Leerstandszeiten 128
Abb. 138 Temperaturdifferenz zwischen Kopf- und Fußbereich nach Nutzungszustand 128
Abb. 139 Vertikale Temperaturdifferenz nach Nutzungszustand 129
Abb. 140 Kategorisierung der vertikalen Temperaturdifferenz nach Nutzungszustand 129
Abb. 141 Vorhergesagter prozentualer Anteil an Unzufriedenen aufgrund der vertikalen Temperaturdifferenz 130
Abb. 142 Zuschauersaal des Opernhauses im Nationaltheater Mannheim 130
Abb. 143 Minimale, maximale und durchschnittliche Luftgeschwindigkeit im Zuschauersaal nach Fuß- und Kopfbereich 131
Abb. 144 Differenz von Luftgeschwindigkeit im Kopf- und Fußbereich in Abhängigkeit des Nutzungszustands 131
Abb. 145 Differenz der Luftgeschwindigkeit zwischen Leerstands- und Vorstellungszeiten in Abhängigkeit des Kopf- und Fußbereichs 132
Abb. 146 Kategorisierung der Luftgeschwindigkeiten anhand der Beispiele für Gestaltungskriterien aus DIN EN ISO 7730 für den Raumtyp „Auditorium“ 132
Abb. 147 Kategorisierung der Luftgeschwindigkeiten mithilfe des Draught Rating 133
Abb. 148 Minimale, maximalee und durchschnittliche relative Luftfeuchte im Zuschauersaal nach Fuß- und Kopfbereich 134
Abb. 149 Unterschied der relativen Luftfeuchte zwischen den Nutzungszuständen nach Kopf- und Fußbereich 134

Abb. 150 Korrelation der Differenz zwischen Kopf- und Fußbereich für relative Luftfeuchte und Lufttemperatur 135
Abb. 151 Differenz der relativen Luftfeuchte zwischen Kopf- und Fußbereich nach Nutzungszustand 135
Abb. 152 Einordnung der Messwerte zur relativen Luftfeuchte in die Komfortkategorien 136
Abb. 153 Zuschauersaal des Opernhauses Bonn 136
Abb. 154 Minimale, maximale und durchschnittliche PMVs in den Theaterspielstätten 138
Abb. 155 Kategorisierung nach PMV in den Theaterspielstätten 138
Abb. 156 Tendenz des gesamtheitlichen thermischen Empfindens in den Theaterspielstätten 139
Abb. 157 Vergleich der Kategorisierung nach Temperaturbereichen und anhand der PMV- und PPD-Werte 139
Abb. 158 Gesamtkategorisierung anhand einzelner Raumkomfortparameter 141
Abb. 159 Schema zum Aufbau des Fragebogens nach DIN EN ISO 10551 [42] 142
Abb. 160 Beschriftung der symmetrischen zweipoligen Skala mit Indifferenzpunkt 143
Abb. 161 Interpretation der Korrelationskoeffizienten nach Gossauer [50] 144
Abb. 162 Rücklauf der Nutzerfragebögen nach Theaterspielstätten 146
Abb. 163 Geschlecht und Altersstruktur der Befragten nach Theaterspielstätten 146
Abb. 164 Zusammenhang zwischen Zufriedenheit und persönlicher Stimmung der Befragten 147
Abb. 165 Durchschnittliche Bewertung des Theatersaals in den unterschiedlichen Spielstätten 147
Abb. 166 Verteilung der Befragungsergebnisse zum Temperaturempfinden 148
Abb. 167 Prozentuale Verteilung der Befragungsergebnisse zum Temperatur- und Feuchtigkeitsempfinden 149
Abb. 168 Prozentuale Verteilung der Befragungsergebnisse zum Empfinden der Luftbewegung und der Luftqualität 149
Abb. 169 Median mit Streuungsbereich je Raumkomfortparameter und Theaterspielstätte 150
Abb. 170 Mittlere Bewertung sowie Streuung der affektiven Bewertung des persönlichen thermischen Befindens 151
Abb. 171 Unbehaglichkeitsindex in den einzelnen Theaterspielstätten 151
Abb. 172 Mittlere Bewertung sowie Streuung der thermischen Präferenz 152
Abb. 173 Mittlere Bewertung sowie Streuung der Präferenz zur Luftfeuchtigkeit 152
Abb. 174 Mittleren Bewertung sowie Streuung zur Präferenz der Luftbewegung 153
Abb. 175 Wahrnehmungsbewertung und Präferenz des persönlichen thermischen Empfindens 153
Abb. 176 Verteilung der Befragungsergebnisse zur persönlichen Annehmbarkeit der thermischen Umgebung 155
Abb. 177 Verteilung der Befragungsergebnisse zur Toleranz gegenüber der thermischen Umgebung 155
Abb. 178 Mittlere Wahrnehmung der Befragten gegenüber der gemessenen durchschnittlichen Lufttemperatur 156
Abb. 179 Unbehaglichkeitsindex gegenüber dem vorausgesagten Anteil Unzufriedener 157
Abb. 180 Mittlere Wahrnehmung der Befragten gegenüber der gemessenen durchschnittlichen relativen Luftfeuchte während der Vorstellungszeiten 158
Abb. 181 Kategorisierung der Messwerte gegenüber dem Anteil an Personen, die angegeben haben, die Luft als eher feucht zu empfinden 159

Abb. 182 Mittlere Wahrnehmung der Befragten gegenüber der gemessenen durchschnittlichen Luftgeschwindigkeit während der Vorstellungszeiten 160
Abb. 183 Durchschnittliche gemessene Luftgeschwindigkeit während der Vorstellungszeiten gegenüber dem Anteil an Befragten, die angegeben haben, Zugerscheinungen wahrzunehmen 161
Abb. 184 Kategorisierung der Messwerte gegenüber dem Anteil an Personen, die angegeben haben, Zug zu empfinden 162
Abb. 185 Mittlere Wahrnehmung der Befragten gegenüber der gemessenen durchschnittlichen CO_2-Konzentration 163
Abb. 186 Kategorisierung der Messwerte gegenüber dem Anteil an Personen, welche die Luft als eher stickig empfanden 163
Abb. 187 Durchschnittliche CO_2-Konzentration während einzelner Vorstellungen nach Theaterspielstätten 164
Abb. 188 Zuschauersaal des Staatstheaters Schwerin 164
Abb. 189 PMVs aus Berechnungen auf Basis der Durchschnittstemperaturen während der Vorstellungen und der Nutzerbefragung 166
Abb. 190 Befragungsergebnisse zur empfundenen Lufttemperatur über den PMV in Abhängigkeit der durchschnittlichen Lufttemperaturen während der Vorstellungen 166
Abb. 191 Prozentuale Verteilung der Befragungsergebnisse zur thermischen Umgebung 167
Abb. 192 Ermittelte Kategorien zur Auslegung der thermischen Gesamtbehaglichkeit für den Raumtypen „Zuschauersäle in Theaterspielstätten“ nach DIN EN ISO 7730 [32] 168
Abb. 193 Komfortbereiche und Lage der thermischen Neutralitätspunkte der Raumtypen „Hör-, bzw. Zuschauersaal“ und „Zuschauersäle in Theaterspielstätten“ 169
Abb. 194 Prozentuale Einordnung der Messwerte in die Behaglichkeitskategorien nach Raumtyp „Theatersaal“ 170
Abb. 195 Formblatt zur Dokumentation von Nutzungsradbedingungen nach DIN V 18599-10 [34] 171
Abb. 196 Nutzungs- und Betriebszeiten der RLT-Anlagen für den Zuschauerbereich 173
Abb. 197 Jährlichen Nutzungswochen und -tage für den Zuschauerbereich 173
Abb. 198 Jährlichen Betriebswochen und –Tage der RLT-Anlage für den Zuschauerbereich 174
Abb. 199 Nutzungsrandbedingungen für das Nutzungsprofil Nr.23 Zuschauerbereich nach DIN V 18599-10 [34] 175
Abb. 200 Maximale Außenluftvolumenströme personen- und flächenbezogen für den Zuschauerbereich 176
Abb. 201 Belegungsdichte in den Theaterspielstätten für den Zuschauerbereich 176
Abb. 202 Wärmeeintrag durch Personen für den Zuschauerbereich 177
Abb. 203 Täglicher Wärmeeintrag durch Personen bei Voll- und Durchschnittsauslastung für den Zuschauerbereich 177
Abb. 204 Nutzungs- und Betriebszeiten der RLT-Anlagen für das Theater-Foyer 178
Abb. 205 Nutzungsrandbedingungen für das Nutzungsprofil Nr.24 Theater-Foyer DIN V 18599-10 [34] 179
Abb. 206 Jährlichen Betriebswochen und –Tage der RLT-Anlage für das Theater-Foyer 180
Abb. 207 Raum-Solltemperaturen im Heizfall für das Theater-Foyer 181
Abb. 208 Jährlichen Nutzungs- und Betriebstage für die Bühne 181
Abb. 209 Nutzungsrandbedingungen für das Nutzungsprofil Nr.25 Bühne DIN V 18599-10 [34] 182

Abb. 210 Arbeitsgalerien im Bühnenturm des Opernhauses Chemnitz 183
Abb. 211 Einordnung des Intensivmonitorings gegenüber der Querschnittserhebung 190
Abb. 212 Visualisierung des sanierten Gebäudeensembles der Bühnen Köln am Offenbachplatz [Bildquelle: © Bühnen der Stadt Köln] 191
Abb. 213 Saniertes Scharoun Theaters Wolfsburg [Bildquelle: © Lars Landmann] 191
Abb. 214 Standort des Scharoun Theaters in der Stadt Wolfsburg [Bildquelle: Google Maps] 193
Abb. 215 Funktionale Gliederung des Baukörpers 195
Abb. 216 Sanierungsmaßnahmen im Scharoun Theater Wolfsburg 197
Abb. 217 Anteilige Genre der Veranstaltungen im Betrachtungszeitraum 200
Abb. 218 Besucherzahlen, Auslastung und Anteil der Vorstellungen nach Monaten*1 201
Abb. 219 Anteil der Vorstellungen nach Wochentagen 201
Abb. 220 Flächenanteile der Zonen aus dem Scharoun Theater Wolfsburg gegenüber der Querschnittserhebung 203
Abb. 221 Flächenanteile der Organisationsbereiche aus dem Scharoun Theater Wolfsburg gegenüber der Querschnittserhebung 203
Abb. 222 Konstruktion der Außenwände 204
Abb. 223 Außengestaltung des Scharoun Theaters Wolfsburg [Bildquelle: © Lars Landmann] 205
Abb. 224 Konstruktion der Fenster 206
Abb. 225 Konstruktion der Dächer 206
Abb. 226 Konstruktion der Geschossdecken und Bodenplatten 207
Abb. 227 Oberflächengestaltung im Foyer 208
Abb. 228 Fernwärmeversorgung Scharoun Theater Wolfsburg 208
Abb. 229 Wärmeversorgung 209
Abb. 230 Heizungsverteilung 210
Abb. 231 Aufstellung der Kälteanlagen im Scharoun Theater Wolfsburg 211
Abb. 232 Gekühlte Gebäudebereiche 212
Abb. 233 Bestuhlung des Zuschauersaals 213
Abb. 234 Zonierung der Lüftungsanlagen 214
Abb. 235 Abb. 229 Funktionsschema der Lüftungsanlage „01/02 Zuschauersaal“ 215
Abb. 236 Funktionsschema der Lüftungsanlage „03 Foyer/Cafeteria/Sanitärbereich“ 215
Abb. 237 Aufstellung der Lüftungsanlagen im Scharoun Theater Wolfsburg 216
Abb. 238 Deckengestaltung des Zuschauersaals 218
Abb. 239 Foyerbereich des Scharoun Theaters Wolfsburg 219
Abb. 240 Kassen- und Eingangsbereich 219
Abb. 241 Flurbereich bei den Garderoben 220
Abb. 242 Stromkreisläufe 221
Abb. 243 Aufstellort der Wetterstation 222
Abb. 244 Datenübertragung der Wetterstation 222
Abb. 245 Wetterstation auf dem Dach des Anbaus 223
Abb. 246 Messtoleranzen für die Sensoren der Wetterstation 223

Abb. 247 Schema Gebäudetechnik 225
Abb. 248 Datenübergabe 226
Abb. 249 Messstellen Stromverbrauch 227
Abb. 250 Messstellen Fernwärmeverbrauch 228
Abb. 251 Messstellen Raumklima 229
Abb. 253 Konzept des sitzplatzwechselnden Messtorsos 230
Abb. 252 Platzierung des fest installierten Messtorso im Zuschauersaal 230
Abb. 255 Innere Struktur der Messboxen 231
Abb. 254 Messtoleranzen der gewählten Sensoren für die Messboxen 231
Abb. 256 Klimareferenztage im Messzeitraum am Standort Wolfsburg 232
Abb. 257 Monatliche Lufttemperaturen im Messzeitraum am Standort Wolfsburg 232
Abb. 258 Monatliche absolute Luftfeuchte im Messzeitraum am Standort Wolfsburg 233
Abb. 259 Monatliche relative Luftfeuchte im Messzeitraum am Standort Wolfsburg 233
Abb. 260 Häufigkeit der Windgeschwindigkeit während des Messzeitraums am Standort Wolfsburg 234
Abb. 261 Häufigkeit der Windrichtung während des Messzeitraums am Standort Wolfsburg 234
Abb. 262 Jahresreferenzprofils der Querschnittserhebung gegenüber dem Jahresstromverbrauch des Scharoun Theaters 236
Abb. 263 Durchschnittlicher monatlicher Tagesstromverbrauch 236
Abb. 264 Wochenreferenzprofil der Querschnittserhebung gegenüber dem Wochenstromverbrauch des Scharoun Theaters 237
Abb. 265 Monatlicher Anteil des erfassten und nicht erfassten Stromverbrauchs 238
Abb. 266 Jährliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs nach Stromkreisen 239
Abb. 267 Prozentuale monatliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs nach Stromkreisen 240
Abb. 268 Absolute monatliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs nach Stromkreisen 240
Abb. 269 Monatsstromverbrauchsanteile für S03.15 Kältemaschine gegenüber der Außenlufttemperatur 241
Abb. 270 Monatsstromverbrauchsanteile gegenüber der Veranstaltungsanzahl 241
Abb. 271 Monatsstromverbrauchsanteile im Zuschauersaal und für die Bühnentechnik 242
Abb. 272 Monatsstromverbrauchsanteile für die Bespielung der Bühne 243
Abb. 273 Monatsstromverbrauchsanteile der Probebühne gegenüber der Globalstrahlung 244
Abb. 274 Absolute wöchentliche Zusammensetzung des Stromverbrauchs aus den Stromkreisen 245
Abb. 275 Wochenstromverbrauchsanteile für S03.1 Dimmerschrank, S03.18 Bühne ext. 01 und S03.6 Foyer gegenüber der Vorstellungsanzahl 246
Abb. 276 Wochenstromverbrauchsanteile für S03.5/S03.13 Verwaltung sowie S03.3 Probebühne gegenüber der Nutzungszeit 246
Abb. 277 Wochenstromverbrauchsanteil verschiedener Stromkreise gegenüber der Vorstellungsanzahl 247
Abb. 278 Wochenstromverbrauchsanteil für S03.15 Kältemaschine und dem nicht erfassten Verbrauch 247
Abb. 279 Durchschnittlichen täglichen Stromverbrauchszusammensetzung aus den Stromkreisen für Vorstellungs- und Leerstandstage 248
Abb. 280 Monatliche Gesamtfernwärmeverbräuche und durchschnittliche Tagesverbräuche 249

Abb. 281 Durchschnittlicher Tagesverbrauch für Heizung/Warmwasser gegenüber der mittleren Außentemperatur 250
Abb. 282 Grund-, Mittel-, und Spitzenlast des Scharoun Theaters Wolfsburg im Verhältnis zur Querschnittserhebung 251
Abb. 283 Klassifizierung der auftretenden Lasten im Verhältnis zur Betriebsform 252
Abb. 284 Maximale, minimale und durchschnittliche Lasten in den einzelnen Stromkreisen 253
Abb. 285 Summenhäufigkeit von Lasten in den einzelnen Stromkreisen 255
Abb. 286 Anteilige Lastverteilung auf Grund-, Mittel- und Spitzenlastbereich für die einzelnen Stromkreise 256
Abb. 287 Durchschnittslasten zu verschiedenen Tageszeiträumen für die einzelnen Stromkreise 257
Abb. 288 Referenzlastprofil für Tage ohne Vorstellungen 258
Abb. 289 Referenzlastprofil für Tage mit Vorstellungen auf der Hinterbühne 258
Abb. 290 Referenzlastprofils für Tage mit Vorstellungen unter der Woche 259
Abb. 291 Referenzlastprofil für Tage mit Vorstellungen an Samstagen 259
Abb. 292 Referenzlastprofils für Tage mit Vorstellungen an Sonntagen 260
Abb. 293 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 10_SF 261
Abb. 294 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 10_SF 261
Abb. 295 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 07_WL 262
Abb. 296 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 07_WL 262
Abb. 297 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 08_SL 263
Abb. 298 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 08_SL 263
Abb. 299 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 06_SSoV 264
Abb. 300 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 06_SSoV 264
Abb. 301 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 05_WSoV 265
Abb. 302 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 05_WSoV 265
Abb. 303 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 04_SSaV 266
Abb. 304 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 04_SSaV 266
Abb. 305 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 03_WSaV 267
Abb. 306 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 03_WSaV 267
Abb. 307 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 02_SWoV 268
Abb. 308 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 02_SWoV 268
Abb. 309 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 01_WWoV 269
Abb. 310 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 01_WWoV 269
Abb. 312 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 12_SVV 270
Abb. 311 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 12_SVV 270
Abb. 313 Gesamter Tageslastverlaufs für Typtag 11_WVV 271
Abb. 314 Tageslastverlaufs der einzelnen Stromkreise für Typtag 11_WVV 271
Abb. 315 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für den „Nicht gemessenen Verbrauch“ 272
Abb. 316 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.1 Dimmerschrank 273
Abb. 317 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.7 Zuschauerraum 01 274
Abb. 318 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.6 Foyer 275

Abb. 319 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.8 Zuschauerraum 02 276
Abb. 320 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.11/S03.25 Maschinerie 276
Abb. 321 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.5/S03.13 Verwaltung EG/KG 277
Abb. 322 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.2 Szenische Beleuchtung 277
Abb. 323 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S02 Kantine 278
Abb. 324 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S01 Buffet 278
Abb. 325 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.15 Kältemaschine 279
Abb. 326 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.18 Bühne ext. 01 279
Abb. 327 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.19 Bühne ext. 02 280
Abb. 328 Tageslastverlaufs verschiedener Typtage für S03.3 Probebühne 281
Abb. 329 Monatliche Betriebsstunden und Einschaltdauer der Lüftungsanlage 282
Abb. 330 CO_2-Konzentration in der Abluft 283
Abb. 331 Summenhäufigkeit der CO_2-Konzentration in der Abluft 284
Abb. 332 Temperaturverlauf für Außen-, Fort- und Abluft in Zusammenhang mit dem Betriebszustand der Lüftungsanlage 284
Abb. 333 Summenhäufigkeit für Misch- und Fortlufttemperatur in Abhängigkeit des Nutzungszeitraums 285
Abb. 334 Temperaturverlaufs der Ab- und Fortluft sowie der Temperaturdifferenzen 285
Abb. 335 Monatlicher Nutzungsanteils der Wärmerückgewinnung während der Betriebszeiten der Lüftungsanlage und rückgewonnene Wärmemenge 286
Abb. 336 Monatliche Wärmeeinträge und –verluste 286
Abb. 337 Monatliche durch Lüftung abgeführten Wärmemenge im Verhältnis zu den Wärmelasten 287
Abb. 338 Durchschnittlicher Frisch- und Umluftanteil in Abhängigkeit des Nutzungszustands 287
Abb. 339 Monatlicher Stromverbrauch und –Lasten nach Betriebszustand der Kälteanlage 289
Abb. 340 Schema der Kälteanlage mit Eintragung der Messpunkte 290
Abb. 341 Gegenüberstellung des Anlagenzustands mit den Vor- und Rücklauftemperaturen im Betrachtungszeitraum 291
Abb. 342 Summenhäufigkeit der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf im Kühlkreislauf 292
Abb. 343 Monatliche Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperaturen in der Löschwasserzisterne 292
Abb. 344 Summenhäufigkeit der Temperaturen in der Löschwasserzisterne im Rückkühlkreislauf 293
Abb. 345 Anlagenzustand gegenüber dem Temperaturverlauf in der Löschwasserzisterne im Betrachtungszeitraum 293
Abb. 346 Anlagenzustands gegenüber der Temperaturänderung in der Löschwasserzisterne 294
Abb. 347 Anlagenzustand gegenüber der Rücklauftemperatur sowie der Temperatur im unteren Bereich der Löschwasserzisterne 295
Abb. 349 Absoluter Stromverbrauch 296
Abb. 348 Spezifischer Stromverbrauch 296
Abb. 351 Absoluter Fernwärmeverbrauch 297
Abb. 350 Spezifischer Fernwärmeverbrauch 297
Abb. 352 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum flächenbezogenen Stromverbrauch 299

Abb. 353 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum sitzplatzbezogenen Stromverbrauch 300
Abb. 354 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum flächenbezogenen Verbrauch für Heizung/Warmwasser 301
Abb. 355 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum sitzplatzbezogenen Verbrauch für Heizung/Warmwasser 301
Abb. 356 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum Gesamtendenergieverbrauch 302
Abb. 357 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum sitzplatzbezogenen Primärenergieverbrauch 303
Abb. 358 Einordnung des Scharoun Theaters in das Benchmarking zum flächenbezogenen Primärenergieverbrauch 303
Abb. 359 Anteil der konditionierten Fläche in Bezug auf die Nettogrundfläche 305
Abb. 360 Zusammensetzung der Bedarfsanteile 306
Abb. 361 Anteil der Zonen am Endenergiebedarf 307
Abb. 362 Anteile der Zonen am Endenergiebedarf gegenüber des Anteils an der beheizten Nettogrundfläche 308
Abb. 364 Spezifischer Endenergiebedarf der einzelnen Zonen bezogen auf die größten Verbraucher 309
Abb. 363 Anteil der Zonen am Endenergiebedarf der größten Verbraucher 309
Abb. 365 TEK-Bewertung der einzelnen Verbraucher 310
Abb. 366 Anteil der Verbraucher nach Energieträger 312
Abb. 367 Spezifischer Bedarf der einzelnen Verbraucher nach Energieträger 313
Abb. 368 Prozentualer Endenergiebedarf der einzelnen Zonen 314
Abb. 369 Spezifischer Endenergiebedarf der einzelnen Zonen 315
Abb. 370 Prozentualer Bedarf der einzelnen Verbraucher für die Zone 11_Theatersaal 316
Abb. 371 Zuordnung der Berechnungsbestandteilen zu den Stromkreisen 317
Abb. 372 Zuordnung der Zonen aus der TEK-Tool-Berechnung zu den Stromkreisen 318
Abb. 373 Bewertungskriterien für Heiz- und Kühlperiode für den Raumtypen Hör-, bzw. Zuschauersaal mit Energieumsatz von 1,2 met nach DIN EN 15251 [36] 320
Abb. 374 Lufttemperatur im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Zuschauersaal 321
Abb. 376 Zusammenhang zwischen der Auslastung und der Temperatursteigerung im Zuschauersaal 322
Abb. 375 Kategorisierung der Lufttemperatur während des Messzeitraums im Zuschauersaal 322
Abb. 377 Relative Luftfeuchte im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Zuschauersaal 323
Abb. 378 Kategorisierung der Relativen Luftfeuchte während des Messzeitraums im Zuschauersaal 323
Abb. 379 Luftgeschwindigkeit im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Zuschauersaal 324
Abb. 380 Kategorisierung der Luftgeschwindigkeit während des Messzeitraums im Zuschauersaal 324
Abb. 381 Kategorisierung der Vertikalen Temperaturdifferenz während des Messzeitraums im Zuschauersaal 325
Abb. 382 Durchschnittliches PMV während des Messzeitraums im Zuschaueraal 326
Abb. 383 Kategorisierung der Predicted Mean Votes im Zuschauersaal 327
Abb. 384 Raumluftqualität während des Messzeitraums im Zuschauersaal 328

Abb. 385 Kategorisierung der Raumluftqualität während des Messzeitraums im Zuschauersaal 328
Abb. 386 Lufttemperatur im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals 329
Abb. 387 Kategorisierung der Lufttemperatur während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals 329
Abb. 388 Lufttemperaturverlauf im Rang und im Parkett für den Kopfbereich 330
Abb. 389 Relative Luftfeuchte im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals 331
Abb. 390 Kategorisierung der Relativen Luftfeuchte während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals 331
Abb. 391 Verlauf der Relativen Luftfeuchte im Rang und im Parkett für den Kopfbereich 332
Abb. 392 Luftgeschwindigkeit im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals 333
Abb. 393 Kategorisierung der Vertikalen Temperaturdifferenz während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals 333
Abb. 394 Kategorisierung der vertikalen Temperaturdifferenz während des Messzeitraums 335
Abb. 395 Durchschnittliches PMV während des Messzeitraums im Rang des Zuschauersaals 336
Abb. 396 Kategorisierung der Predicted Mean Votes im Rang des Zuschauersaals 336
Abb. 397 Lufttemperatur des Foyers im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums 338
Abb. 398 Kategorisierung der Lufttemperatur während des Messzeitraums im Foyer 338
Abb. 399 Relative Luftfeuchte im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Foyer 340
Abb. 400 Kategorisierung der relativen Luftfeuchte während des Messzeitraums im Foyer 340
Abb. 401 Luftgeschwindigkeit im Kopf- und Fußbereich während des Messzeitraums im Foyer 341
Abb. 402 Kategorisierung der Luftgeschwindigkeit während des Messzeitraums im Foyer 341
Abb. 403 Kategorisierung der vertikalen Temperaturdifferenz während des Messzeitraums im Foyer 342
Abb. 405 Durchschnittliches PMV während des Messzeitraums im Foyer 343
Abb. 404 Kategorisierung der Predicted Mean Votes im Foyer 343
Abb. 406 CO_2-Konzentration im beispielhaften Büroraum während des Messzeitraums 345
Abb. 407 Zusammenhang zwischen der CO_2-Konzentration in der Raum- und der Außenluft im beispielhaften Büroraum 345
Abb. 408 Zusammenhang zwischen der mittleren CO_2-Konzentration und der mittleren Außenlufttemperatur im beispielhaften Büroraum 346
Abb. 409 Kategorisierung der Raumluftqualität anhand der CO_2-Konzentration im beispielhaften Büroraum 346
Abb. 411 Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Temperatur der Raum- und Außenluft im beispielhaften Büroraum 347
Abb. 410 Raumlufttemperatur während des Messzeitraums im beispielhaften Büroraum 347
Abb. 412 Summenhäufigkeit der Raumlufttemperatur im beispielhaften Büroraum 348
Abb. 413 Erfüllung des Komfortbereichs in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur im beispielhaften Büroraum 348
Abb. 414 Aufgliederung des Zeitraums, in dem der Komfortbereich im beispielhaften Büroraum nicht erfüllt wird 349
Abb. 415 Kategorisierung der Relativen Luftfeuchte im beispielhaften Büroraum 349
Abb. 416 CO_2-Konzentration in der Raumluft der Garderobe während des Messzeitraums 350
Abb. 417 Summenhäufigkeit der CO_2-Konzentration in der Garderobe im gesamten Messzeitraum 350
Abb. 418 Summenhäufigkeit der CO_2-Konzentration in der Garderibe nach Monaten 351
Abb. 419 Kategorisierung der CO_2-Konzentration in der Garderobe 351
Abb. 420 CO_2-Konzentration in der Raumluft des Proberaums während des Messzeitraums 352
Abb. 421 Raumlufttemperatur im Proberaum während des Messzeitraums 353
Abb. 422 Befragungsteilnehmer nach Veranstaltungsdatum 354
Abb. 423 Altersstruktur der Befragten 355
Abb. 424 Bewertung unterschiedlicher Parameter im Zuschauersaal 356
Abb. 425 Beeinträchtigung durch Müdigkeit und Konzentrationsschwächen 356
Abb. 426 Bewertung unterschiedlicher Parameter zum Raumkomfort 357
Abb. 427 Befragungsergebnisse zum Empfinden gegenüber den angegebenen Präferenzen 357
Abb. 428 Beeinträchtigung durch Müdigkeit und Konzentrationsschwierigkeiten einer Vorstellung 359
Abb. 429 Bewertungsskalen der Raumklimaparameter 360
Abb. 430 Bewertung des Raumklimas einer Vorstellung 361
Abb. 431 Empfindung zum Raumkomfort gegenüber der Präferenz einer Vorstellung 361
Abb. 432 Darstellung der Bereiche im Zuschauersaal 362
Abb. 433 Rücklaufs der Fragebögen nach Bereichen des Zuschauersaals 363
Abb. 434 Vergleich der Bewertungsergebnisse in Bezug auf die Temperaturempfindung in Abhängigkeit von linker und rechter Saalseite 363
Abb. 435 Empfindung des Raumkomforts (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) in Abhängigkeit der linken und rechten Saalseite 364
Abb. 436 Empfindung des Raumkomforts (Luftbewegung und Luftqualität) in Abhängigkeit der linken und rechten Saalseite 364
Abb. 437 Predicted Mean Vote aus Befragung und Berechnung 365
Abb. 438 Predicted Percentages of Dissatified aus Befragung und Berechnung 366
Abb. 439 Ergebnisse zur Kategorisierung der thermischen Umgebung 366
Abb. 440 Befragungs- und Messergebnisse zur Luftfeuchte 368
Abb. 441 Befragungs- und Messergebnisse zur Luftbewegung 368
Abb. 442 Befragungs- und Messergebnisse zur Raumluftqualität 369

Hinweis:
Sofern im Abbildungsverzeichnis nicht anders angegeben, handelt es sich bei allen Grafiken und Fotos um eigene Darstellungen der Autoren des Forschungsberichts.

Dank

Wir bedanken uns herzlich bei allen, die das Forschungsprojekt tatkräftig unterstützt haben, insbesondere bei den Theatern und ihren Vertreter*innen, die ihre Häuser für die Messungen zur Verfügung gestellt haben.

Zuständigkeiten

Fördermittelgeber:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Durchführung:
Technische Hochschule Köln,
Fakultät für Architektur,
Institut für EnergieEffiziente Architektur³ (EEA³)

in Zusammenarbeit mit

Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme
Fakultät für Technische Gebäudeausrüstung

Projektleiterin:
Prof. Dipl.-Ing. Eva-Maria Pape

Projektleitung/Koordination:
Wiss. Mitarbeiterin Dipl.-Ing. Birgit D. Meier-Wiedemann

Auswertung/Datenanalyse:
Wiss. Mitarbeiterin M.A. Carolin Paulukat

Leitung Entwicklung Messkonzept:
Prof. Dr. rer. biol. hum. Jörg Reintsema

Entwicklung/Ausarbeitung Messkonzept:
Wiss. Mitarbeiter Dipl.-Ing. Hans Krämer
Wiss. Mitarbeiter B.A. Michael Kordas

Messauf-/Abbau:
Technischer Mitarbeiter Thomas Manns
Technischer Mitarbeiter Jean-Milan Debus

Sonstige Mitarbeit:
Stud. Hilfskraft Jennifer Datzert
Wiss. Hilfskraft Chelina Schütz

Impressum

Herausgeber

Technische Hochschule Köln
Fakultät für Architektur
Institut für Energieeffiziente Architektur³

Stand 31.03.2020

Technology
Arts Sciences
TH Köln

Fakultät für
Architektur
Institut für Energieeffiziente Architektur³

Fakultät für
Anlagen, Energie- und Maschinensysteme
Institut für Technische Gebäudeausrüstung

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Technology
Arts Sciences
TH Köln

Forschungsprojekt | Energetische Querschnittserhebung deutscher Theaterspielstätten
und Monitoring Scharoun Theater Wolfsburg mit Schwerpunkt Komfortuntersuchung