



Neubau eines energetisch optimierten Bürogebäudes  
Bob – balanced office building

Endbericht – 2007



Fachhochschule Köln  
Cologne University of Applied Sciences  
Institut für Technik und Ökologie

## Impressum

### **Autoren:**

Prof. Ing. Fred Ranft – FH Köln  
Dipl.-Ing. Ingo Repke – FH Köln  
Dr. Ing. Bernhard Frohn – VIKA  
Dipl.-Ing. Karl Heinz Weinreich

### **Herausgeber:**

Fachhochschule Köln  
Fakultät für Architektur  
Institut für Technik und Ökologie  
Betzdorfer Strasse 2 D-50679 Köln

### **Kontakt:**

Prof. Ing. Fred Ranft  
e-mail: fred.ranft@fh-koeln.de  
Tele: 0221 / 8275 – 2786

Dipl.-Ing. Ingo Repke  
e-mail: ingo.repke@fh-koeln.de  
Tele: 0221 / 8275 – 2895

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0335007N gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Förderkonzept „Solar optimiertes Bauen“, 3. Teilkonzept: „Solar optimierte Gebäude mit minimalem Energiebedarf“ im Rahmen des 3. Programms Energieforschung und Energietechnologien.

<b>1</b>	<b>KURZFASSUNG</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>PROJEKTBE SCHREIBUNG</b>	<b>3</b>
3.1	IDE E	3
3.2	INTEGRALER PLANUNGSANSATZ	5
3.3	MONITORING	5
3.4	PROJEKTDATEN	6
3.5	PLANUNGSTEAM	6
3.6	WISSENSTRANSFER	7
<b>4</b>	<b>GEBÄUDEPLANUNG</b>	<b>8</b>
4.1	BESCHREIBUNG DES GEBÄUDES	8
4.2	GEBÄUDEDATEN	9
4.2.1	GRUNDRISS	9
4.2.2	ANSICHTEN	11
4.2.3	EINGANGSBEREICHE UND INNENANSICHT	11
4.2.4	ZAHLEN UND FAKTEN	12
4.3	KONZEPTION DER ENERGIEVERSORGUNG	13
4.3.1	ENERGIEKONZEPT FÜR DAS GEBÄUDE	13
4.3.2	KONZEPT GEBÄUDETECHNIK	13
4.3.3	TAGESLICHTNUTZUNG UND KUNSTLICHTKONZEPT	16
4.3.4	GEBÄUDELEITTECHNIK	17
4.3.5	REGENWASSERNUTZUNG	19
4.4	SIMULATION	19
4.4.1	GEBÄUDESIMULATIONSPROGRAMM	20
4.4.2	VARIANTENBESCHREIBUNG	21
4.5	INVESTITIONSKOSTEN	29
<b>5</b>	<b>BAULICHE UMSETZUNG</b>	<b>30</b>
5.1	DAS GEBÄUDE	30
5.2	HEIZUNG UND KÜHLUNG	34
5.2.1	ERDWÄRMESONDEN	34
5.2.2	WÄRMEPUMPE	35
5.2.3	DIE BETONKERNTEMPERIERUNG	36
5.2.4	REGELUNG DER BETONKERNTEMPERIERUNG	37
5.3	WARMWASSERBEREITSTELLUNG	39
5.4	LÜFTUNG	39

5.4.1	REGELUNG DER LÜFTUNGSANLAGE	41
<b>5.5</b>	<b>TAGES- UND KUNSTLICHT</b>	<b>41</b>
5.5.1	TAGESLICHTNUTZUNG	41
5.5.2	KUNSTLICHTBELEUCHTUNG	42
5.5.3	REGELUNG DER BELEUCHTUNG	43
<b>6</b>	<b>MESSTECHNIK/ DATENERFASSUNG</b>	<b>44</b>
<b>6.1</b>	<b>MESSKONZEPT – ZONIERUNG</b>	<b>44</b>
6.1.1	RAUMKLIMADATEN	46
6.1.2	LÜFTUNGSANLAGEN UND BETONKERNTEMPERIERUNG	46
6.1.3	TECHNISCHE ANLAGEN	47
6.1.4	ENERGIEVERBRAUCHSMESSUNGEN	48
<b>6.2</b>	<b>DRUCKDIFFERENZMESSUNG</b>	<b>48</b>
6.2.1	BAUPHASE	48
6.2.2	FERTIGSTELLUNG	49
<b>6.3</b>	<b>THERMOGRAFIE</b>	<b>51</b>
<b>6.4</b>	<b>GEOTHERMISCHE VERHÄLTNISSE</b>	<b>52</b>
6.4.1	KARTOGRAPHISCHE ABSCHÄTZUNG	52
6.4.2	RESPONSE-TEST ERDWÄRMESYSTEM	52
<b>6.5</b>	<b>BESTIMMUNG DES TAGESLICHTQUOTIENTEN</b>	<b>54</b>
<b>6.6</b>	<b>BEWERTUNG DER MESSTECHNIK</b>	<b>55</b>
6.6.1	ENERGIEVERBRAUCHSERFASSUNG	55
6.6.2	MESSUNGEN DER RAUMTEMPERATUREN	55
<b>6.7</b>	<b>BESTIMMUNG DER RAUMLUFTQUALITÄT</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>57</b>
<b>7.1</b>	<b>IST / SOLL VERGLEICH</b>	<b>57</b>
7.1.1	VERGLEICH DER ENERGIEKENNWERTE	57
7.1.2	WETTERDATEN	58
7.1.3	ABGLEICH DER SIMULATION	62
<b>7.2</b>	<b>VERBRAUCH ELEKTRISCHE ENERGIE</b>	<b>66</b>
7.2.1	BELEUCHTUNG	68
7.2.2	BELÜFTUNG	70
7.2.3	DURCHLAUFERHITZER	71
7.2.4	ARBEITSMITTEL	72
7.2.5	PUMPEN	75
<b>7.3</b>	<b>VERBRAUCH THERMISCHE ENERGIE</b>	<b>77</b>
7.3.1	HEIZENERGIE - WÄRMEPUMPE	77
7.3.2	KÜHLENERGIEBEREITSTELLUNG	78

7.3.3	SONDENFELD - SOLETEMPERATURVERHALTEN IM BETRIEB	79
7.3.4	LÜFTUNG – HEIZEN UND KÜHLEN	80
<b>7.4</b>	<b>BEHAGLICHKEIT</b>	<b>81</b>
7.4.1	TEMPERATUR	81
7.4.2	MISCHGAS	85
7.4.3	FEUCHTIGKEIT	87
7.4.4	LUFTGESCHWINDIGKEITEN	88
7.4.5	LICHT	89
7.4.6	AKUSTIK	91
<b>7.5</b>	<b>GEBÄUDEHÜLLE</b>	<b>92</b>
7.5.1	DRUCKDIFFERENZMESSUNG	92
7.5.2	THERMOGRAPHIE	94
<b>7.6</b>	<b>NUTZERZUFRIEDENHEIT</b>	<b>96</b>
<b>7.7</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHKEIT</b>	<b>97</b>
<b>8</b>	<b>ERFAHRUNGSWERTE</b>	<b>98</b>
<b>9</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK</b>	<b>101</b>
<b>10</b>	<b>VERÖFFENTLICHUNGEN UND AUSZEICHNUNGEN</b>	<b>101</b>
10.1	BDA AACHEN - AUSZEICHNUNG GUTER BAUTEN 2003	101
10.2	NATÜRLICHE KLIMATISIERUNG	101
10.3	TAGESLICHTTECHNIK IN GEBÄUDEN	102

## **ANHANG**

### **ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

### **TABELLENVERZEICHNIS**

### **QUELLEN- UND BILDERNACHWEIS**



# 1 Kurzfassung

Das Bürogebäude BalancedOfficeBuilding - BOB ist Teil der Solarsiedlung Aachen. Die Anforderungen, die an die Siedlung gestellt werden, gelten für Wohngebäude. Dies war für die Bauherren, die gemeinsam am Konzept der Siedlung arbeiteten, Anlass ein Bürogebäude mit den speziellen Nutzeransprüchen an ein Bürogebäude und den Anforderungen, die für die Siedlung gelten, zu bauen.

Durch integrale Planung mit Einsatz von Gebäudesimulation konnte der Energieverbrauch des Gebäudes für Heizen und Kühlen minimiert werden. Der hohe Dämmstandard sowie der optimierte Fensterflächenanteil machte eine außen liegende Verschattung zur Reduzierung der Kühllast überflüssig.

Das Gebäude wurde in Massivbauweise mit einem hohen Grad an Vorfertigung errichtet und ist in seinen Hauptbereichen in Anlehnung an die Passivhaus-Bauweise errichtet. Die Struktur des Stahlbeton-Skelettbaus mit tragenden Betonfertigteillfassaden und Innenstützen ermöglichte eine besonders kurze Bauzeit von neun Monaten. Die Verkleidung der Außenwand ist als wartungsfreie hinterlüftete Ziegelplatten-Fassade ausgeführt. Flexible Trennwände lassen eine einfache Aufteilung der Grundeinheit zu. Die Nutzungseinheiten werden über ein gemeinsames Treppenhaus auf der Nordseite des Gebäudes erschlossen.

Die Wärme- und Kälteerzeugung erfolgen geothermisch mit Hilfe von 28 Erdsonden von bis zu 42 m Tiefe. Wärme und Kälte werden allein über die Betonkerntemperierung (BKT) und die Zuluft übertragen. Als Energieträger wird nur Strom eingesetzt.

Im Heizfall erfolgt die Energiebereitstellung unterstützt durch eine Kompressionswärmepumpe, die mit einem 900 Liter großen Pufferspeicher arbeitet. Im Kühlfall wird die erforderliche Kühlleistung ohne den Einsatz der Wärmepumpe, d. h. nur über die von den Erdsonden gelieferte „Kälte“, bereitgestellt. Eine zentrale Gebäudeleittechnik ist mittels eines Bussystems mit den technischen Anlagen verbunden und übernimmt die Regelung der Klimatisierung.

Die Zu- und Abluftanlage ist stockwerksweise mit einer Wärmerückgewinnung von 75% versehen. Jede Etage hat ihren spezifisch angepassten Luftvolumenstrom, der so ausgelegt ist, dass eine Fensterlüftung aus energetischen Gesichtspunkten möglich ist.

Innen liegende Jalousien dienen mit ihrer qualitativ hochwertigen Ausführung zum einen als Blend- bzw. Sonnenschutz und haben zum anderen eine Tageslicht lenkende Funktion. Der somit reduzierte Anteil an Kunstlicht wird nochmals über die tageslichtabhängige Steuerung der Beleuchtung in Verbindung mit dem o.g. Bussystem und entsprechender Sensorik auf dem Dach, verringert.

Die Förderung des Monitorings im Rahmen des Forschungsprojektes „Solarbau“ ermöglichte die Einbindung eines umfangreichen Messkonzeptes. Dies Messkonzept ist so ausgelegt, das der in der Planung berechneten Energiebedarf sowie die Behaglichkeit der Nutzer messtechnisch bestimmt werden kann.

Seit Beginn der Messphase konnten die gesetzten Anforderungen vom Forschungsprojekt erfüllt und optimiert werden. Die durch das Monitoring gestützte Optimierung führte z.B. im Jahr 2005 zu einem Primärenergiebedarf von 83,7 kWh/m<sup>2</sup>a und einem Heizwärmebedarf von 26,3 kWh/m<sup>2</sup>a.

Neben den energetischen Anforderungen stehen auch die Behaglichkeitsaspekte auf dem Prüfstand. Besonderes Augenmerk galt den Temperaturen in den Büros, da diese auch eine Messgröße zur Funktionsüberprüfung des Technikkonzeptes darstellt. Eine Nutzerumfrage ergab hohe Zufriedenheit mit den Raumtemperaturen und dies unabhängig von der Jahreszeit. Temperaturen außerhalb der Behaglichkeitsgrenzen waren eher die Ausnahme und ließen sich zumeist über eine hohe Raumbelastung oder nicht genutzte Möglichkeiten des Sonnenschutzes erklären.

Die aufgezeigten Ergebnisse bestärkt die Gebäudeentwickler, aus BOB ein Produkt zu machen und das Gebäude an weiteren Standorten nachzubauen und mit einem vereinfachten Monitoring zu begleiten.

## 2 Einleitung

Im Bereich des Wohnungsbaus sind in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte sowohl bei der Minimierung des Energiebedarfs, als auch bei der Deckung durch aktive Solarsysteme gemacht worden. Vieles ist mittlerweile als "Stand der Technik" etabliert.

Neben den Wohngebäuden benötigen Nichtwohngebäude, die einen nicht unerheblichen Teil des Gebäudebestandes darstellen, einen spezifisch höheren Anteil an Energie. Der Energiebedarf zur Kühlung, Lüftung und Beleuchtung übersteigt meist den Bedarf zur Wärmebereitstellung deutlich. Zur Deckung des in diesem Bereich noch vorhandenen Forschungsbedarfs wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) das Förderprogramm "Solar optimiertes Bauen" - kurz SolarBau - aufgelegt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde das Balanced Office Building - BOB im Teilkonzept 3 "Solar optimierte Gebäude mit minimalem Energiebedarf" gefördert. Ziel von Solarbau war es, einen Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung unter 100 kWh/m<sup>2</sup>a zu erreichen.

Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, soll schon zu Beginn der Planung anhand von Simulationen in mehreren Varianten der optimierte Gebäudeentwurf gefunden werden.

Als übergeordnete Instanz fungiert der SolarBau-MONITOR. Hier werden die verschiedenen Projekte messtechnisch erfasst, dokumentiert, analysiert und entsprechende Lehrmaterialien für die Ausbildung entwickelt.

Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt die Konzeptfindung sowie die Auswertung der messtechnischen Untersuchungen.

Dabei liegt der Schwerpunkt

- auf dem Nachweis der Behaglichkeit
- auf der Aufschlüsselung des End- und Primärenergiebedarfs für die einzelnen Anlagentechniken bzw. deren Effizienz
- auf der Überprüfung des Regelkonzeptes sowie
- der Optimierung und Fehlersuche.

Die Gestaltung des Berichtes ist so angelegt, dass die verwendeten Grafiken nur geringen textlichen Erklärungsbedarf benötigen. Der Leser soll so in die Lage versetzt werden, sich schnell einen Überblick über Besonderheiten dieses Gebäudes bzw. der Ergebnisse aus der Monitoringphase zu verschaffen.

In den Kapiteln 3 und 4 werden das Projekt bzw. die Planung beschrieben. Im Kapitel 5 wird die Umsetzung im Detail dargestellt. Die Kapitel 6 und 7 beschreiben das Messkonzept sowie die ermittelten Ergebnisse. Die abschließenden Kapitel 8 und 9 fassen die Möglichkeiten der weiteren Optimierung zusammen und werfen einen Ausblick auf die geplanten Entwicklungen des Projektes.

## 3 Projektbeschreibung

### 3.1 Idee

Das Architekturbüro Hahn Helten, der Tragwerksplaner Burkhard Walter sowie die VIKA Ingenieurgesellschaft hatten die Idee, ein Gebäude mit minimalen Lebenszykluskosten zu entwickeln. Investitions-, Energie-, Wartungs-, Instandsetzungs-, Änderungskosten und die Wiederverwertbarkeit sollten im Zusammenspiel optimiert werden, ohne dass einem Aspekt herausragende Bedeutung zukommen sollte und wobei alle Aspekte gleich wichtig waren. Auf diese Weise wurde die Balance sowohl Planungsleitlinie als auch Namensgeber für das Balanced Office Building.

Das Grundstück liegt am Rande von Laurensberg im Übergang zu einem Landschaftsschutzgebiet. BOB und das benachbarte Bürogebäude stellen das Eingangstor zur Solarsiedlung Schurzelter Winkel dar.



An sich ändernde und steigende Anforderungen der Arbeitswelt soll das Gebäude leicht anpassbar sein. Dabei steht ein behagliches Raumklima für die Optimierung des Gebäudes im Vordergrund, da es die Arbeitsleistung steigert und die persönliche Gesundheit fördert.

Dieser Aspekt ist zudem relevant für die Lebenszykluskosten eines Gebäudes. Studien nach /1/ belegen, dass oberhalb von 28°C Empfindungstemperatur eine Minderung der Arbeitsfähigkeit im Bürobereich um ca. 30 % erwartet werden. Selbst wenn nur in einem Monat pro Jahr Temperaturen oberhalb von 28°C Empfindungstemperatur erreicht werden, und dass das Gebäude nicht gekühlt wird, so wird auf diese Weise ein Arbeitsminderung in Kauf genommen, die einem Mietpreisäquivalent von 5 €/m<sup>2</sup> Monat entspricht. Tatsächlich bewegt sich diese Zahl in der Größenordnung einer Kaltmiete für minderwertige Bürogebäude.

### 3.2 Integraler Planungsansatz

Die Optimierung der Lebenszykluskosten verlangt einen integralen Planungsansatz aller Beteiligten. Dieser theoretisch wünschenswerte Ansatz, bedeutet in der Praxis häufig einen Mehraufwand. Dieser macht sich in der Qualität des Bauproduktes zweifelsohne bemerkbar und kann auch einem wirtschaftlichen Vergleich standhalten. Der Mehraufwand für integrale Planung lohnt sich über die Lebensdauer des Gebäudes, wenn man bedenkt, dass bei Nutzbauten für die Betriebskosten in 10-20 Jahren nochmals Finanzmittel in Höhe der Investitionskosten aufgewendet werden müssen.

Da in diesem Fall die Bauherren gleichzeitig Gebäudeplaner und Nutzer sind, ließ sich der integrale Planungsansatz gegenüber anderen Projekten deutlich einfacher umsetzen.

### 3.3 Monitoring

Die Solarbauförderung ermöglichte die Integration eines umfänglichen Messkonzeptes. Anhand stündlich aufgenommener Messdaten über mehrere Jahre hinweg und anhand der Nutzerbefragungen konnten die Planungsannahmen validiert und konnte der Gebäudebetrieb weiter verbessert werden. Gerade für die Steigerung der Effizienz der Wärmepumpe erwies sich, wie auch bei anderen Projekten, das Monitoring als äußerst wichtig. Schärfer formuliert, konnte sogar nachgewiesen werden, dass die Wärmepumpe ohne die Erfahrungswerte aus dem Monitoring für die nächsten 15-20 Jahre mit katastrophaler Effizienz gearbeitet hätte.

Das energetische und hinsichtlich der Behaglichkeit sehr aussagekräftige Monitoring führte zudem zur mehrfachen Überarbeitung und Optimierung des Regelalgorithmus für die Ansteuerung der Betonkernaktivierung.

### 3.4 Projektdaten

Förderkennziffer	0335007N
Projektlaufzeiten	1.2.2002 bis 30.11.2006
Fördersumme Monitoring	440.754 €
Projekträger	PTJ Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich
Gesamtkosten des Bauobjektes	2.4 Mio. €

Tabella 1 - Projektdaten

	SolarBau TK3 [kWh/m <sup>2</sup> a] - Zielwerte -	BOB [kWh/m <sup>2</sup> a] - Planungswerte -	
Heizwärmebedarf	< 40	39,7	nach WSchVo
Heizung		13,0	
Kühlung		3,3	
Luftförderung		2,0	nach LEE
Beleuchtung		10,0	nach LEE
Hilfsenergien		3,3	nach LEE
Endenergie total	< 70	31,6 (Strom)	
Primärenergie total	< 100	94,8	PE-Faktor 3,0

Tabella 2 - Ziel- und Planungswerte für den Energieverbrauch des Gebäudes

<b>Kosten</b>	Baukonstruktion DIN 276: KG 300	techn. Anlagen DIN 276: KG 400	Bauwerkskosten KG 300+KG 400
Bauwerkskosten Brutto, Stand Kostenberechnung			
Brutto Raum Inhalt DIN 277 	215 €/m <sup>3</sup>	99 €/m <sup>3</sup>	314 €/m <sup>3</sup>
Netto Grund Fläche DIN 277 	770 €/m <sup>2</sup>	355 €/m <sup>2</sup>	1.125 €/m <sup>2</sup>

Tabella 3 - Kosten der Baukonstruktion und der technischen Anlagen

### 3.5 Planungsteam

#### Bauherr

Bauherrengemeinschaft Schurzelterstrasse  
 Schurzelterstraße 27 - 52074 Aachen  
 Ansprechpartner: Frau Schiffers  
 und Herr Helten

#### Tragwerksplanung und Brandschutz

Ing.-Büro für Bauwesen Walter  
 Schurzelterstraße 27 - 52074 Aachen  
 Ansprechpartner: Herr Walter

#### Architektur und Bauleitung

Hahn Helten Architekten  
 Schurzelterstraße 27 - 52074 Aachen  
 Ansprechpartner: Herr Helten  
 und Herr Fensterer

#### Gebäudesimulation

VIKA Integral  
 Schurzelterstraße 27 - 52074 Aachen  
 Ansprechpartner: Herr Krämer

### **Projektentwicklung und -steuerung**

Hahn Helten Generalplaner  
 Schurzelterstraße 27 - 52074 Aachen  
 Ansprechpartner: Herr Helten

### **Lichtplanung**

Schneevoigt van Dyk  
 Ürdingerstraße 36 - 47441 Moers  
 Ansprechpartner: Herr Schneevoigt van Dyk

### **Technische Gebäudeausrüstung**

#### **Energiekonzept / Thermische Bauphysik**

VIKA Ingenieur GmbH  
 Schurzelterstraße 27 - 52074 Aachen  
 Ansprechpartner: Herr Dulle

### **Monitoring**

FH Köln – Fakultät für Architektur  
 Institut für Technik und Ökologie  
 Betzdorfer Str. 2 – 50679 Köln  
 Ansprechpartner: Herr Prof. Ranft  
 und Herr Repke

## 3.6 Wissenstransfer

Die Ergebnisse des F+E-Projektes wurden auf vielfältige Weise in die Lehre der Architekturfakultät der FH Köln integriert.

Mit den Studierenden des Diplomstudiengangs wurden mehrere Exkursionen, sowohl in der Bauphase als auch nach der Fertigstellung, zum BOB-Gebäude durchgeführt. Die planungsbeteiligten Ingenieure erläuterten jeweils das Projekt und seine Besonderheiten.

Diese Erkenntnisse flossen direkt in die Arbeit an zwei, jeweils einjährigen Vertiefungsentwürfen und zwei einsemestrigen Projektentwürfen ein. Darüber hinaus besuchten Studierende der Fächer „Technischer Ausbau“, „Ressourcenschonendes Bauen“ und „Tageslichttechnik“ das Gebäude.

Außerdem wurden die Erkenntnisse einem breiten Fachpublikum durch verschiedene Veröffentlichungen zugänglich gemacht. Neben den SolarBau-Projektdokumentationen waren dies vor allem zwei Buchveröffentlichungen (s. Kapitel 10).

Ca. 70 Exkursionen interessierter Bauherren und Investoren aus den Niederlanden, aus Belgien, Frankreich, Österreich, Schweiz, Spanien, Chile, Uganda, Kamerun und Taiwan wurde das Konzept ebenso erläutert. In Deutschland wurde das Projekt bei zahlreichen Messen und Vortragsveranstaltungen präsentiert.

## 4 Gebäudeplanung

### 4.1 Beschreibung des Gebäudes

Das Bürogebäude reduziert sich als kompakter Baukörper auf eine Grundfläche von 560 m<sup>2</sup>. Das Gebäude ist nicht unterkellert. Als Nutzfläche ergeben sich 2.076 m<sup>2</sup>, die auf vier Ebenen verteilt sind, sowie ein Bruttorauminhalt von 7.500 m<sup>3</sup>.

Das Gebäude wurde in Massivbauweise mit einem hohen Grad an Vorfertigung errichtet. Die Struktur des Stahlbeton-Skelettbau mit tragenden Beton-fertigteilfassaden und Innenstützen ermöglichte eine besonders kurze Bauzeit von neun Monaten. Die Verkleidung der Außenwand ist als wartungsfreie hinterlüftete Ziegelplatten-Fassade ausgeführt. Auf der Betonwand ist eine Dämmschicht aus Mineralwolle in einer Stärke von 20 cm angebracht. Die Fenster der Lochfassaden sind dreifachverglast und haben thermisch getrennte Aluminiumrahmen. Der Fensterflächenanteil beträgt 41 %. Die Flachdächer sind teilweise extensiv begrünt und im Bereich der Dachterrassen begehbar. Die Gefälledämmschicht ist 19 cm dick.

Die Materialien der Büroräume sind mit Sichtbetonoberflächen, unverkleideten Decken und teilweise Parkett schallhart. Nadelflies entschärft die Schallsituation allerdings in den meisten Büroräumen.

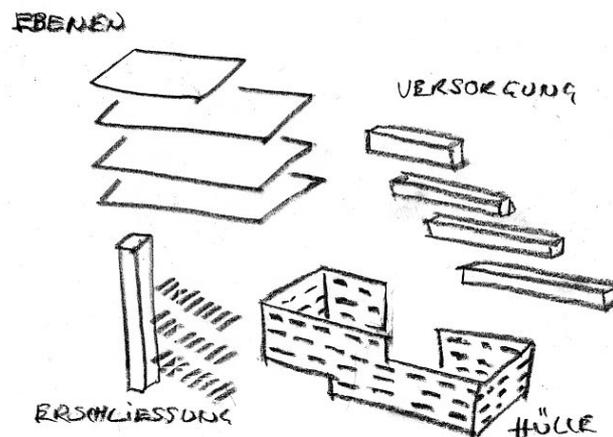


Abbildung 3 – Entwurf der Grundstruktur





Abbildung 5 - Nutzungsflexibilität durch Teilung der Geschosse EG bis 2.OG



Abbildung 6 - Staffelgeschoss und Dachterrasse

## 4.2.2 Ansichten



Abbildung 7 - Außenansichten BOB

## 4.2.3 Eingangsbereiche und Innenansicht





Abbildung 8 - Innenansichten

#### 4.2.4 Zahlen und Fakten

##### Baukörper

Geschosse	4
mittlere Raumhöhe (NRI/NGF)	2,70 m
A/V-Verhältnis	0,37 m <sup>-1</sup>
Fensterfläche Nord	47 %
Fensterfläche Süd	41 %
Fensterfläche West	37 %
Fensterfläche Ost	34 %

##### Flächen und Volumen, DIN 277

Volumen



Brutto Raum Inhalt	7.675 m <sup>3</sup>
--------------------	----------------------

Flächen



Netto Grund Fläche	2.151 m <sup>2</sup>
Haupt Nutz Fläche	1.535 m <sup>2</sup>

Die beheizte Fläche nach DIN 277 beträgt 2.076 m<sup>2</sup>, da gegenüber der Nettogrundfläche der überdachte Teil der Dachterrasse nicht zur beheizten Fläche gehört.

## Jahresheizwärmebedarf (Q<sub>h</sub>) nach WSVO '95

maximal zulässiger Q <sub>h</sub> /V	20,4 kWh/m <sup>3</sup> a
Q <sub>h</sub> /V vorhanden	12,6 kWh/m <sup>3</sup> a
Q <sub>h</sub> /A <sub>n</sub> vorhanden	39,4 kWh/m <sup>2</sup> a

### Nutzung

Nutzungszeiten	Mo-Fr 7-19 Uhr
Anzahl der NutzerInnen	90
Fertigstellung	2002

Tabella 4 - Tabellen mit Zahlen und Fakten zum Gebäude

## 4.3 Konzeption der Energieversorgung

### 4.3.1 Energiekonzept für das Gebäude

Das Gebäude ist in seinen Hauptbereichen in Anlehnung an die Passivhaus-Bauweise errichtet. Der Baukörper ist kompakt und erreicht ein A/V-Verhältnis von 0,37 m-1.

Der Heizwärmebedarf wird durch eine gut gedämmte Gebäudehülle minimiert. Mit 39,7 kWh/m<sup>2</sup> a liegt der nach WSchVO '95 berechnete Jahres-Heizwärmebedarf um fast 40% unter dem damals zulässigen Wert.

Bauteile	Dämmstärke cm	U-Wert W/m <sup>2</sup> K
Bodenplatte	12	0,27
Fassaden	20	0,17
Flachdach	19	0,18
Drei-Scheiben-Sonnenschutzglas		0,80
Verglasung im beheizten Treppenhaus		1,40

Tabella 5 - U-Werte der Bauteile des Gebäudes

Die Lüftungswärmeverluste werden durch eine luftdichte Gebäudehülle minimiert. Zur Qualitätssicherung wurde schon in der Bauphase ein Blower-Door Test vorgenommen.

Die Frischluftmenge ist auf 20 m<sup>3</sup>/h und Person ausgelegt. Die Auslegung der Frischluftmenge berücksichtigt einen Gleichzeitigkeitsfaktor von 50% für die Büronutzung durch die Mitarbeiter. Es wird nur die Luftmenge in das Gebäude transportiert und thermisch konditioniert, die aus hygienischen Gründen gebraucht wird.

### 4.3.2 Konzept Gebäudetechnik

Die Wärme- und Kälteversorgung erfolgt über oberflächennahe Geothermie. Über eine Wärmepumpe wird im Winter die notwendige Systemtemperatur für das Heizsystems erreicht. Als einziges Wärmeübertragungssystem dient eine Betonkernaktivierung (BKT). Diese benötigt gegenüber herkömmlichen Heiz- bzw. Kühlverteilsystemen nur niedrige Systemtemperaturen, da sowohl Decke als auch Boden als aktive Flächen zur Verfügung

stehen. Auf das Abhängen von Decken wurde in den Büros verzichtet, da sonst die Funktion der BKT stark eingeschränkt wird. In der Mittelzone ist hingegen eine Abhängung der Decke möglich, da die Kühl- und Heizenergieanforderungen deutlich geringer sind.

Aufgrund des sehr kleinen Leistungsbedarfs kam als Wärmepumpe nur der Einsatz einer elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpe in Frage, so dass BOB nur elektrische Energie benötigt.

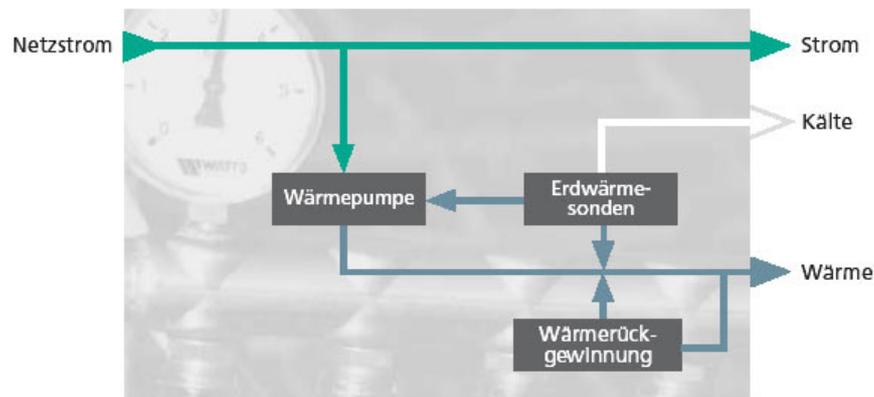


Abbildung 9 - Energieflussbild

28 Bohrungen mit einer Tiefe von 42 m versorgen das Gebäude im Heizfall mit vorgewärmtem Wasser, welches der Wärmepumpe zugeführt wird. Im Kühlfall wird das kühle Erdreich direkt zur Kühlung des Gebäudes genutzt. Wasser wird in die Erdsonden nach unten gepumpt, kühlt sich dort ab und wird wieder nach oben in den Kühlkreislauf gegeben.

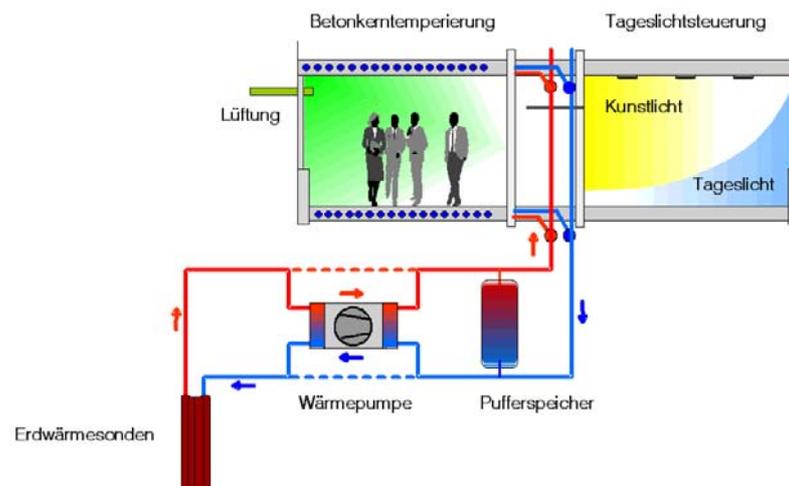


Abbildung 10 - System aus Erdsonde, Wärmepumpe und BKT

Die Wärmepumpe beschickt einen 900 Liter großen Pufferspeicher, der das häufige An- und Abschalten (Takten) der Wärmepumpe vermeiden soll.

Das Brauchwarmwasser wird dezentral, je Nutzungseinheit und für eine Gemeinschaftsdusche im Erdgeschoss über elektronische Durchlauferhitzer erwärmt. Diese primär-energetisch schlechte Form der Warmwasserbereitung kann in Anbetracht des geringen Warmwasserbedarfs in Kauf genommen werden. In den Toiletten gibt es keinen Warmwasseranschluss.

Je Etage wurde eine eigene Zu- und Abluftanlagen mit einer Wärmerückgewinnung realisiert. Auf diese Weise kann jede Anlage im optimalen Betriebspunkt betrieben und der jeweiligen Nutzungszeit der Etage durch Zeitschaltuhr angepasst werden. Über einen zusätzlichen Luft/Wasser-Wärmetauscher kann der Wasserkreislauf der Erdwärmesonden auch zum Kühlen und Heizen der Zuluft eingesetzt. Im Betrieb wurde jedoch die Erfahrung gemacht, dass auf eine Konditionierung der Luft verzichtet werden kann. Dies hat mehrere Gründe. Die Wärmerückgewinnung ist zum einen so effektiv, dass die Luft vorgeheizt und vorgekühlt wird. Die Führung der Lüftungskanäle durch den beheizten oder gekühlten Betonkern dient dabei als weitere Wärmerückgewinnung. Zum anderen ist die zugeführte Luft- und damit die Wärme-, Kältemenge so gering, dass eine Konditionierung im Zusammenhang mit dem hohen Strahlungsanteil der BKT nicht wahrgenommen wird.

Die Zuluft wird in den Büros eingebracht, während die Abluft in der Mittelzone abgesaugt wird.

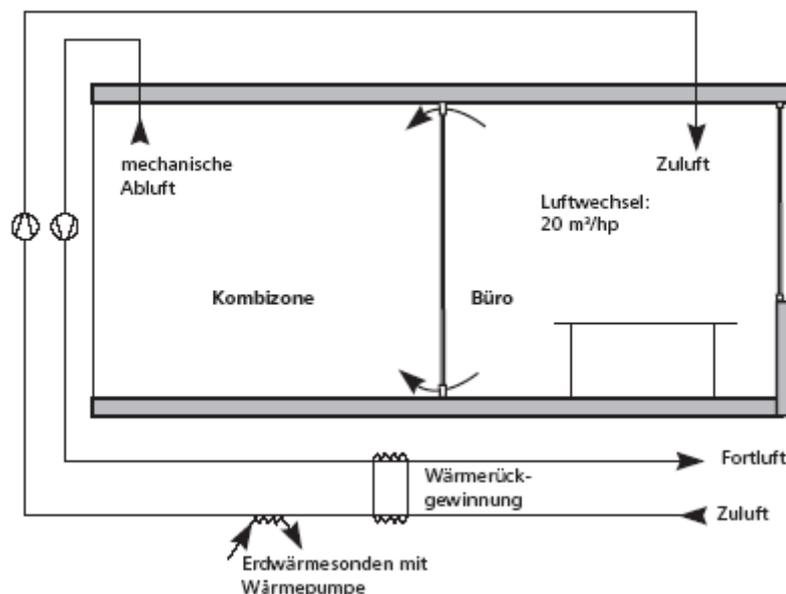


Abbildung 11 - Lüftungskonzept

### 4.3.3 Tageslichtnutzung und Kunstlichtkonzept

Das Tageslicht wird über lichtlenkende Lamellen der Jalousien sowie über die weißen Wände und Decken in die Mittelzone gelenkt. Die Arbeitsbereiche sind überwiegend durch Glas von den Nebenflächen in der Mittelzone getrennt. Da in den Mittelzonen keine ständigen Arbeitsplätze vorgesehen sind, ist dort die Notwendigkeit bzw. der Anspruch an die Qualität der Beleuchtung geringer. Das bedeutet für etwaige Abstellflächen, Archive oder Serverräume ist selten eine Beleuchtung notwendig oder das Tageslicht reicht vielfach auch in diesen Bereichen in der Mittelzone aus.



Abbildung 12 - Beispielfhafte Darstellung des Tageslichteinfalls

Reicht das Tageslicht zur Belichtung in der Mittelzone oder den Bürozonon nicht aus, so wird das Kunstlicht eingeschaltet. Die Beleuchtung schalten die Nutzer über Taster ein. Eine Dimmung der Beleuchtungseinrichtung ist möglich. Für die Kunstlichtbeleuchtung wurde eine spezielle Leuchte entwickelt, die es erlaubt, den direkten und den indirekten Strahlungsanteil getrennt zu regeln und so den persönlichen Bedürfnissen anzupassen. Je nach Helligkeit, die über Außensensoren gemessen wird, wird das Kunstlicht automatisch gedimmt.

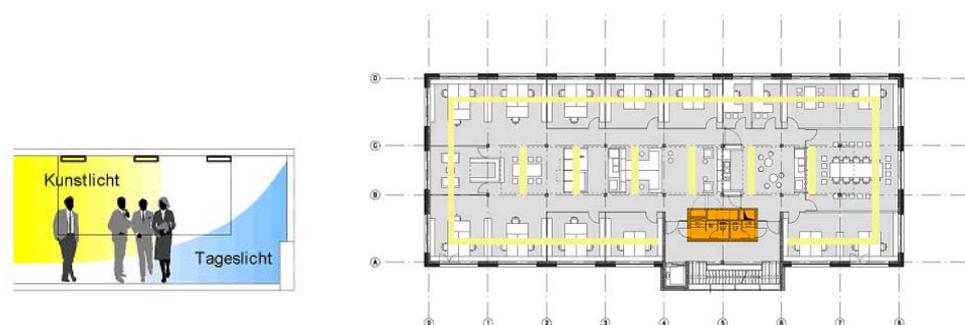


Abbildung 13 - Kunstlichtkonzept

Die Schalter für die individuelle Bedienung der Beleuchtung befinden sich auf den Schreibtischen. Alle Schalter sind in die Gebäudeleittechnik integriert.

In Räumen ohne Tageslicht, wie den Toiletten, wird das Licht über einen Anwesenheitssensor gesteuert.

### 4.3.4 Gebäudeleittechnik

Über eine zentrale Gebäudeleittechnik (GLT) können die verschiedenen technischen Einrichtungen gesteuert werden. Dazu gibt die GLT ständig Auskunft über die vorherrschenden Anlagenzustände. Voraussetzung dafür ist, dass die technischen Anlagen über entsprechende Schnittstellen verfügen.

Bei BOB erfolgt die Ansteuerung der Pumpen, der Beleuchtungseinrichtungen, der Ventilatoren etc. über ein Bussystem auf Basis des LON-Protokolls.

Sämtliche Messkomponenten, wie Temperaturdaten, Energiedaten, Luftqualität, Bewegungsmelder etc. sind auf den Gebäudebus aufgeschaltet.

Der zentrale Rechner dient somit gleichzeitig zur Erfassung der Messwerte für die Gebäudemonitoring (Abbildung 14). Die Messdaten werden als Stundenwert erfasst und sind im ASCII-Format verfügbar. Aus den Messwerten und bekannten Anlagenparametern werden weitere Größen ermittelt. Die Auswertung bzw. Plausibilisierung der Daten (Kennzahlbildung, statistische Auswertungen, etc.) sowie deren Darstellung erfolgt mit Hilfe externer Software.

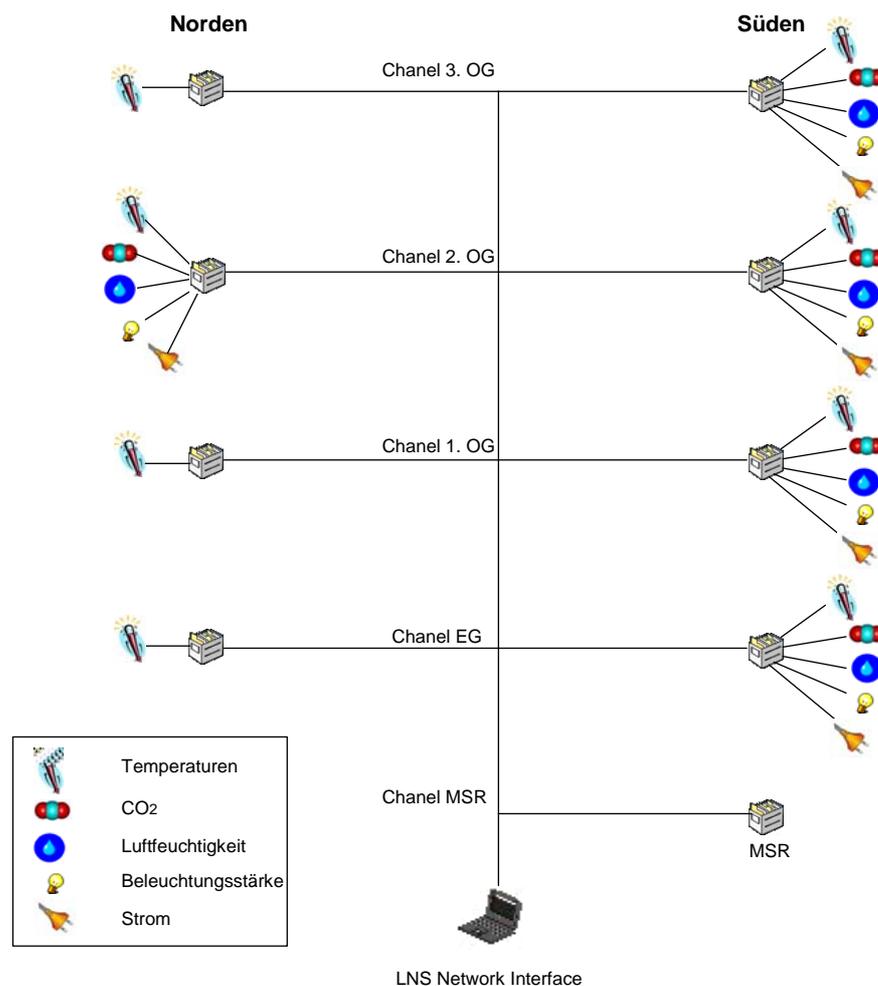


Abbildung 14 - Messwerterfassung mit der GLT

Zur Überprüfung der Messtechnik wird zusätzlich eine Handliste geführt. Die Ablesung, insbesondere der Energieverbrauchswerte, erfolgt einmal pro Woche.

Die GLT ist mit der Sicherheitstechnik des Gebäudes verbunden. Beispielsweise wird bei unbefugtem Betreten einer Nutzungseinheit neben einer Sirene auch die komplette Beleuchtung eingeschaltet.

Da von der zentralen Leittechnik aus der Schritt bis ins Internet klein ist, wurde auch diese Möglichkeit umgesetzt. So kann von jedem Internetarbeitsplatz aus - intern oder extern - das Gebäude beobachtet und gesteuert werden. Dies gilt für die Wärmepumpe und die Regelungstechnik genauso wie für die Beleuchtungsanlage.

Für die Optimierung während des Betriebs ist die Zugriffsmöglichkeit auf die Regelparameter wichtig, da der Planer Anpassungen ohne Hilfe eines Dritten selbständig ausführen kann.

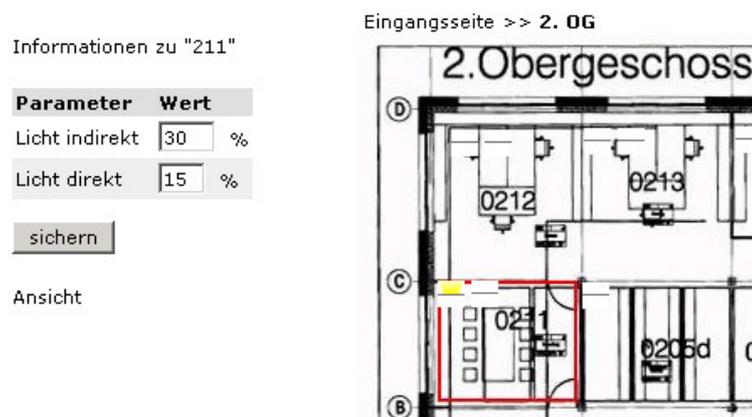


Abbildung 15 - Ausschnitt der Eingabefeldern über die GLT am Beispiel der Beleuchtung

### 4.3.5 Regenwassernutzung

Das anfallende Regenwasser wird gesammelt und in eine Zisterne unterhalb des Parkplatzes geleitet. Von dort aus wird es zur Bewässerung der Dachterrasse und der WCs genutzt.

Da die Außenanlagen so angelegt sind, dass die Bepflanzung nicht gegossen werden muss, ist kein Außenanschluss für eine Regenwassernutzung vorgesehen. Die Regenwasseranlage mit Pumpen für die Verteilung des Regenwassers befindet sich im Hausanschlussraum.



Abbildung 16 - Regenwasseranlage

## 4.4 Simulation

Mit Hilfe der Gebäudesimulation ist es möglich, das thermische Verhalten eines Gebäudes unter Berücksichtigung der äußeren Einflüsse und inneren Lasten detailliert zu untersuchen.

Die dynamische Gebäudesimulation ist ein Werkzeug zur Bestimmung von Leistungs- und Energiebedarfsdaten sowie zur Auslegung von technischen Anlagen für die Klimatisierung von Gebäuden. Die durch die Simulation gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis für Wirtschaftlichkeitsanalysen und zur Optimierung der Gebäudestruktur, des Materialeinsatzes sowie der Anlagentechnik.

Darüber hinaus liefert die Gebäudesimulation detaillierte Kenntnisse über das thermische Verhalten der unterschiedlichen Räume in einem Gebäude. Es lassen sich beispielsweise Raumtemperaturen im Tagesverlauf darstellen. Dadurch können sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen über das zu erwartende Raumklima gemacht werden.

Im Planungsprozess wurden alle Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs oder zur Beeinflussung des Raumklimas in Varianten berücksichtigt und bewertet. Die Ergebnisse wurden allen Planern zur Verfügung gestellt, damit sie ihrerseits schnell entsprechende Änderungen einfließen lassen konnten.

Damit standen den Bauherren und allen Planungsbeteiligten zu jeder Zeit die Grundlagen ihrer Entscheidung zur Verfügung.

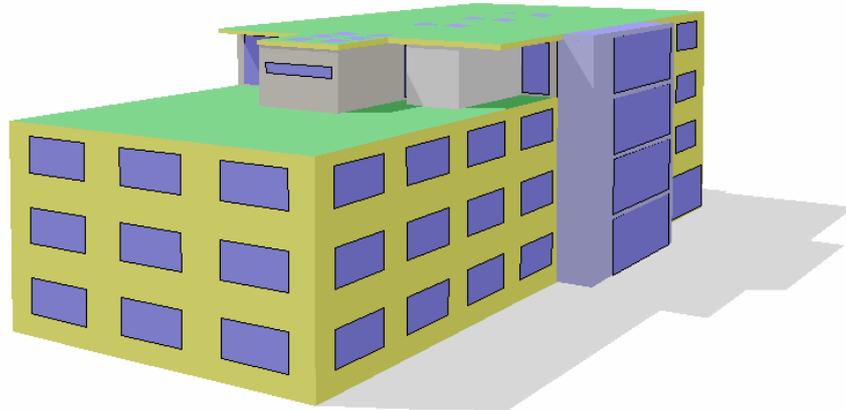


Abbildung 17 - Darstellung des Berechnungsmodells mit Schattendarstellung (Sommertag 12<sup>00</sup> Uhr)

#### 4.4.1 Gebäudesimulationsprogramm

Das dynamische Gebäudesimulationsprogramm TAS 8.5<sup>1</sup> (Thermal Analysis Software) der britischen Environmental Design Solutions Ltd. weist einen hohen Bedienkomfort auf und ermöglicht eine schnelle Ergebnisfindung.

Die Geometrie des Berechnungsmodells wird über eine einfache graphische Benutzeroberfläche eingegeben. Dabei ist das Einlesen über eine entsprechende Schnittstelle zu dem bekannten dxf-file schnell möglich und kann mittels einfachen CAD Befehlen den entsprechenden Untersuchungen angepasst werden. Im Anschluss zur 3d-Eingabe findet eine Schattenberechnung für jede einzelne Stunde des Jahres unter Berücksichtigung der Eigen- und Fremdverschattung statt.

Im nächsten Schritt wird die Eingabe aller gebäuderelevanten Daten, wie z.B. die Baukonstruktionen, die Nutzung des Gebäudes sowie die Wetterdaten für den Gebäudestandort über vorhandene Datenbanken durchgeführt.

---

<sup>1</sup> TAS, Version 8.50, EDSL Ltd., Milton Keynes, England – Verifiziert im Rahmen der VDI Richtlinie 6020 (Anforderungen an Rechenverfahren für die Gebäude- und Anlagensimulation)

Abschließend wird die Anlagentechnik zum Lüften und Klimatisieren abgebildet und deren Leistungsdaten bestimmt. Weiterhin lassen sich die Freie Lüftung aber auch mechanische Lüftungsanlagen detailliert abbilden.

#### 4.4.2 Variantenbeschreibung

Das Berechnungsmodell für die Gebäudesimulation wurde im Verlauf der Planung um die neuen Erkenntnisse und Entscheidungen der Planer und Bauherren weiter entwickelt.

Für die Entscheidung über unterschiedliche Fassadensysteme und den Einsatz differenzierter Technik wurden folgende Randbedingungen der Berechnungsmodelle zu Grunde gelegt:

- äußere Klimabedingungen wurden durch folgenden, dem Standort Aachen ähnlichsten, Wetterdatensatz berücksichtigt: TRY Nr. 02 „Ruhrgebiet und weitere Ballungsgebiete des Flachlandes - Essen Mühlheim“
- Geometrie und Raumaufteilung nach Plänen der Architekten und Statiker
- Innere Lasten durch Personen, Geräte sowie Beleuchtung wurden durch die Bauherren bzw. den Lichtplaner festgelegt
- Baukonstruktionen nach Angaben des Statikers und nach Wärmeschutznachweis zum damaligen Stand der Planung

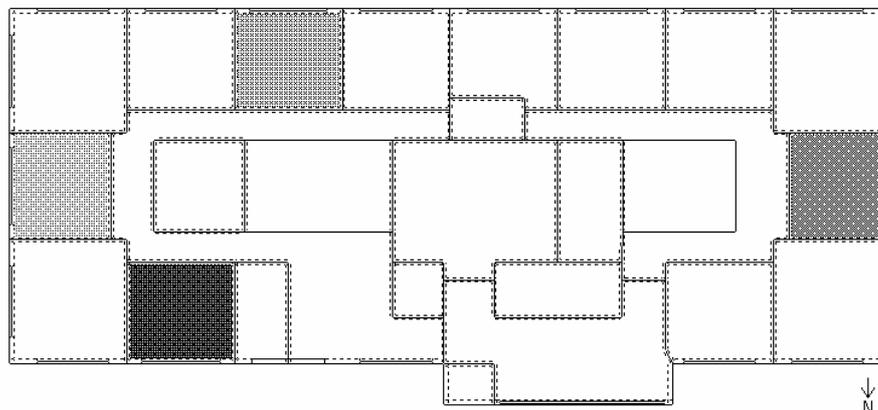


Abbildung 18 - Grundriss für die Simulationsberechnungen zum Zeitpunkt der Planung

#### Innere Lasten

- |                     |   |
|---------------------|---|
| • Nutzungszeit      | 8 <sup>00</sup> - 18 <sup>00</sup> Mo. bis Fr.<br>1h Mittag (keine Nutzung) |
| • Personen          | 8 – 10 m <sup>2</sup> je Person<br>≈ 9 – 7 Wtr/m <sup>2</sup>               |
| • Beleuchtung       | 15 W/m <sup>2</sup> (nur im Winter)   |
| • PC, Monitor, etc. | 15 – 20 W/m <sup>2</sup>  |

## Lüftungsanlage

- Betriebszeit 6°° - 18°° Mo. bis Fr.
- Frischluftwechsel 20 m<sup>3</sup>/h Arbeitsplatz
- Volumenstrom gesamt 6.000 m<sup>3</sup>
- Wärmerückgewinnung 75 %
- Infiltration (Gebäude) 0,20 1/h

Bewertet wurden die Ergebnisse der Varianten nach dem Energiebedarf für Heizung und Kühlung des Gebäudes sowie nach der Qualität der Raumtemperaturen (maximaler Tagesverlauf) und deren Häufigkeit (Anzahl der Stunden mit Überhitzungen).

Folgende Varianten wurden unter anderen untersucht und nach dem Einfluss auf das Raumklima und auf den Energiebedarf hin bewertet.

1. Unterschiedlicher Glasflächenanteil
2. Äußere und Innere Verschattung
3. Glasqualität
4. Einfluss der Speichermasse
5. Einsatz eines Lufterdwärmetauschers
6. Auswirkung von Flächenheizung bzw. Kühlung
7. Tageslichtnutzung

Im Folgenden werden einige der Varianten exemplarisch beschrieben.

### 4.4.2.1 Variante – Glasflächenanteil

Zu Anfang des Projektes stellte sich, wie häufig bei energetisch optimierten Gebäuden, die Frage nach dem richtigen Verhältnis von Verglasung zur restlichen opaken Fassade. Es muss zwischen unerwünschten Energieverlusten im Winter und zum Teil erheblichen Wärmegewinnen im Sommer abgewogen werden. Der aus einer solchen Situation resultierende Energiebedarf für den Heiz- und Kühlfall wurde in dieser Variante untersucht.

Dazu wurde im Simulationsmodell eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung (SSV 66/38) mit einem g-Wert von 38% ohne Verschattung angenommen, da eine schlechte Verglasung – als die später gewählte – die gewünschten Effekte deutlicher ausweist. Der Glasflächenanteil wurde zwischen 25% (3,3m<sup>2</sup>) und 75 % (10,0m<sup>2</sup>) je Fassadenraster variiert. Die opake Fassade bestand aus einem Betonfertigteile (200mm) und einer Wärmedämmung (WLG 040) von 120mm. Die Wetterschutzschicht bildete eine entsprechende Aluminiumfassade.

#### Ergebnis:

Da die internen Wärmegewinne bei einem Bürogebäude einen nicht zu vernachlässigenden Anteil zur Wärmebilanz beitragen, ist der Einfluss des Glasflächenanteils auf den

Heizwärmebedarf relativ gering. Im Vergleich zum geringsten Glasflächenanteil von 25% werden durch die Südfenster Energiegewinne in der Größenordnung von 3% (mit 50% Flächenanteil) bzw. 4,2% (75% Flächenanteil) erreicht. Im Jahresverlauf und über alle Himmelsrichtungen liegt der Unterschied bei weniger als 0,6%.

Im Sommerfall weisen selbstverständlich die geringsten Glasflächenanteile den niedrigsten Kühlenergiebedarf auf. Erhöht man den Glasflächenanteil von 25% auf 75% ist die Auswirkung auf den Kühlenergiebedarf erheblich. Dieser verdoppelt sich. Sogar auf der Nordseite bewirkt eine Erhöhung des Glasflächenanteils durch die diffuse Strahlung einen Zuwachs des Energieeintrages von bis zu 67%. Im Jahresverlauf und über alle Himmelsrichtungen nimmt der Kühlenergiebedarf um 79% zu.

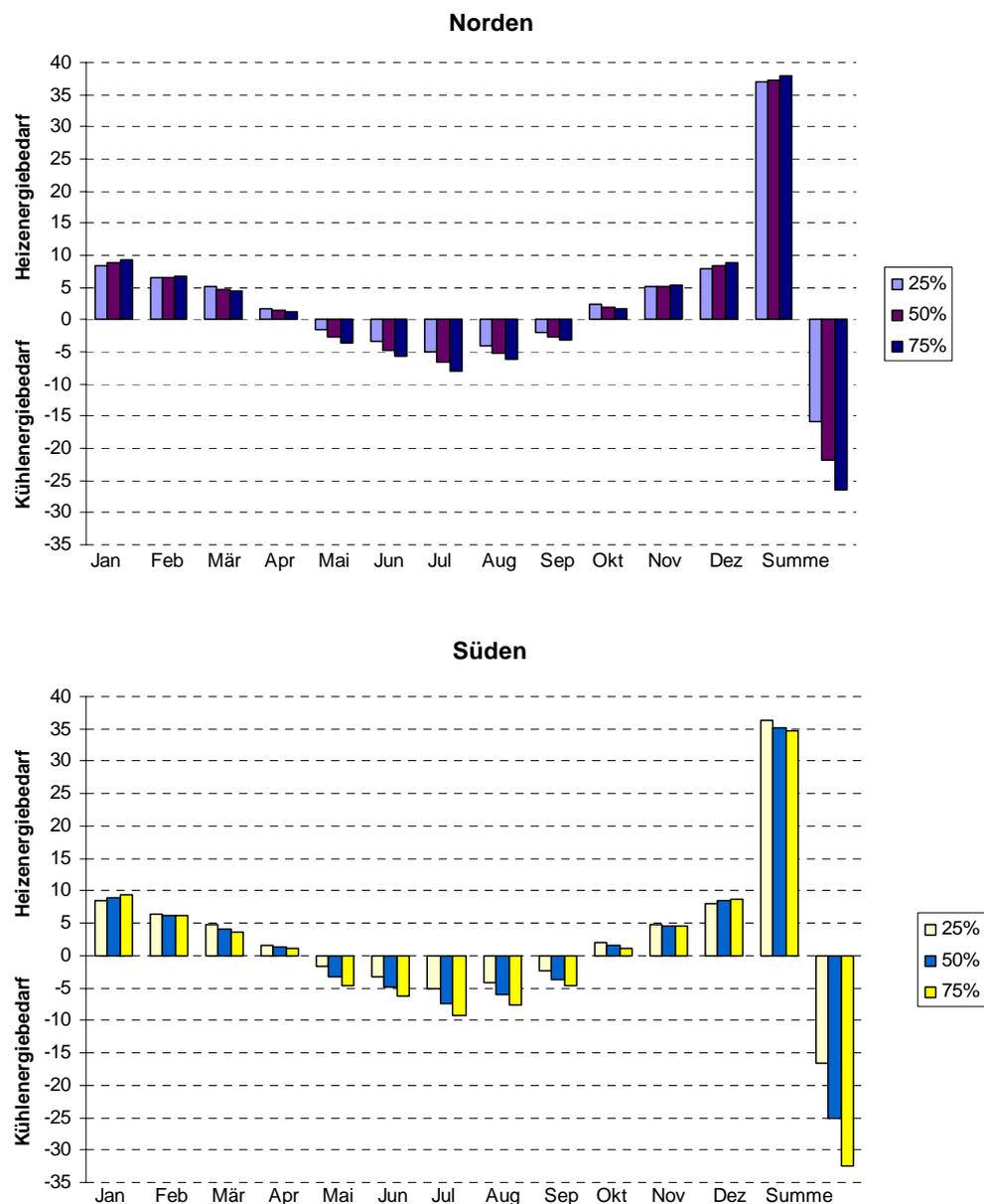


Abbildung 19 – Kühl- und Heizenergiebedarf bei unterschiedlichem Glasflächenanteil

Daher bestimmt der Kühlenergiebedarf über die Wahl des Verglasungsanteils. Allerdings ist bei der Nutzung der Geothermie und der Erdkälte die Kühlenergie ökologisch und ökonomisch sehr günstig, so dass bei BOB nicht der Kühlenergiebedarf, sondern die Behaglichkeit über den Glasflächenanteil mitbestimmt.

#### 4.4.2.2 Variante - Verschattung

Neben dem Glasflächenanteil hat auch die Art der Verschattung von Fenstern und Verglasung einen nicht unerheblichen Einfluss auf das spätere energetische Verhalten des Gebäudes. Wie bei dem Beispiel zuvor wollte man ein Optimum zwischen energetischen Maßnahmen und gestalterischer Ausgewogenheit finden. Dazu wurden zu dem bereits beschriebenen Modellgebäude folgende Verschattungsvarianten untersucht:

1. Sonnenschutzverglasung (SSV) 66/38 mit einer innen liegenden hochwertigen Verschattung mit großem Reflektionsvermögen
2. Sonnenschutzverglasung SSV 66/38 mit einer normalen außen liegenden Jalousie
3. Wärmeschutzverglasung WSV 75/57 mit einer normalen außen liegenden Jalousie

Der Fensterflächenanteil in dieser Simulation beträgt jeweils 33%.

#### Ergebnis:

Die solaren Einstrahlungen bestimmen, neben den internen Lasten, in erheblichem Maß den Kühlenergiebedarf des Gebäudes. Bei Verwendung einer Wärmeschutzverglasung ohne Sonnenschutzmaßnahmen beträgt der Jahres-Kühlenergiebedarf für z.B. einen Südraum 31 kWh/m<sup>2</sup>a. Für einen Nordraum immerhin noch 25 kWh/m<sup>2</sup>a.

Bereits die SSV sorgt dafür, dass der Jahres-Kühlenergiebedarf um 33% gesenkt wird. Mit einem zusätzlichen inneren Sonnenschutz wird eine Reduzierung auf knapp 17 kWh/m<sup>2</sup>a erreicht. Ein außen liegender Sonnenschutz in Form einer Jalousie würde den Jahres-Kühlenergiebedarf auf weniger als 10 kWh/m<sup>2</sup>a reduzieren. Das entspricht einer Verringerung um 70% bzw. 53% im Vergleich zu einer nicht verschatteten Wärmeschutz- bzw. Sonnenschutzverglasung.

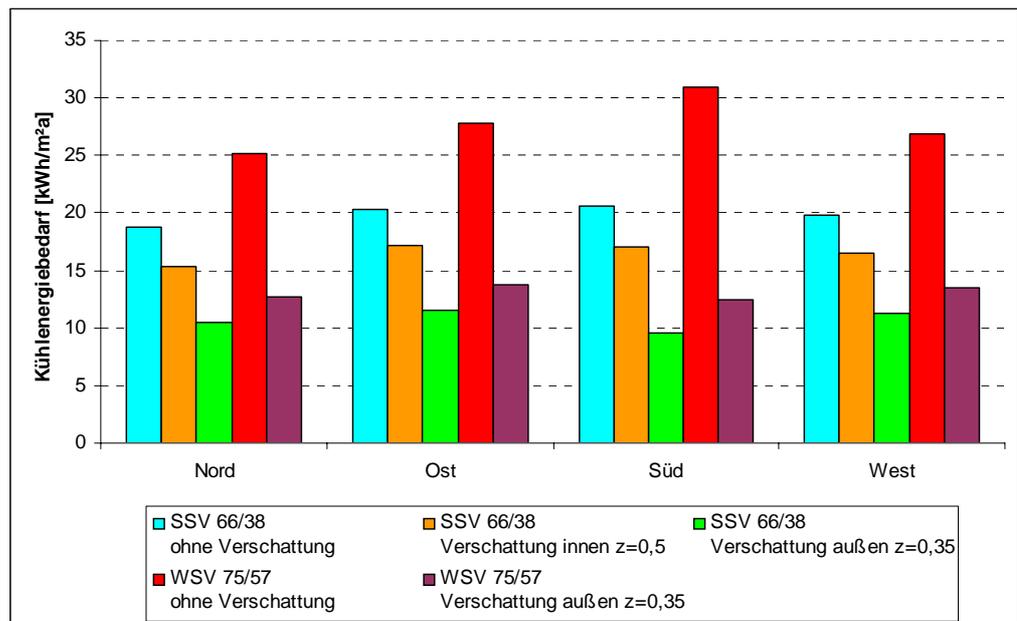


Abbildung 20 - Kühlenergiebedarf bei unterschiedlichem Einsatz von Verschattungen

#### 4.4.2.3 Variante – Speichermasse

Zur Untersuchung der Speichermasse wurde ein Modell erstellt, das flexible Raumgestaltung durch Leichtbauwände zulässt und bei dem die Geschossdecke sichtbar bleibt. Das bekannte Rechenmodell wurde mit einer unverschatteten SSV 66/38, mit einer Betondecke von 200 mm Stärke und einfach beplankten Innenwände berechnet. Den Ergebnissen wurde ein Modell mit abgehängter Decke gegenüber gestellt.

##### Ergebnis:

Der Jahresheizenergiebedarf der Räume mit abgehängener und damit nicht thermisch wirksamer Betondecke ist um 17% (Nordraum) bzw. 20% (Süd-raum) geringer als in Räumen mit einer nicht thermisch abgekoppelten Betondecke. Die nächtliche Auskühlung sowie das morgendliche Anheizverhalten sind hierfür die Gründe.

Im Kühlfall zeigt sich die zugängliche Betondecke als energetisch sinnvollere Variante. Im Südraum ergibt sich z.B. ein um 8% niedriger Kühlenergiebedarf gegenüber einer abgehängenen Decke. Richtig deutlich wird der Einfluss im Frühjahr und Herbst, da hier die Sonne tiefer in das Gebäude scheint und die ausgleichende Wirkung der Betondecke besonders wertvoll ist.

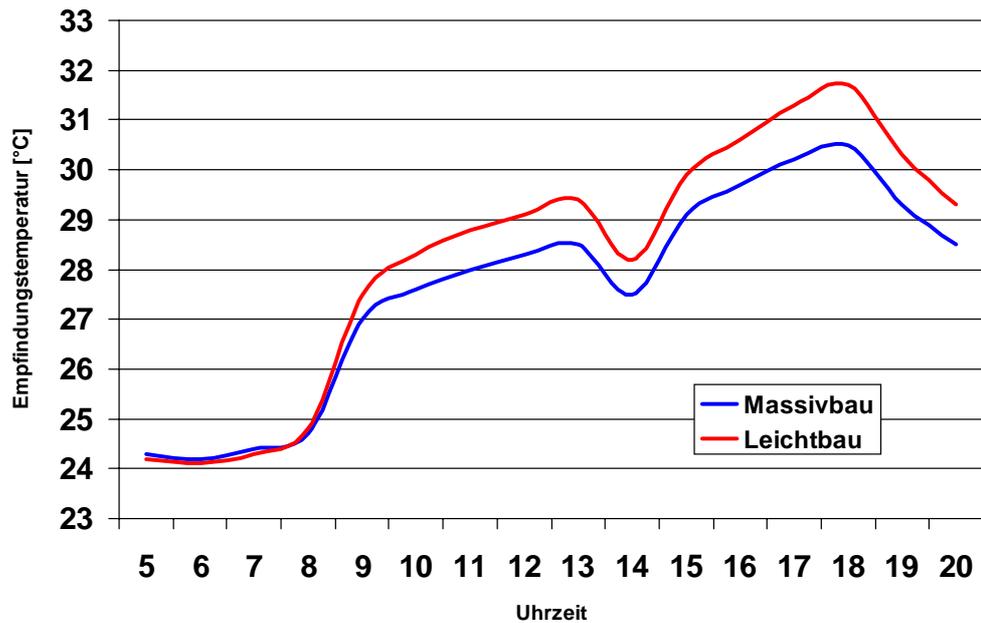


Abbildung 21 - Einfluss der Speichermasse auf die Empfindungstemperatur

#### 4.4.2.4 Variante – Flächenheizung bzw. Kühlung

Mit Hinblick auf die im Solarbau-Projekt geforderten Randbedingungen für einen niedrigen Primärenergiebedarf, boten sich Flächenheiz- bzw. Kühlsysteme an. Diese können mit geringen Über- und Untertemperaturen betrieben werden und so für ein angenehmes Temperaturklima sorgen. In der Simulation wurden folgende Systeme verglichen und auf ihre Behaglichkeit hin untersucht:

- Fußbodenheizung – bzw. Kühlung
- Deckenheizung – bzw. Kühlung
- Kombination der o.g. Systeme
- Radiatorheizung – bzw. Kühlung

Das Simulationsmodell beinhaltete eine innen liegende Verschattung.

#### Ergebnis:

Die Ergebnisse der Simulation zeigten, dass die Betonkerntemperatur und alle weiteren Flächenkühlsysteme dem Radiator weit überlegen sind. Die BKT weist mit zwei aktiven Flächen über den ganzen Tag eine um 1K geringere Empfindungstemperatur auf. Ab 18 Uhr wird die Verschattung geöffnet, so dass hier die Temperaturen sprunghaft ansteigen.

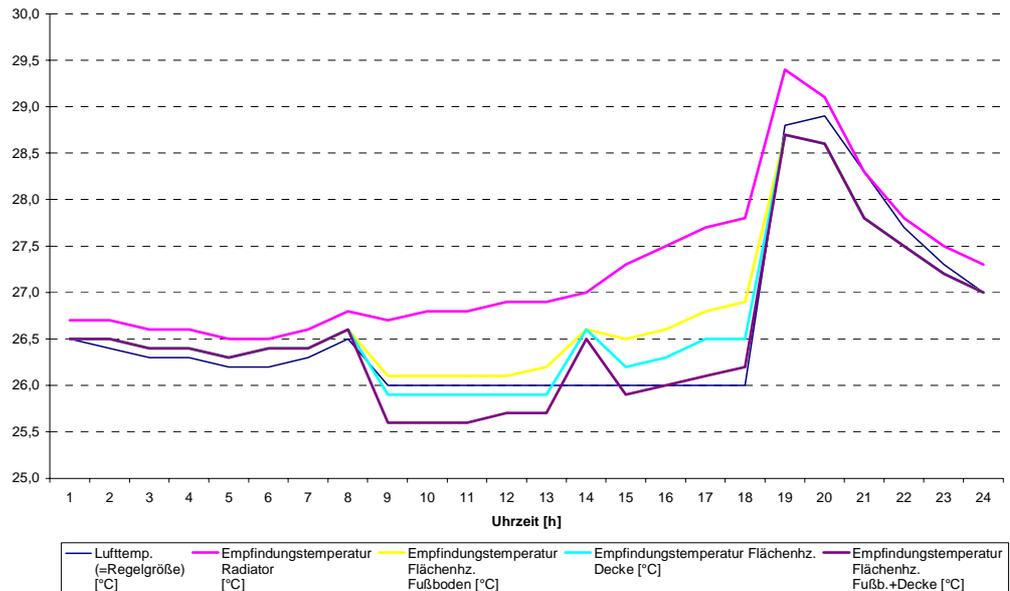


Abbildung 22 - Tagesverlaufes der Empfindungstemperaturen von Heizkörper und Flächentemperierung (Kühlfall) im Hochsommer

Beim Heizfall erzeugte die Betonkerntemperierung die höchste Empfindungstemperatur, gefolgt von den Einzelsystemen Deckenflächen- und Fußbodenheizung und schließlich dem Radiator. Der Radiator muss zur Erreichung derselben Empfindungstemperatur die Raumlufttemperatur entsprechend anheben. Dies ist mit einem höheren Energieverbrauch verbunden.

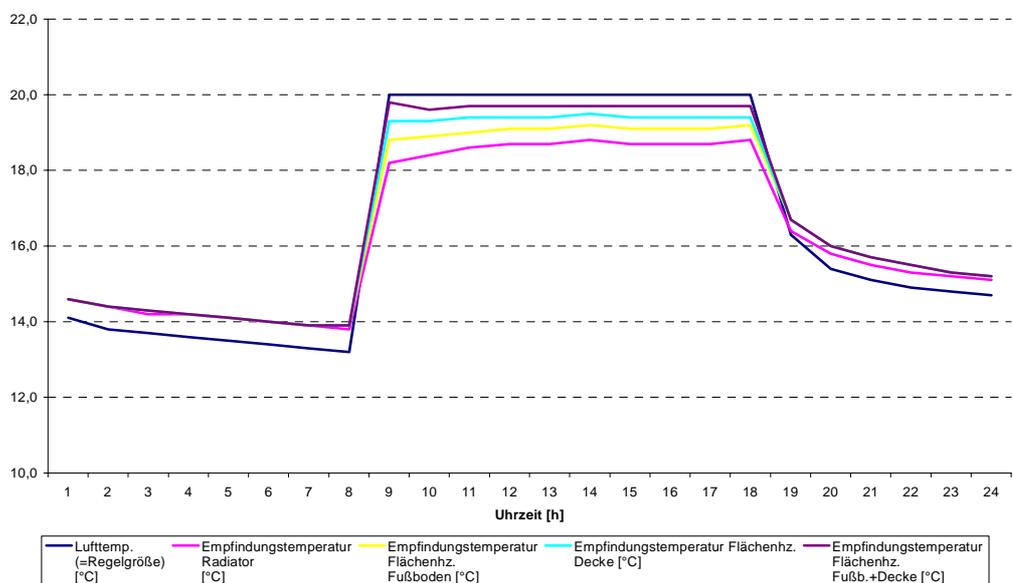


Abbildung 23 - Tagesverlaufes der Empfindungstemperaturen von Heizkörper und Flächentemperierung (Heizfall)

#### 4.4.2.5 Abschlussvariante

Die Erkenntnisse aus allen Varianten, sowie die entsprechenden Entscheidungen der Planer, wurden zum Ende der Planung in ein optimiertes Abschlussmodell vereint.

Die Regelfassade wurde mit einem Fensterflächenanteil von 41% ausgeführt. Der Sonnenschutz wurde durch eine hochwertige innen liegende Verschattung, die gleichzeitig als Blendschutz dient, berücksichtigt.

Da man eine flexible Nutzung der Etagen erhalten wollte, setzte man auf Leitbauweise der Innenwände. Dies beinhaltet Leichtbauständerwände und Glaswände zur Abtrennung der einzelnen Büroräume. Eine Abhängung der Decken oder ein aufgeständerter Fußboden wurden nicht ausgeführt um diese Speichermassen uneingeschränkt nutzen zu können.

Da man eine flexible Nutzung der Etagen erhalten wollte, setzte man auf Leitbauweise der Innenwände. Dies beinhaltet Leichtbauständerwände und Glaswände zur Abtrennung der einzelnen Büroräume. Eine Abhängung der Decken oder ein aufgeständerter Fußboden wurden nicht ausgeführt um diese Speichermassen uneingeschränkt nutzen zu können.

Damit die o.g. Rahmenbedingungen auch zu einem optimalen Ergebnis bzgl. thermischer Behaglichkeit und niedrigem Energiebedarf führen, wurde die Gebäudehülle mit folgenden Qualitäten bemessen:

Fenster	Dreischeibenverglasung, $U_g = 0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$ g-Wert = 0,50 und t-Wert = 0,69
Rahmen	Aluminium $U_f = 1,50 \text{ W/m}^2\text{K}$
Verschattung	hochwertiger Blendschutz innen liegend $f_c = 0,3$ Regel-Fassade außen liegend $f_c = 0,3$ bodentiefe Fenster
Verglasung Treppenhaus	Zweischeiben Isolierverglasung $U_g = 1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ g-Wert = 0,63 und t-Wert = 0,77 keine Verschattung
Fassade	hinterlüftete Aluminium-Fassade $U_{AW} = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ 200 mm Dämmung WLG 035 200 mm Beton
Bodenplatte	$U_{Fb} = 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ 400 mm Beton 120 mm Dämmung WLG 040
Dach	begrüntes Flachdach $U_{Da} = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ Ø 190 mm Dämmung WLG 040 220 mm Beton

*Tabelle 6 - Gebäudehülle der Endvariante zum Zeitpunkt des Planungsabschlusses*

#### Ergebnis:

Bei geschlossenem Blendschutz weisen die Empfindungstemperaturen im Sommer für die Büroräume keine Temperaturen über 26°C auf.

Die nachfolgende Grafik zeigt für 4 exemplarische Büros den Tagesverlauf der Temperaturen an einem heißen Sommertag im August. Der „Knick“ im Verlauf der Temperaturkurve zeigt die Mittagszeit in der keine inneren Wärmelasten auftreten.

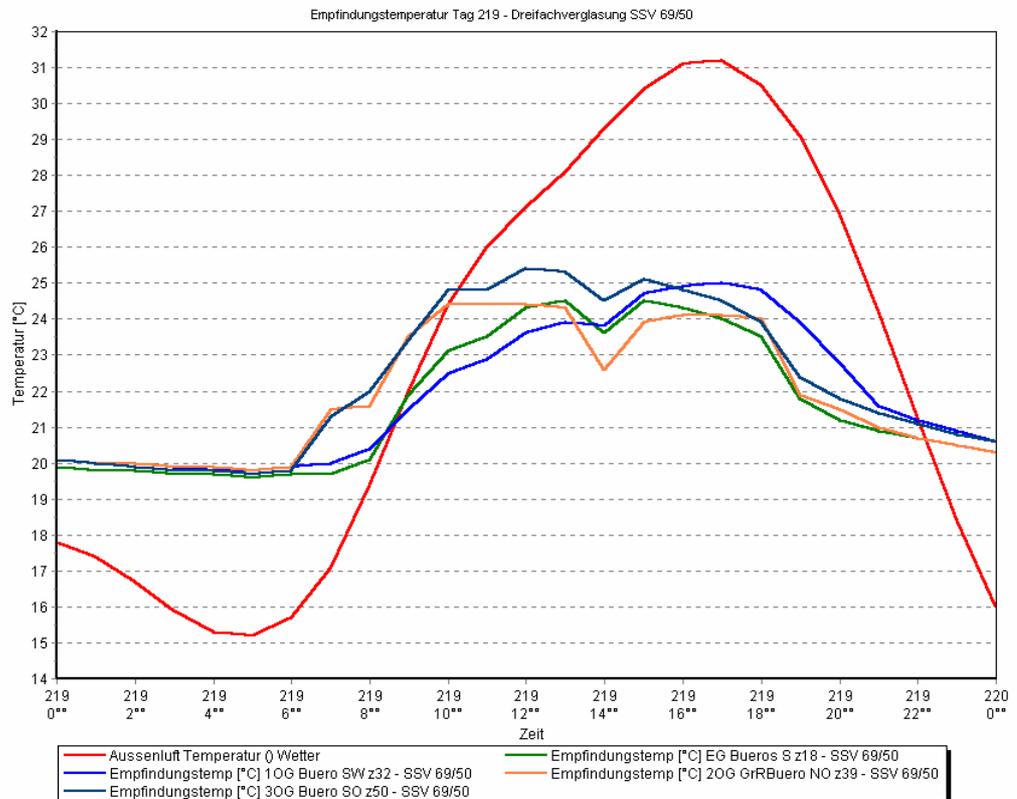


Abbildung 24 - Tagesverlauf der Empfindungstemperaturen an einem heißen Sommertag im August

#### 4.5 Investitionskosten

Besonders im Hinblick auf die aktuelle Kostenentwicklung am Energiemarkt und in der Erwartung weiter steigender Energiepreise nehmen die Kosten für die Energieversorgung eines Gebäudes einen höheren Stellenwert. Im Folgenden werden die Kosten für den Wärmeschutz sowie die technischen Anlagen in % von der Gesamtbausumme und als spezifischer Kennwert je m<sup>2</sup> der Nettogrundfläche angegeben.

An Investitionskosten für den Wärmeschutz sind anzusetzen:

Aufschlüsselung KG 38000	Anteil [%]	Spezifischer Wert [€/m <sup>2</sup> ]
Wärmeschutz - Summe der Maßnahmen	3,3 %	44,56
- Wanddämmung	0,6 %	8,20
- Dachdämmung	0,5 %	7,10
- Dämmung der Bodenplatte	0,6 %	8,00
- Drei-Scheiben-Sonnenschutzglas	1,6 %	21,30

Tabelle 7 - Kostenanteile für den Wärmeschutz in Kostengruppe 38000

Weiter sind die Investitionskosten für die technischen Anlagen dargestellt, welche etwa  $\frac{1}{4}$  der Gesamtbaukosten betragen. Dabei ergibt sich für die Wärme-/Kälteversorgung inkl. der Erdwärmesonde ein Kostenanteil von 9,5%.

Aufschlüsselung KG 400	Anteil [%]	Spezifischer Wert [€/m <sup>2</sup> ]
Technische Anlagen - gesamt	24,9%	355,0
- Abwasser-/Wasseranlagen	2,2%	31,5
- Wärmeversorgung	6,1%	86,4
- Erdsonden (Geothermie)	3,1%	48,6
- Lufttechnische Anlagen	4,8%	67,7
- Automatisierung	1,6%	22,8

Tabelle 8 - Kostenanteile für die technischen Anlagen in Kostengruppe 400

## 5 Bauliche Umsetzung

### 5.1 Das Gebäude

#### Gründung und Bodenplatte

Der Boden war nicht ausreichend tragfähig, so dass hier Bodenverbesserungen vorgenommen werden mussten. Auf den Boden wurde eine 25 cm starke Schicht aus Recycling-Material aufgebracht. Diese Zwischenschicht konnte gleichzeitig als Flächendrainage für auftretendes Hangwasser genutzt werden.



Abbildung 25 - Dämmung der Bodenplatte

Die Bodenplatte ist als 40 cm starke, elastisch gebettete Stahlbetonplatte in WU-Beton, jedoch mit reduzierter Rissbewehrung ausgeführt. Die Dämmschicht beträgt 12 cm. Umlaufend erhielt die Bodenplatte einen Randbalken zur Aufnahme auftretender Lasten, insbesondere der großen Erdbebenlasten.







## 5.2 Heizung und Kühlung

### 5.2.1 Erdwärmesonden

Die Erdwärmesonden wurden direkt vor dem Gebäude unter dem heutigen Parkplatz eingebracht. Eine Integration in den Bauablauf war möglich ohne dabei die Bautätigkeit in größerem Umfang zu beeinflussen.

Bei den Energiesonden handelt es sich um Doppel-Entzugssonden aus 4 x 32 HDPE-Rohr. Doppelrohre werden gewählt, um das Bohrloch optimal auszufüllen. Die Doppel-Entzugssonden sind über Anschlussleitungen aus PE-HD an den Soleverteiler angeschlossen. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der Sonden wurde am ersten Bohrloch ein Resonsetest zur Bestimmung der realen Heiz- und Kälteleistung durchgeführt.

Es ist eine Sole-Umwälzpumpe (Abbildung 32) mit einer Druckabsicherung zu dem System der Erdwärmenutzungsanlage für den Wärmepumpenkreis und für den Wärmetauscherkreis (Kühlwasserkreis) installiert. Der Messwertaufnehmer für die Erfassung des Druckes wird von der GLT überwacht. Ein Druckabfall stellt eine Undichtigkeit im System dar.



Abbildung 31 - Einbringung und Anschluss der Erdsonden

Ursprünglich war eine Bohrtiefe von ca. 70 m geplant. Es konnte aber lediglich 42 m tief gebohrt werden, da in dieser Tiefe die ersten Gesteinsschichten erreicht wurden. Prinzipiell können Gesteinsschichten zwar durchbohrt werden, sie sind jedoch für eine gute Wärmeübertragung eher ungeeignet. Daher wurde die Anzahl der Sonden von geplanten 12 auf 28 erhöht.

Bei einem Sondenfeld ist auf einen ausreichenden Abstand zwischen den Sonden zu achten, um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden. Beim BOB sind dies ca. 4 m.

#### Kennwerte Erdsondenfeld

Aus der Simulation sind die notwendigen Werte für die erforderliche Wärme- bzw. Kälteleistung zu entnehmen. Entsprechend ist das Erdsondenfeld nach Prüfung der geologischen Gegebenheiten (siehe 6.4) ausgelegt worden.

Wärmeleistung	56 kW
Kälteleistung	54 kW
Anzahl der Erdsonden	28
Tiefe der Bohrung	42 m

*Tabelle 9 - Kennwerte des Erdsondenfeldes*

### 5.2.2 Wärmepumpe

Die Wärmepumpe wird nur im Heizfall benötigt. Im Kühlfall wird sie im Bypass umgangen. Die Wärmepumpe ist regelungstechnisch mit der GLT verbunden und wird von dieser anhand entsprechender Regelparameter gesteuert. Die Auswahl der Wärmepumpe erfolgte letztlich nicht nur aus technischen Gründen. Vielmehr gab die Unterstützung bei der Planung der Anlage den Ausschlag.

Hersteller	Satag
Typ	Natura BW 254.1
Abmessungen (Höhe x Breite x Tiefe)	1470 mm / 1200 mm / 760 mm
Betriebsart	Monovalent
Leistungsaufnahme Strom	12,9 kW
Leistungsabgabe Wärme	56 kW
spez. Leistung Strom	6 W/m <sup>2</sup> NGF
spez. Leistung Wärme	26 W/m <sup>2</sup> NGF
spez. Leistung Kälte	27 W/m <sup>2</sup> NGF
Extra	LON- Schnittstelle

*Tabelle 10 - Kennwerte der Wärmepumpe*



Abbildung 32 - Wärmepumpe mit Steuereinheit (oben) und Solepumpe (unten links) sowie Plattenwärmetauscher (unten rechts)

### 5.2.3 Die Betonkerntemperierung

Die Vorlauftemperatur der Betonkerntemperierung beträgt für den Sommer minimal 18 °C und für den Winter maximal 28 °C.

Die Versorgung der Heizkreise erfolgt im Tichelmann-System über Ringleitungen für die jeweiligen Zonen. Über Verteiler werden diese an die aus den Decken kommenden Leitungen der Durchführungselemente des BKT-Systems angeschlossen.

Vor der Betonierung der Decken wurde zur Überprüfung der Dichtheit eine längere Druckprobe durchgeführt. Dazu werden die Leitungen für 2 Tage mit einem Druck von 3 bar beaufschlagt.

Winter Vorlauf (VL)	maximal 28 °C
Sommer Vorlauf (VL)	minimal 18 °C

Tabelle 11 - Kennwerte der Betonkerntemperierung



Abbildung 33 - Anlieferung und Verlegung der BKT-Matten



Abbildung 34 - Verlegung der BKT-Matten und Druckprüfung

#### 5.2.4 Regelung der Betonkerntemperatur

Die Betonkerntemperatur ist je Etage regelungstechnisch unterteilt in die Zonen Nord-Ost und Süd-West. Der Mittelzonenbereich des Bürogebäudes ist der Nord-Ost Zone zugeordnet. Jede Zone erhält ein eigenes Dreiwegmischventil und eine Umwälzpumpe.

Die Vorlauftemperatur für die Betonkerntemperatur wird im Heizfall in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur geregelt. Im Kühlfall wird als Vorlauftemperatur die minimal mögliche gewählt. Die Beschränkung der Temperatur nach unten erfolgt somit durch die Taupunktregelung.

In einem gut gedämmten Gebäude mit kleinen notwendigen Vorlauftemperaturen, die sich demzufolge zwischen Kühl- und Heizfall nur gering unterscheiden, ist das dynamische Umschalten zwischen Kühlen und Heizen nicht notwendig. Dies ist gut so, da der dynamische Wechsel häufig zu gegenläufigem Heizen und Kühlen und damit zur Energievernichtung führen.

Bei BOB entschieden sich die Planer für ein Zweileitersystem, bei dem im gesamten Gebäude entweder geheizt oder gekühlt werden kann. Um Heiz- oder Kühlfall zu unterscheiden, werden die 2 Zonen der 4 Etagen ausgewertet und stimmen „demokratisch“ über den Bedarf ab. Jede Zone hat eine gleichberechtigte „Stimme“.

#### Regelung nach Führungsgröße Lufttemperatur – bis 2004

Als erste Regelgröße für die Ansteuerung der Zonenpumpen und damit für die Zulieferung der Wärme oder Kälte wurde die Lufttemperatur in den Referenzräumen gewählt. Die Abbildung 35 zeigt ein Beispiel für den Heizfall. Die Außenlufttemperatur beträgt 2 °C. In fünf Referenzräumen ist die Grenztemperatur für den Heizfall unterschritten. Das System wird im Heizbetrieb gefahren. Entsprechend stellt sich eine Vorlauftemperatur von 26°C im BKT-Kreislauf ein.



Abbildung 35 - Beispiel für die Regelung mit der Lufttemperatur als Führungsgröße

Die Regelung der Verteilpumpen nach der Raumlufttemperatur führte zu erstaunlich guter Behaglichkeit, wenn man bedenkt, dass die sehr träge Betonkernaktivierung mit der sehr dynamischen Lufttemperatur geregelt wurde. Allerdings wurde eine weitere Energieoptimierung darin vermutet, dass unnötige Pumpenlaufzeiten vermieden werden sollten. Dies führte zur Entwicklung eines weiteren Algorithmus, der bis zum Redaktionsschluss des vorliegenden Berichtes drei weitere Male optimiert wurde.

#### Optimierung: bedarfsorientierte Regelung – ab Dezember 2004

Ab Dezember 2004 wurde eine andere Regelstrategie verfolgt. Die Ansteuerung der Pumpen hängt jetzt vom Energiebedarf für Kühlung oder Heizung ab. Dazu werden Vor-

und Rücklauftemperatur in die einzelne Zone gemessen und ausgewertet. Aus der Größenordnung und dem Vorzeichen der Differenz hängt das Ergebnis ab. Die Regelung unterscheidet Heiz- und Kühlbedarf und in einer definierten neutralen Zone keinen Bedarf.

Auch bei diesem Algorithmus erfolgt eine „demokratische“ Abstimmung über Kühlen und Heizen, wobei die Stimme allerdings durch die Größenordnung der Temperaturdifferenz gewichtet ist.

Zahlreiche Probleme waren bei diesem Algorithmus zu lösen. So ist die Vorlauftemperatur von der Zentrale nur mit – für den Algorithmus – großer Ungenauigkeit zu steuern. Dies führt zu Fehlinterpretationen. Auch die Temperaturmessung in Vor- und Rücklauf mit bezahlbaren Fühlern, hat eine begrenzte Genauigkeit. Daher wurde der Algorithmus in weiteren Optimierungsschleifen weiterentwickelt. Die Energieeffizienz des Algorithmus wird in den nächsten Jahren weiter beobachtet.



Abbildung 36 - Beispiel für die bedarfsorientierte Regelung

### 5.3 Warmwasserbereitstellung

Aufgrund des geringen Warmwasserbedarfes und aufgrund der geringen gewünschten Vorlauftemperatur einer Wärmepumpe wurden Durchlauferhitzer als Warmwasserbereitstellungssystem für die einzelnen Nutzungseinheiten installiert. In den Toiletten wurde auf den Komfort von warmen Wasser verzichtet.

### 5.4 Lüftung

Die Lüftungsanlagen sind für die Gewährleistung der hygienischen Lüfterneuerung im Raum mit einem Frischluftvolumen von mindestens 20 m<sup>3</sup>/h pro Person ausgelegt worden. Je Etage gibt es ein zentrales Zu- und Abluft Kombi-Gerät mit Wärmerückgewinnung. Der Wärmerückgewinnungsgrad beträgt 75%.

Die Außenluft wird über eine Außenluftansaugung durch Wetterschutzgitter über Dach angesaugt und die Zuluft über die Lüftungsgeräte in die einzelnen Geschosse durch Lüftungskanäle zugeführt.

Die Zuluft kann über die Wärmepumpe erwärmt bzw. abgekühlt werden. Nach mehreren Versuchen und aufgrund des hohen Wärme- und Kälterück-gewinnungsgrades wurde diese Funktion außer Betrieb gesetzt, was weiter Energie spart, aber nicht zu Lasten der Behaglichkeit geht. Hierzu muss erwähnt werden, dass die im Betonkern verlegten Luftkanäle zusätzlich, wie eine Wärme- bzw. Kälterückgewinnung funktionieren.

Die Zuluft wird in den Büroräumen über Tellerventile mittels Blechkanalleitungen eingeblasen. Die Zuluftkanäle, die zu den Büroräumen führen, sind ovale Rohrleitungen mit einem gleichwertigen Durchmesser von  $d = 100$  mm. Diese sind in der Rohbetondecke mit einbetoniert.

Die Nachströmung der Abluft von den Büroräumen in den Mittelzonenbereich erfolgt über einen 2 cm Luftspalt über den Türblättern. Die Abluft wird in der Mittelzone abgesaugt.

Der Zuluftkanal für die Besprechungsräume ist aufgrund der höheren Luftmenge größer ausgeführt. Die Zuluft wird über entsprechende Gitter in den Kanälen eingeblasen. Da die Besprechungsräume mit dichten schließenden Türen ausgeführt sind, wird auch die Abluft über Kanäle geführt. Zu- und Abluftkanäle für die Besprechungsräume erhalten vorgeschaltet Schalldämpfer zur Vermeidung von Schallübertragung.

Die Toilettenanlagen werden über das jeweilige Etagenlüftungsgerät mit Zu- und Abluft versorgt. Die Luftmenge je Toilette beträgt  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ .



Abbildung 37 - Lüftungskanäle in der Mittelzone und Lüftungsauslass in einem Besprechungsraum

Hersteller	Exhausto
Typ	VEX 140 HCW
Abmessungen (Höhe x Breite x Tiefe)	1050 mm / 1365 mm / 750 mm
Wärmerückgewinnung	Plattenwärmetauscher
Wärmerückgewinnungsgrad	75 %
Leistungsaufnahme Strom	1,2 kW
Extra	LON- Schnittstelle

Tabelle 12 - Kennwerte des Lüftungsgerätes

## 5.4.1 Regelung der Lüftungsanlage

Die Lüftungsanlage wird nach festen Betriebszeiten (siehe Kapitel 4.2.4 – Nutzungszeiten) betrieben. Während der Betriebszeit laufen die Geräte etwa mit 70 – 90% Leistung. Danach werden die Geräte ausgeschaltet. Die Einstellung der Leistungsstufe ist abhängig von der Büronutzung in den einzelnen Etagen. Die Einstellung der Leistungsstufe erfolgt direkt am Gerät. Es erfolgt keine Regelung über die GLT. Für eine sehr hohe Büronutzung besteht somit immer noch eine Reserve. Am Wochenende findet eine getaktete regelmäßige Durchspülung des Gebäudes mit Frischluft statt.

## 5.5 Tages- und Kunstlicht

### 5.5.1 Tageslichtnutzung

Um Blendeffekte auf den Bildschirmen zu verhindern, sind innen liegende Jalousien als Blendschutz angebracht. Um jedoch gleichzeitig das Tageslicht zur Belichtung der Räume zu nutzen, dienen die Lamellen im oberen Teil der Jalousie zur Lichtlenkung in den Raum. Die weiße Decke sorgt dafür dass dieses gelenkte Licht weiter in den Raum und die Mittelzone gelenkt wird.

Die Lamellen des verwendeten Typs sind 25mm breit, verspiegelt und teilperforiert, um auch bei vollständig geschlossener Jalousie eine visuelle Verbindung nach Außen zu gewährleisten. Die Bedienung erfolgt manuell durch die Nutzer. Die Nutzerakzeptanz ist als hoch einzustufen.

Physikalische Werte der Verschattung:

- $T = 2,5\%$ ;
- $TQ = 1,4\%$ ;
- $F_c \sim 40\%$



Abbildung 38 - Blick in ein Büro und Lichtlenkung durch innen liegende Verschattung

Das Treppenhaus wird auf Grund der voll verglasten Fassade auch bei geringer Solarstrahlung über den Tag ausreichend belichtet.

## 5.5.2 Kunstlichtbeleuchtung

### Büros an der Außenfassade

Die Büros werden über ein H-Profil mit eloxierter Oberfläche als durchgängiges Schienensystem in 2,10 m Höhe beleuchtet. Die H-Profile werden an den Zwischenwänden befestigt und erhalten in Raummitte eine zusätzliche Aufhängung über ein Stahlseil.

Die Profile werden raumweise am Rand mit zwei 39 W Uplights und in der Mitte mit zwei 54 W Downlights bestückt. Die Beleuchtung ist dimmbar und wird für die gesamte Schiene über ein bis zwei Einspeisepunkte mit Strom versorgt angeschlossen. Die Steuerung und Regelung erfolgt über die Gebäudeleittechnik.

Die Helligkeit kann vom Benutzer selbst über einen Taster eingestellt werden. Eine tageslichtabhängige Regelung (siehe Kapitel 5.5.3) passt die Beleuchtungsstärke abhängig von der Solareinstrahlung automatisch den aktuellen Verhältnissen an. Da diese Regelung vom Nutzer übersteuert werden kann, besteht somit jederzeit die Möglichkeit der Einstellung nach seinen eigenen Bedürfnissen, was zu einer hohen Nutzerakzeptanz führt.

### Mittelzone / Deckensegel

In der Mittelzone sind die Decken zum Teil mit einem Abhangsegel versehen. Darüber sind an Gewindestangen abgependelte Leuchten mit aufgestecktem Jakobsenraster mit 2 x 1,50 m Leuchtmittellänge installiert. Die Leuchten sind ebenfalls dimmbar und optional über Taster zu schalten. Die umgesetzten Lösungen zur Beleuchtung der Mittelzone fallen je Nutzungseinheit sehr unterschiedlich aus.



Abbildung 39 - Abhangsegel und Beleuchtungssensor in der Mittelzone

### Treppenhaus

Die Treppenhausbeleuchtung ist in die Betonpfeiler integriert. Die Schaltung erfolgt über die GLT. Als Parameter dienen Tageszeit und die Tages-Helligkeit. Über einen Dämmerungsschalter wird das Flurlicht eingeschaltet. Es bleibt bis 23 Uhr eingeschaltet. Ein manuelles Einschalten ist jederzeit möglich.



Als Sensoren für die Einstrahlungsmessung dient jeweils ein Sensor auf dem Dach auf der Nord- und auf der Südseite. Für die Mittelzone wird der Messwert des Nordsensors herangezogen.

Beim Einschalten der Beleuchtung stellt sich eine von der aktuellen Beleuchtungssituation abhängige Beleuchtungsstärke ein. Diese wird anhand einer Regelkurve jeweils den sich ändernden Verhältnissen angepasst.

Über die GLT können der Startwert der Regelkurve [Lux], die Schrittweite der Änderungen [Lux] und ein Dämpfungsfaktor, der den zeitlichen Verlauf der Änderungen beeinflusst vorgegeben werden.

Der Startwert ist für die Büros auf der Nordseite höher, da dort die geringere Einstrahlung vorherrscht. Die Schrittweite der Änderungen und der Dämpfungsfaktor müssen so eingestellt werden, dass die automatischen Anpassungen vom Nutzer kaum wahrgenommen werden.

Eine Kontrolle der Effizienz der Tageslichtsteuerung kann nur über die Messung des Energieverbrauchs der Beleuchtungsanlage erfolgen. Da die Beleuchtungsteuerung nachträglich aktiviert wurde, können die Verbrauchswerte mit Zeiten ohne eine tageslichtabhängige Regelung verglichen werden.

## 6 Messtechnik/ Datenerfassung

Ein umfangreiches Messkonzept ermöglicht die Überprüfung des vorausgerechneten Energiebedarfs und auch der thermischen Situation in den Arbeitsbereichen.

Die Messdaten werden monatlich bilanziert und nach den vereinbarten Kenngrößen ausgewertet. Durch die Aufschaltung der Messsensoren auf die Gebäudeleittechnik konnte per HTML-Oberfläche die Auswertung über ein Gebäudeintranet ermöglicht werden.

### 6.1 Messkonzept – Zonierung

In Abhängigkeit von der Nutzung werden die verschiedenen Gebäudebereiche unterschieden (Zonierung). Danach richtet sich die Notwendigkeit der Aufnahme entsprechender Messwerte. Folgende Bereiche bzw. Zonen werden definiert:

- Arbeitsbereiche an den Außenwänden
- Besprechungsräume
- Mittelzone, überwiegend für Infrastruktur
- Versorgung.

In festgelegten Referenzräumen werden in den Etagen jeweils auf der Nord- und der Südseite die Daten zum Raumklima in den Büros aufgenommen. Diese Daten werden von der GLT erfasst und stehen damit zur Auswertung zur Verfügung.

Prinzipiell sind folgende Werte von besonderer Bedeutung:

- Energieverbrauch Heizwärme und Kühlung
- Energieverbrauch zur Warmwasserbereitung
- Bedarf an elektrischer Energie (nach Verbrauchergruppen)
- Raumklima / Behaglichkeitsdaten (Temperaturen etc.)
- Benutzerspezifische Daten (z.B. Einschaltzeiten der Beleuchtung)
- Kühlenergie.

Bestimmte Messwerte dienen als Parameter für den Regelalgorithmus. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Messwertaufnahme für die Erfassung des Energieflusses in das Gebäude hinein und exemplarisch die Messwertaufnahmen im 2.OG.

### Aussen



### 2.OG VIKA

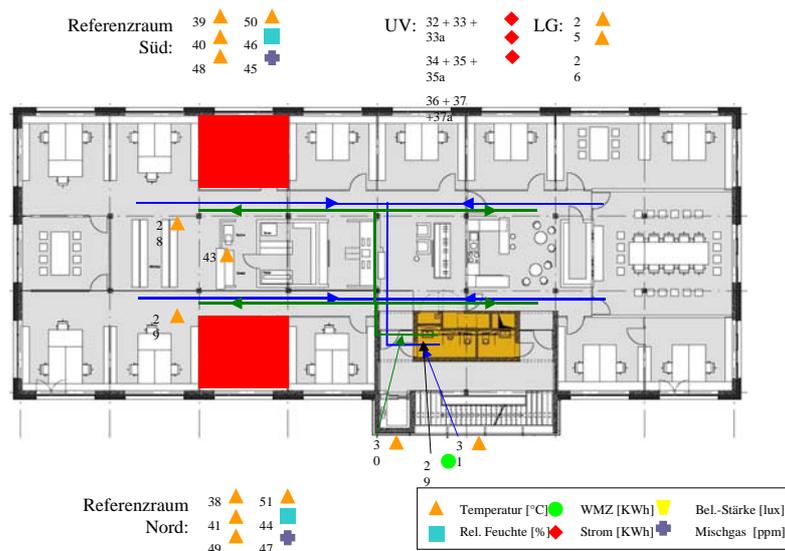


Abbildung 42 - Lage der Messensoren im Gebäude

Zu erkennen sind die Referenzräume und sämtliche in einer Etage erfassten Messwerte. Jeweils ein Referenzraum befindet sich auf der Nord- bzw. der Südseite des Gebäudes. Die Nummerierung in Abbildung 42 kennzeichnet den jeweiligen Messpunkt. Die Symbole stehen für bestimmte Arten von Messwerten.

### 6.1.1 Raumklimadaten

Im 2. OG werden sowohl im nördlichen wie im südlichen Referenzraum folgende Werte aufgenommen. In den übrigen Etagen erfolgt in den nach Norden liegenden Referenzräumen nur die Messung der Lufttemperatur.

Operative Raumtemperatur	°C	Thermokon - RPF 40
Lufttemperatur	°C	Thermokon - WRF 02
Oberflächentemperatur Decke	°C	Thermokon
Oberflächentemperatur Fußboden	°C	Thermokon
relative Feuchte	%	Thermokon - FW 04
Luftqualität - Mischgas	ppm	Thermokon - LW 04

*Tabelle 13 - Messpunkte für die Erfassung der Raumklimadaten und beigeordnete Sensoren*



*Abbildung 43 - Messsensoren in den Referenzräumen (Nordseite und Südseite)*

### 6.1.2 Lüftungsanlagen und Betonkerntemperierung

Die Messgrößen der Lüftungsgeräte sowie der BKT werden je Etage erfasst. Die Messwertaufnehmer für die Lüftung befinden sich innerhalb des Lüftungsgerätes und sind mit der GLT verbunden.

Das gleiche gilt für die Wärmemengenzähler der BKT. Diese sind zugänglich über die Toilettenräume und werden regelmäßig abgelesen und in die manuelle Handliste eingetragen.

Lüftung	Zuluft-Temperatur
Lüftung	Abluft-Temperatur
Heizkreis Nord	Zonentemperatur
Heizkreis Süd	Zonentemperatur
BKT	Wärmemenge
BKT	Vorlauf-Temperatur
BKT	Rücklauf-Temperatur

*Tabelle 14 - Messpunkte für Lüftungsanlagen und BKT*

### 6.1.3 Technische Anlagen

Im Hausanschlussraum und der Heizzentrale werden die Messwerte der Wärmepumpe inkl. der Parameter des Erdsondenfelds aufgenommen. Neben der Erfassung von Temperaturen wird die bereitgestellte Wärmemenge messtechnisch erfasst.

Um in der Lage zu sein, genaue Aussagen über die Wärmepumpe und die aus dem erdreich gelieferte Kälte treffen zu können, wurde Ende 2004 ein weiterer Wärmemengenzähler (WMZ) installiert. Dieser WMZ ist nach der Wärmepumpe und dem Ladespeicher eingebaut worden. Er erfasst damit die Wärme und Kälte des Gesamtsystems inklusive der Verluste der Wärmepumpe und des Speichers.

Die Steuereinheit der Wärmepumpe zeichnet die Laufzeiten von der Primär- und Sekundärpumpe (Ladepumpe Speicher), dem Verdichter sowie den beiden Entladepumpen auf. Der Stromverbrauch der Primärpumpe wird messtechnisch über den Stromzähler der Wärmepumpe mit erfasst. Dieser Verbrauchswert wird auch für die Bildung der Jahresarbeitszahl herangezogen.

Die Laufzeiten der o.g. Pumpen werden zwar von der Wärmepumpe selbst aufgezeichnet, doch erfolgt eine stetige Aufzeichnung dieser Werte nicht. Die Werte werden in der manuellen Handliste wöchentlich aufgezeichnet. Somit lassen sich Aussagen zu den Zeitpunkten wann welche Pumpe gelaufen ist nur mit einer wöchentlichen Auflösung wiedergeben.

Erdsondenfeld	Vorlauf-Temperatur Sole
Erdsondenfeld	Rücklauf-Temperatur Sole
Außenwand Nord	Außenluft-Temperatur
Außenwand Süd	Außenluft-Temperatur
Heizung	Taupunktfühler
Speicher	Speichertemperatur Oben
Speicher	Speichertemperatur Unten
Wärmeverteilung	Mischertemperatur 1 - heizen
Wärmeverteilung	Mischertemperatur 2 - kühlen
BKT (gesamt)	Wärmemenge (Wärme)
BKT (gesamt)	Wärmemenge (Kälte)
BKT (gesamt)	Vorlauf-Temperatur
BKT (gesamt)	Rücklauf-Temperatur
Wärmepumpe	Stromzähler EVU
BKT Hauptpumpe (Gesamtverteilung)	Stromaufnahme
Konditionierung Zuluft	Vorlauf-Temperatur
Konditionierung Zuluft	Rücklauf-Temperatur
Konditionierung Zuluft	Wärmemenge Lüftung

*Tabelle 15 - Messpunkte für technische Anlagen*

## 6.1.4 Energieverbrauchsmessungen

Die Energieverbräuche werden bis auf den Energiebedarf für die Lüftung je Nutzungseinheit gemessen. Zur Kontrolle wird eine wöchentliche Handablesung der Zählerstände vorgenommen.

In den jeweiligen Etagen werden über Trommelzähler die wichtigsten Parameter (s. Tabelle 16) aufgenommen. Auch hier findet eine wöchentliche Ablesung statt, aber zusätzlich werden die Daten auch stündlich über die GLT erfasst. Die elektrischen Arbeitsmittel werden in den Etagen über den Allgemeinstromzähler des EVU aufgenommen. Die Arbeitsmittel in den Büros und den Etagen werden nicht einzeln messtechnisch erfasst. Sie werden aus dem Zählerstand für den Gesamtstromverbrauch je Bürogemeinschaft abzüglich der Verbräuche für Beleuchtung, Durchlauferhitzer und Belüftung ermittelt.

Damit eine Auflösung des Stromverbrauchs für PCs und weitere Geräte möglich ist, wurde Anfang 2005 im 2.OG zwei weitere Trommelzähler installiert. Ein Zähler der den Verbrauch der Geräte für die PCs und Monitore (rote Steckdosen) aufzeichnet und einen für sonstige Verbraucher, wie z.B. Arbeitsplatzleuchten oder Ladegeräte für Mobilgeräte (weiße Steckdosen).

Beleuchtung	je Nutzungseinheit
Durchlauferhitzer	je Nutzungseinheit
Belüftung (Ventilator)	je Etage
Arbeitsmittel	je Nutzungseinheit
PC + Monitore	nur 2.OG
sonstige Verbraucher	nur 2.OG
Drucker + Kopierer	nur 2.OG
Allgemeinstrom	Gebäude
Beleuchtung außen und TRH, Pumpen ...	
Wärmepumpe + Primär Pumpe	Gebäude

*Tabelle 16 - Stromverbrauchsmessungen*

## 6.2 Druckdifferenzmessung

### 6.2.1 Bauphase

Bereits während der Bauphase wurde mittels einer Druckdifferenz-Messung die Dichtigkeit der Fenster überprüft.

Durch diese Maßnahme der Qualitätssicherung sollten beispielhaft an einem Fenster die Luftdichtigkeit des Einbaus in die Rohbauöffnung sowie der Dichtungen am Fensterflügel überprüft werden.





entspricht das einem n50-wert von 0,3 1/h. Geringfügige Undichtigkeiten konnten an den Lamellenfenster im Treppenhaus sowie der Eingangstür ausgemacht werden.

Anmerkung: Der Fahrstuhl gehört zu der thermischen Pufferzone des Treppenhauses. Dieses ist gering beheizt. Für die Messung wurde die Luke im Fahrstuhlschacht, welche für den Druckausgleich notwendig ist und aus brandschutztechnischen Gründen vorhanden sein muss, verschlossen.

Um den ungewollten Luftaustausch an dieser Stelle zu reduzieren, sollte eine dicht schließende Klappe, die sich im Brandfall öffnet, eingesetzt werden.

### 6.3 Thermografie

Zur weiteren Qualitätsprüfung wurden Thermografieaufnahmen durchgeführt. Für die Messungen kam eine Varioscan 3021 ST mit Stirlingkühler der Firma Infratec zum Einsatz.

Schwerpunkte bei der Auswertung der Thermografieaufnahmen waren die Betrachtung

- der Fußbodenheizung im Erdgeschoss
- der Einspeisetemperaturen der BKT-Verteiler (gemessen über die Sensoren der Gebäudeleittechnik) im Vergleich zu den an den Verteilern per Thermografie gemessenen Temperaturen
- des Verhaltens der BKT-Decken im Hinblick auf die Heizeffizienz als Fußboden-beziehungsweise Deckenheizung
- des Einflusses der Raumorientierung (Norden oder Süden)
- der wärmetechnischen Belastung der Eckräume sowie
- des heizmindernden Einflusses der Deckenabhängung im Erdgeschoss.



Abbildung 47 - Thermografiekamera auf Stativ

## 6.4 Geothermische Verhältnisse

### 6.4.1 Kartographische Abschätzung

In einem ersten Schritt kann eine Abschätzung des Erdreiches aus vorhandenen geologischen und hydrologischen Kartenwerken erfolgen. Dabei wird jeder Bodenschicht eine spezifische Entzugsleistung zugeordnet. Die Summe der Entzugsleistungen je Schicht ergibt die Gesamtentzugsleistung für eine Erdwärmesonde.

Die Kartographische Abschätzung wurde für eine Bohrtiefe von bis 100 m vorgenommen.

Schicht	Schichtdicke [m]	Spezifische Entzugsleistung pro Meter Sonde [W/m]	Entzugsleistung absolut [W]
Deckschichten, Löss, Lehm,	5	60	300
Hergenrather Schichten	25	50	1.000
Oberkarbon	70	65	4.875
Gesamt	100		6.175

*Tabelle 17 - Abschätzung der Geothermie*

Da das sich ergebende  $\Delta T$  für den Heiz- und den Kühlfall etwa im Bereich von 8 - 10 K liegt, kann die Auslegung für Kühlzwecke identisch sein.

Da im Kühlfall keine Temperaturanpassung über die Wärmepumpe erfolgt, muss die gesamte Kühlenergie aus den Erdwärmesonden gezogen werden.

Bei einer Auslegung auf 80 kW (nach erster Schätzung der Heizleistung) ergibt sich eine notwendige Sondenlänge von 1.295 m. Bei einer Bohrtiefe von maximal 100 m sind das 13 Bohrungen.

### 6.4.2 Response-Test Erdwärmesystem

Für die Auslegung von Erdwärmesonden ist, wie zuvor beschrieben, die Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Untergrunds eine wesentliche Voraussetzung. Während bei kleinen Anlagen die Werte unter Berücksichtigung entsprechender Sicherheiten meist geschätzt werden, sind für größere Anlagen Untergrunduntersuchungen bis hin zu Probebohrungen erforderlich. Über solche Probebohrungen lässt sich die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds bestimmen.

Der thermische Response-Test erfolgte an einer fertig eingebauten Erdwärmesonde. Vorteile sind

- die Messung über die gesamte Bohrlochlänge
- die Einbeziehung der Bohrlochverfüllung und
- die ungestörten Untergrundverhältnisse einschließlich evtl. vorhandenen Grundwasserflusses.

Grundsätzlich ist die gemessene Temperaturkurve auf optische Inkonsistenzen zu prüfen, da die Steigung sehr empfindlich in die Auswertung eingeht. Wenn z.B. Schwankungen von Einspeiseleistung oder Temperaturen im Tagesverlauf festgestellt werden, hilft bei der Auswertung nach der Linienquellentheorie nur eine ausreichend lange Messzeit, um diese Schwankungen auszugleichen. Durch längere Messzeiten können auch Störungen, wie sie z.B. durch Wärmeentwicklung beim Abbinden des Verfüllmaterials entstehen, reduziert werden.

Die Probebohrung ergab, dass eine Bohrung über 42 m Tiefe aufwendig sein würde. Daher wurden letztendlich 28 Sonden mit einer Tiefe von ca. 42 m gebohrt.

Erdsondenlänge	42,0 m
Bohrlochdurchmesser	180 mm
Messzeit	49,75 h
Gesamte Wärmeleistung der Erdwärmesonde	3.430 W
Ausgangstemperatur Erdreich (Mittelwert)	10,8 °C
Mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{eff}}$	2,7 W / m / K
Berechneter thermischer Bohrlochwiderstand $R_b$	0,08 K / (W / m)
Mögliche Entzugsleistung	50 W / m

Tabelle 18 - Ergebnisse des Responsetests

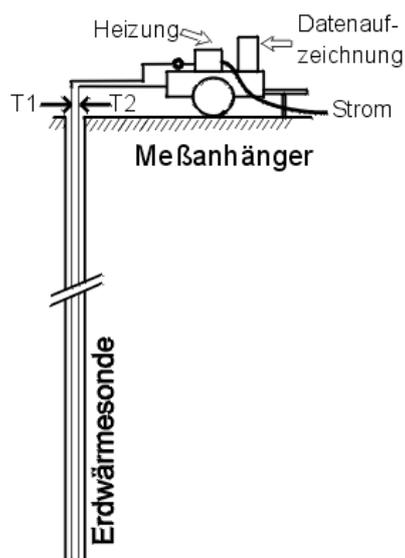


Abbildung 48 - Messaufbau für den Responsetest /ii/

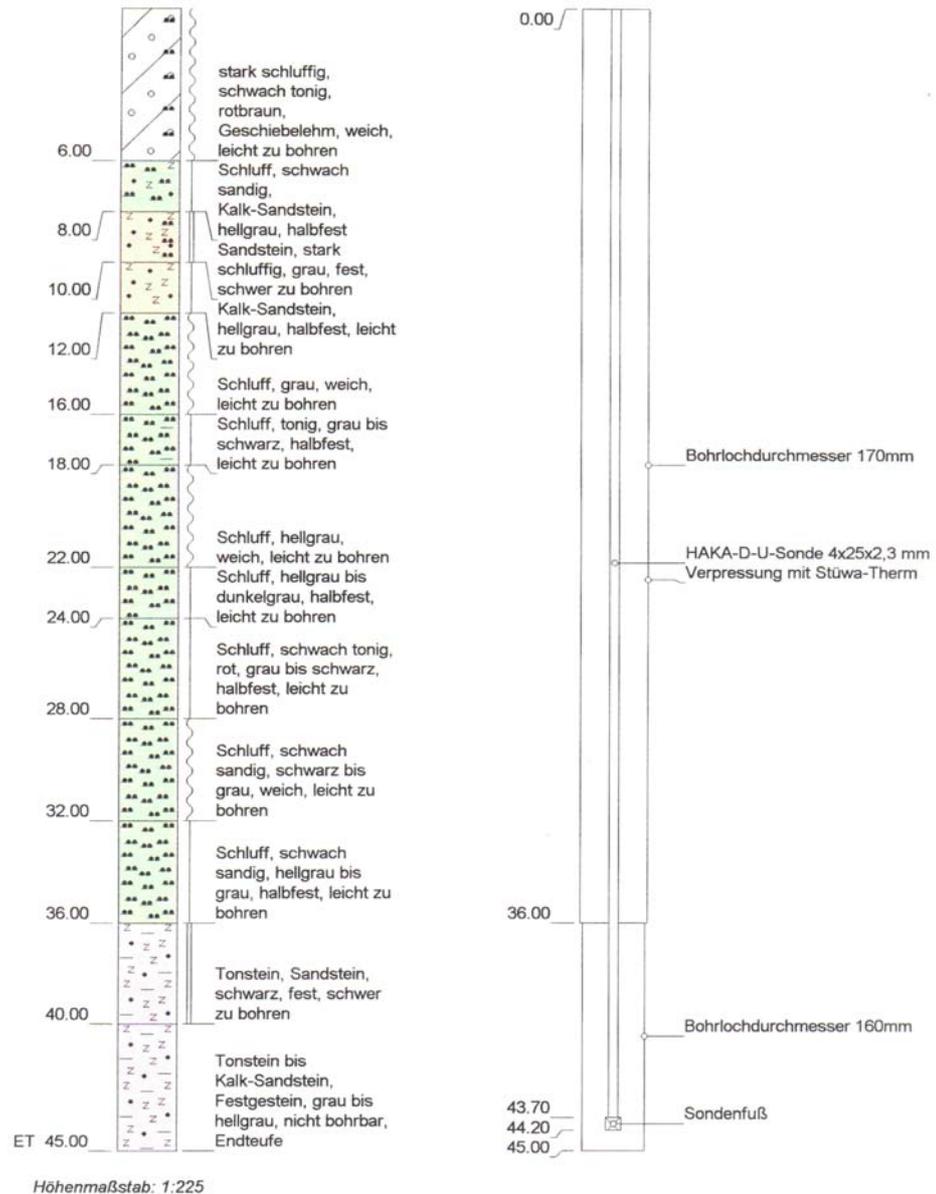


Abbildung 49 - Aufbau der Gesteinsschichten und Prinzipdarstellung des Bohrlochs /iii/

## 6.5 Bestimmung des Tageslichtquotienten

Der Tageslichtquotient stellt ein Maß für die Qualität der Versorgung mit Tageslicht im Rauminnen dar. Er ist damit auch ein Merkmal für das Potential an Energieeffizienzsteigerung der Beleuchtungsanlage bei Einsatz einer tageslichtabhängigen Steuerung.

Die Grafik zeigt die Messpunkte für die Bestimmung des Tageslichtquotienten im Referenzraum auf. Für die Messungen wurde der Referenzraum im 2.OG auf der Nordseite bestimmt, da er mit 2 Arbeitsplätzen und der entsprechenden Raumausstattung repräsentativ für die anderen Arbeitsräume ist. Die Skizze zeigt die Messpunkte auf den Schreibtischen. Zur Messung des Tageslichtquotienten wurden 2 Miniluxmeter von der Firma Optronik eingesetzt.

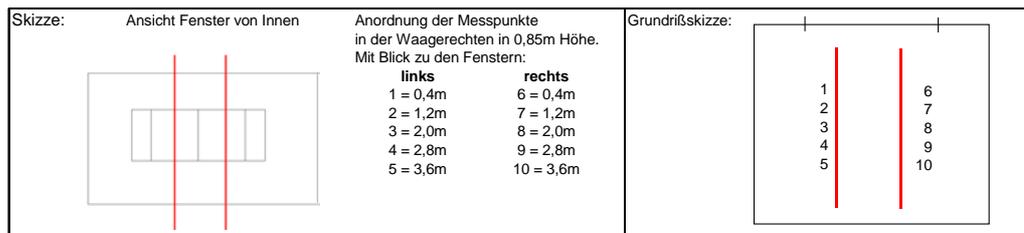


Abbildung 50 - Skizze mit den Messpunkten zur Bestimmung des Tageslichtquotienten

## 6.6 Bewertung der Messtechnik

### 6.6.1 Energieverbrauchserfassung

Zur Überprüfung der Erfassung der Energieverbräuche über die GLT wurde parallel eine wöchentliche Ablesung der Zähler vorgenommen. Die Werte der Handliste sind im Allgemeinen höher als die der eingeloggtten Werte der GLT. Die Abweichung zu den Arbeitsmitteln im 2.OG ist sehr gering ( $< 3,0\%$ ). Bei dem Stromverbrauch für die Belüftung ist die mittlere Abweichung  $7,8\%$  und bei der Beleuchtung beträgt sie im Mittel  $10,1\%$ .

Die in die GLT eingebundenen elektronischen Zähler zeigen große Abweichungen. Diese lassen sich mittels entsprechender Programmierung nach durchgeführter Kalibrierung anpassen.

Ein weiterer Messfehler sind unvollständige Datenbestände, die offensichtlich durch Ausfall des zentralen Rechners erzeugt wurden.

### 6.6.2 Messungen der Raumtemperaturen

Als Kriterium für die Behaglichkeit dient die Empfindungstemperatur. Messtechnisch werden von der GLT Empfindungstemperatur und Raumlufttemperatur erfasst. Ein Problem stellen die sehr geringen Temperaturunterschiede dar. Diese liegen im Toleranzbereich der Sensoren.

Bei der Messwertaufnahme in den Referenzräumen kam es zu Ungenauigkeiten, da abgestellte Ordner oder auch Bücher teilweise die Sensoren verdeckten. Die Messungen der Empfindungstemperaturen sind auch deshalb nur bedingt aussagekräftig, da einige Nutzer, die im Schreibtischbereich freihängenden Sensoren einfach aufwickelten. Die Sensoren befanden sich dann direkt ober- oder unterhalb der Lampen.

Bei diesen Messungen war zu beobachten, dass sich Empfindungs- und Raumlufttemperatur auf etwa dem gleichen Niveau bewegen. Dies lässt sich erklären, da die Unterschiede der Oberflächentemperaturen zu den Raumlufttemperaturen relativ gering sind.

Zur Überprüfung der fest installierten Sensoren der GLT kamen folgende Messsensoren der Firma Ahlborn zum Einsatz:

- Globe Thermometer – Pt100 4L, Klasse B - FPA805GTS
- Anemometer, omnidirektional – NTC Sensor - FV A605 TA 50
- Feuchte-/ Temperaturtransmitter – MT8736AG4
- Beleuchtungsstärke Sensor – FLA 613 VL
- Einbaufühler Typ N (Ntc) – FN0460

## 6.7 Bestimmung der Raumluftqualität

Zur Bestimmung der Luftqualität werden Mischgassensoren von Thermokon eingesetzt. Der Sensor besteht aus einem beheizten Zinndioxid-Halbleiter. Dieser ändert in Abhängigkeit reduzierender Gase proportional seine Leitfähigkeit.

Mischgassensoren erfassen die Luftqualität nicht mit der Genauigkeit eines CO<sub>2</sub>-Sensors. Dabei reagieren die Mischgassensoren teilweise erheblich träger. Dies bestätigen auch die realen Messungen. Es konnte häufig beobachtet werden, dass sich der Messwert dem Maximum von 1.000 ppm näherte und dort über längere Zeiträume verharrete. Nach der unteren Grafik ist erst ein erheblicher Luftaustausch (z.B. Fensteröffnung) nötig, um ein Absinken des Messwertes hervorzurufen.

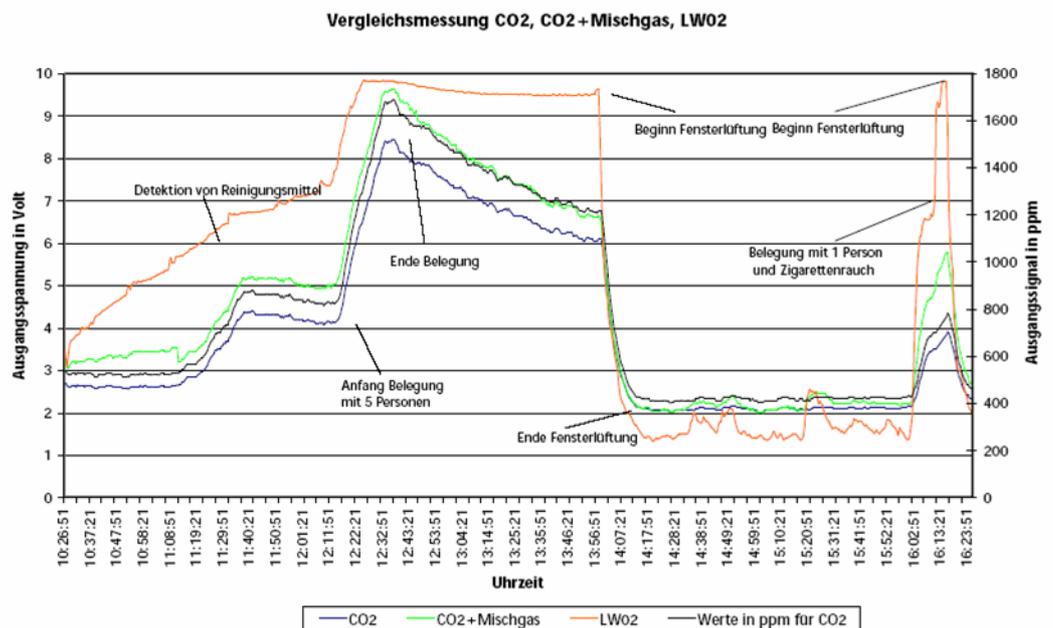


Abbildung 51 - Mischgas- und CO<sub>2</sub>-Sensor im Vergleich /iv /

## 7 Ergebnisse

### 7.1 IST / SOLL Vergleich

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Messungen und der Gebäudesimulation dargestellt. Ein Vergleich mit den Zielwerten nach Solarbau und den Planungsdaten zu Beginn des Projektes soll zeigen, ob die gestellten Anforderungen in der Realität erfüllt werden.

Aus den Messergebnissen werden Besonderheiten bezüglich Vergleichskennwerten, der zeitlichen Verläufe innerhalb der Nutzungseinheiten bzw. des Gesamtgebäudes oder Abhängigkeiten zwischen den jeweiligen Etagen abgeleitet.

Die spezifischen Energieverbrauchswerte u.a. für Beleuchtung und Belüftung lassen sich mit den Grenz- bzw. Zielwerten nach dem Leitfaden Elektrische Energie (LEE) bewerten. Darüber hinaus werden für die Bewertung auch die Kennzahlen nach der so genannten „Frankfurter-Liste“ hinzu gezogen. Die „Frankfurter-Liste“ ist im Projektteam ein interner Begriff für eine Aufstellung von Grenz- und Zielwerten, ähnlich dem LEE. Diese Werte entstammen dem Projekt „green effect“, eines durch die Europäische Union geförderten Forschungsprojektes zum effizienten Betrieb mit Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Bürogebäuden /v/. In den nachfolgenden Kapiteln ist an entsprechender Stelle auf die Grenzwerte hingewiesen.

Vielfach spielen neben den Gebäudeeigenschaften die Gewohnheiten der Nutzer eine Rolle, so dass die Ergebnisse in dieser Hinsicht interpretiert werden müssen.

#### 7.1.1 Vergleich der Energiekennwerte

Am gebräuchlichsten ist der Vergleich ähnlicher aber auch unterschiedlicher Gebäude anhand von Kennwerten. Einer der wichtigsten Kennwerte für das Forschungsprojekt Solarbau ist der spezifische Primärenergiebedarf des untersuchten Gebäudes. Mit der Kenntnis dieses Wertes lassen sich schnell Bezüge zu den anderen untersuchten Gebäuden herstellen. Mit weiteren Kennwerten z.B. den Stromverbrauch für Beleuchtung etc. lassen sich schnell Ähnlichkeiten aber auch Unterschiede zu den betrachteten Gebäuden aufzeigen und bewerten. In diesem Bericht geht es nur um das Projektgebäude Bob. Eine Bewertung zu den anderen Projektgebäuden des gesamten Forschungsprojektes findet an anderer Stelle statt.

Für die Bewertung des Energieverbrauchs des Gebäudes sind u.a. folgenden Kennwerte herangezogen worden:

- spezifischer Primärenergiebedarf
- spezifischer Heizwärmebedarf
- spezifischer Bedarf elektrische Energie (Beleuchtung, Lüftung, Pumpen ...)

Die folgende Tabelle stellt die Planungs- und IST-Werte aus der Monitoringphase gegenüber. Danach liegt der Gesamtprimärenergiebedarf mit 83,7 kWh/m<sup>2</sup> in 2005 deutlich unter dem Planungswert von 95 kWh/m<sup>2</sup>a und hält somit auch den Grenzwert nach Solarbau-Kriterien von < 100 kWh/m<sup>2</sup>a ein. Der Heizwärmebedarf liegt mit 26,3 kWh/m<sup>2</sup>a also um 35% geringer als er bei der Planung berechnet wurde. Auch dieser Kennwert erfüllt die gesetzten Grenzwerte.

Von der Inbetriebnahme bis 2005 kann eine Reduzierung des jährlichen Energieverbrauchs beobachtet werden. Dies liegt an durchgeführten Optimierungen der Regelungstechnik und an dem erhöhten Bedarf, begründet durch die Baufeuchte zu Beginn der Nutzung des Gebäudes.

<b>Vergleich Planung - Ist</b>	Planungsdaten [kWh/m <sup>2</sup> a]	IST 2003 [kWh/m <sup>2</sup> a]	IST 2004 [kWh/m <sup>2</sup> a]	IST 2005 [kWh/m <sup>2</sup> a]
Primärenergie (Strom): (inkl. Heizwärmeerzeugung)	95	~ 97,9	95,7	83,7
Heizwärmebedarf - Endenergie:	40	~ 26,6	30,6	26,3

Tabelle 19 - Vergleich Planung und Ist auf Primärenergiebasis bezogen

Die Werte für das Jahr 2003 wurden aus den vorhandenen Daten hochgerechnet, da es insbesondere zu Beginn der Messphase zeitweise zu Ausfällen der GLT kam. Des Weiteren waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Sensoren installiert und in die GLT eingebunden.

### 7.1.2 Wetterdaten

Für die Simulationsberechnungen im Planungsstand wurden die Wetterdaten des Test Referenz Jahres TRY Nr. 02 nach VDI 2067 zu Grunde gelegt. Dies entspricht den Wetterdaten des Ruhrgebietes und weiteren Ballungsgebieten des Flachlandes. Diese Daten wurden über einen 20 jährigen Zeitraum gemessen und zu entsprechenden Klimaregionen Deutschlands zusammengefasst.

Die Simulation des IST Zustandes nach Fertigstellung und zum Zeitpunkt der Nutzung wurde mit den Wetterdaten des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) für die Region Aachen für das Jahr 2005 durchgeführt. Für die Strahlungsdaten (Global- und Diffusstrahlung) lagen keine Daten für den Standort Aachen vor, so dass man Daten des nächstgelegenen Standortes (hier Bochum) berücksichtigte.

Zur Abrundung des nachfolgenden Vergleiches der Wetterdaten wurden noch Daten mittels der Software Meteororm ermittelt. Diese Daten setzen sich aus Messdaten sowie statistischen Berechnungsmodellen zusammen.

Nachfolgende Wetterdaten wurden dabei berücksichtigt:

- Außenlufttemperatur [°C]
- Bedeckungsgrad [1/8]
- Windgeschwindigkeit [m/s]
- Windrichtung [Grad]
- Globalstrahlung [W/m]
- Diffusstrahlung [W/m]
- relative Luftfeuchtigkeit [%]

Die Messdaten der Außenluftsensoren auf der Nordseite des Projektgebäudes weisen im Vergleich zu den anderen Wetterdaten insbesondere zu den DWD Daten im Jahresverlauf eine gute Übereinstimmung auf. Es zeigt sich jedoch das die vor Ort gemessenen Außenlufttemperaturen geringfügig höher liegen. Ausnahme hiervon sind die maximalen Temperaturen im Juni, dort zeigt sich in den Tageshöchstwerte eine Differenz von 11 K. Diese Werte treten in den Abendstunden (ab 19 Uhr) auf, da die Abschirmung des Sensors vor solarer Einstrahlung nicht ausreichend ist.

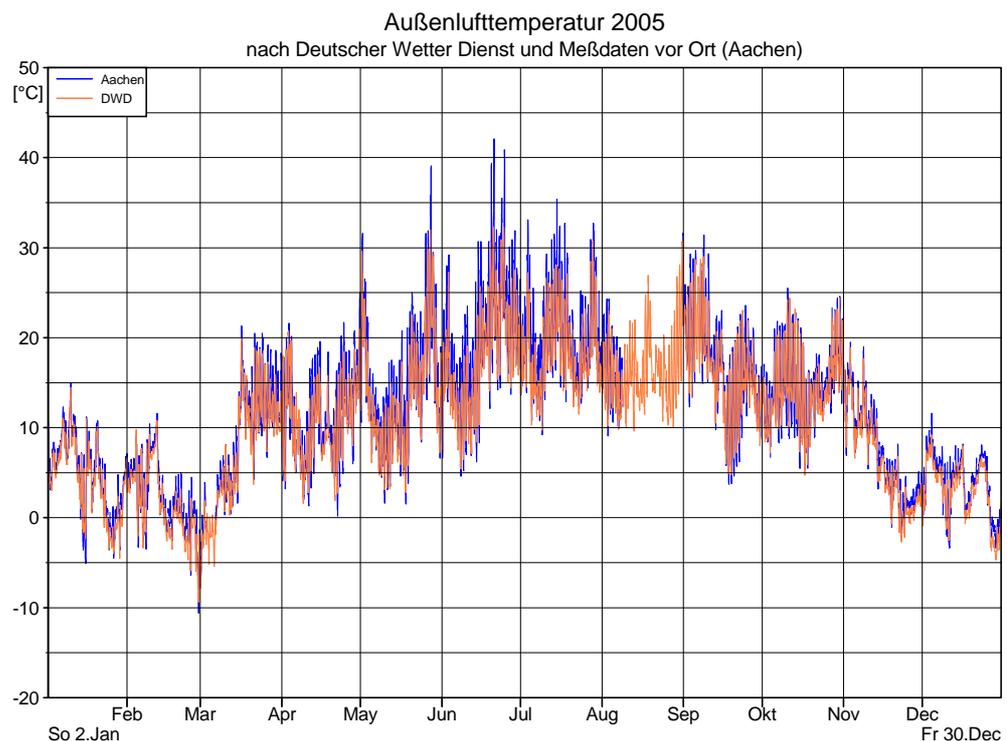


Abbildung 52 - Außenlufttemperatur nach DWD im Vergleich zu den vor Ort gemessenen Außenlufttemperaturen

Die Sommermonate 2005 sind sehr warm und weisen nach DWD 210 Stunden über 26°C Außenlufttemperatur auf. Nach den Sensordaten vom Gebäude sogar mehr als 324 Stunden. Die statistisch ermittelten Temperaturen nach Meteonorm und die langjährigen

Daten des TRY weisen geringere Häufigkeiten von 80 bzw. 58 Stunden auf. Die Höchsttemperaturen liegen jedoch bei beiden Datensätzen höher als 30°C.

Im Winter wurden Tiefsttemperaturen von -10,6 °C in Aachen durch die Sensoren der GLT gemessen. Aufzeichnungen nach DWD und nach Meteonorm liegen nah bei diesem Minimalwert. Um 2,8 K niedriger liegt der Temperaturwert beim TRY und erzielt damit mit -13,4°C die niedrigste Außenlufttemperatur von allen.

Der gesamte Winter hingegen zeigte sich im Vergleich zu den anderen Daten gemäßiger. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass vor Ort 464 Stunden unterhalb von 0°C auftraten. Nach den Wetterdaten vom DWD 772 Stunden. Die Anzahl der Stunden nach Meteonorm liegen mit 58 Stunden höher, gesamt 830 Stunden. Das Test Referenz Jahr weist die häufigsten Stunden mit insgesamt 1.068 unterhalb 0°C.

	GLT Bob	DWD	TRY Nr. 02	Meteo- norm
< 0°C	464 h	772 h	1.068 h	830 h
> 26°C	324 h	210 h	80 h	58 h
Tiefst- temperatur	-10,6°C	-9,8°C	-13,4°C	-10,2 °C
Höchst- temperatur	42,1°C (!)	32,3°C	31,2°C	30,7°C

*Tabelle 20 - Häufigkeit sowie Höchst- und Tiefstwert der Außenlufttemperatur*

Die solare Einstrahlung konnte vor Ort nicht gemessen werden, so dass für den Vergleich nur die Daten des DWD, nach Meteonorm und nach TRY vorlagen. Der Deutsche Wetter Dienst besitzt für die Messung von Strahlungsdaten keine Station in Aachen, so das Daten der Station Bochum als nächst gelegene Station gewählt wurde.

Die nachfolgende Grafik zeigt die globale und diffuse Strahlung im Jahresverlauf nach DWD. Dieser Wetterdatensatz weist eine Globalstrahlung bis 914 W/m<sup>2</sup> auf. Oberhalb von 600 W/m<sup>2</sup> Globalstrahlung werden 424 Stunden gezählt. Die Daten nach TRY und Meteonorm liegen etwa gleich, aber mit ca. 100 Stunden niedriger. Der maximale Wert wird beim TRY mit 1.007 W/m erreicht. Der Meteonorm Datensatz erreicht einen ähnlichen Wert mit 911 W/m wie der vom DWD.

Bei der Diffusstrahlung werden oberhalb von 300 W/m<sup>2</sup> nach DWD 324 Stunden aufgezeichnet. Nach dem TRY 185 Stunden und nach Meteonorm 432 Stunden. Der höchste Wert wird vom DWD mit 531 W/m<sup>2</sup> der niedrigste von Meteonorm mit 418 W/m erreicht.

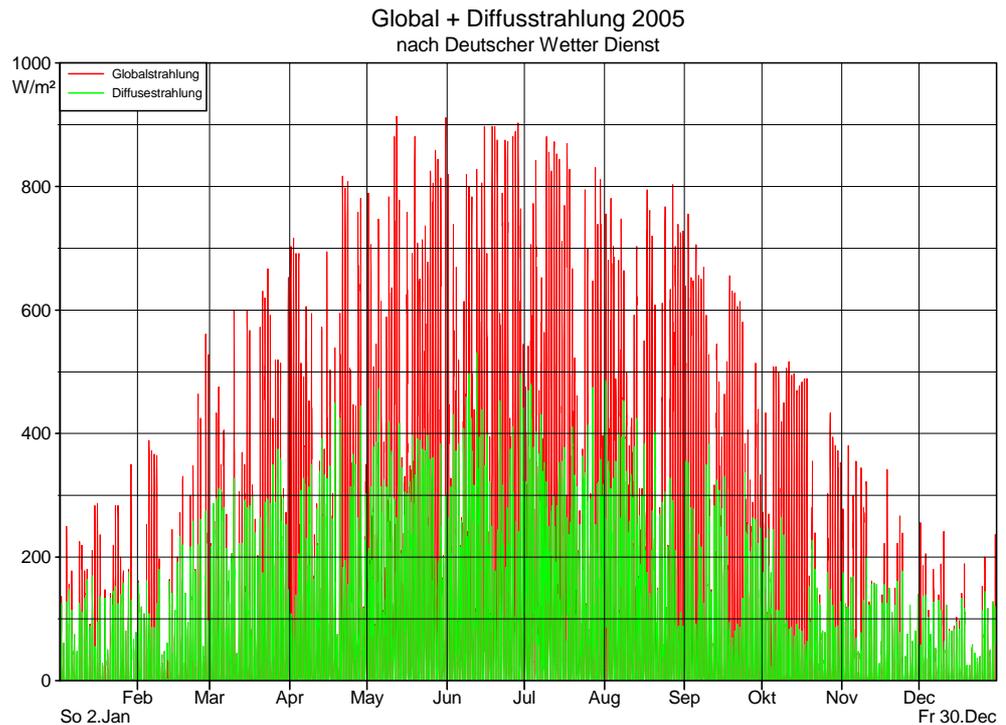


Abbildung 53 - Globale und diffuse Strahlung nach DWD 2005 (Standort Bochum)

	GLT Bob	DWD Station Bochum	TRY Nr. 02	Meteo- norm
<b>Globalstrahlung</b>				
> 600 W/m <sup>2</sup>	-	424 h	327 h	321 h
Maximal	-	914 W/m	1.007 W/m	911 W/m
<b>Diffusstrahlung</b>				
> 300 W/m	-	324 h	185 h	432 h
Maximal	-	531 W/m	489 W/m	418 W/m

Abbildung 54 - Häufigkeit und Maximalwert der Global- und Diffusstrahlung

Vor Ort zeigt sich der Winter als kürzer als die anderen Wetteraufzeichnungen für den Standort Aachen. Die Temperaturverteilung im Winter hingegen ist mit den Messdaten vom Deutschen Wetter Dienst gleichzustellen. Der Sommer hebt sich deutlich von den „alten“ Daten des TRY und den statistisch ermittelten Werten nach Meteonorm ab. Die Häufigkeit von höheren Temperaturen oberhalb von 26°C ist bei diesen weit unter 100 Stunden. DWD und die vor Ort gemessenen Temperaturen sind hingegen deutlich höher. Die Häufigkeit nimmt dort sogar um das 3 bis 4fache zu.

Bei den Strahlungsdaten ist eine Übereinstimmung von DWD und vor Ort aufgezeichneten Daten nur indirekt möglich. Aufgrund der Gleichförmigkeit der zuvor besprochenen Temperaturwerte, kann man auch von ähnlichen Strahlungsdaten der beiden Datensätze ausgehen.

Insbesondere für die nachfolgende Gebäudesimulation des IST-Zustandes sind die aktuellen Wetterdaten von Bedeutung. Die Daten des Deutschen Wetter Dienstes 2005 werden für die neue Berechnung der Simulation zu Grunde gelegt.

### 7.1.3 Abgleich der Simulation

In diesem Kapitel werden zunächst die Randbedingungen und die Ergebnisse der beiden Simulationen – zum Zeitpunkt der Planung (2002) und dem umgesetzten IST Zustand - dargestellt. In das aktuelle Berechnungsmodell wurden die Änderungen an Konstruktionen und Technik die während der Bauphase aufgetreten sind berücksichtigt. Im nächsten Schritt werden die aktuellen Ergebnisse der Gebäudesimulation mit den gemessenen Energie-Werten verglichen und bewertet.

Bei den Konstruktionen ergaben sich im Verlauf der Angebotsphase geringfügige Unterschiede hauptsächlich in der Materialstärke der Dämmung, in der Verglasung und der äußeren Fassadenausführung. Die ausgeführten Konstruktionen sind aus thermischer Sicht in der Regel besser ausgeführt. Bei den Rahmen der Fenster wurde Passivhaus taugliche Rahmen mit einem U-Wert von  $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  eingesetzt, anstatt wie in dem Planungsmodell mit  $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Die Dämmung in der Bodenplatte und im Dach wurden stärker ausgeführt, so dass hier U-Werte von  $0,27$  bzw.  $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$  anstelle von  $0,29$  bzw.  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht werden.

Die Qualität der Verglasungen, insbesondere der g-Wert, haben nur geringfügige Unterschiede. Ebenso der U-Wert der Treppenhausverglasung ist im aktuellen Zustand mit  $U=1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$  und somit 8% besser ausgeführt als zum Zeitpunkt der Planung. Der mittlere U-Wert der Gebäudehülle ist im IST-Zustand damit um 12% geringer als in dem Modell der Planung.

Der Blendschutz wird nun nicht mehr auf der Nordseite berücksichtigt und wird 24 Stunden im Sommer wie auch im Winter als geschlossen angenommen. Dies spiegelt recht gut die Nutzung des Blendschutzes wieder, da es im Gebäude viele Bildschirmarbeitsplätze gibt. Die Nutzung des Blendschutzes mit Tageslichtlenkung wird dennoch sehr dynamisch von den Mitarbeitern genutzt.

Zum Zeitpunkt der Planung stand noch nicht die Nachbarbebauung fest, so dass diese damals vernachlässigt wurde. Das Berechnungsmodell stand frei und ohne Fremdverschattung. Im aktuellen Modell ist das Bürogebäude im Osten und die Einfamilienwohnhäuser im Süden berücksichtigt worden.

		Simulation Planung 2002 [W/m <sup>2</sup> K]	Simulation IST 2005 [W/m <sup>2</sup> K]
Verglasung	Fenster	WSV 69/50 - U=0,80	WSV 69/52 - U=0,80
Verglasung	Treppenhaus	WSV 73/63 - U=1,40	WSV 74/58 - U=1,30
Rahmen	Fenster	U=1,50	U=0,80
Fassade W1 –	Regelfassade	U=0,16	U=0,17
Fassade W2 –	HA Raum	U=0,44	U=0,38
Fassade W3 –	Besprechungsraum	U=0,26	U=0,32
Fassade –	Fahrstuhl	U=1,40	U=1,23
Boden G1 –	Büroräume	U=0,29	U=0,27
Boden G2 –	Treppenhaus	-	U=0,25
Dach D1		U=0,20	U=0,18
mittlerer U-Wert		U=0,49	U=0,43

Tabelle 21 - Unterschiede in den U-Werten der Konstruktionen bei den Simulationsmodellen: Planung und IST-Zustand



Abbildung 55 – Schattendarstellung im aktuellen Modell für einen Tag im März um 9<sup>00</sup> Uhr

Das Gebäude ist sehr luftdicht ausgeführt und weist damit einen sehr niedrigen Infiltrationswert – ermittelt durch einen Blower-Door Test – auf. Für die IST-Simulation konnte somit ein erheblich geringer Wert (Infiltration = 0,03 1/h) angesetzt werden.

Weiter Modellanpassungen waren in der Nutzung durch Personen, Geräte und Beleuchtung notwendig. Eine genaue Erhebung der Anzahl der Personen in den Nutzungseinheiten sowie die genutzten Geräte wie Computer und Monitore wurden zum Abgleich der inneren

Wärmelasten herangezogen. Mittels des Stromverbrauchs der elektrischen Arbeitsmittel konnten durchschnittliche Daten ermittelt werden. Ebenso wurde mit der mittlere Beleuchtungslast verfahren.

		<b>Simulation Planung</b>	<b>Simulation IST</b>
		<b>2002</b>	<b>2005</b>
Arbeitszeiten		8 <sup>00</sup> – 18 <sup>00</sup> Uhr	8 <sup>00</sup> – 19 <sup>00</sup> Uhr
Personen	spezifisch [W/m <sup>2</sup> ]	7,0 – 9,0 *	7,6
	absolut [kWh/a]	21.783	17.075
Arbeitsmittel	spezifisch [W/m <sup>2</sup> ]	15,0 – 20,0 *	24,0
	absolut [kWh/a]	40.189	67.206
Beleuchtung	spezifisch [W/m <sup>2</sup> ]	15,0 - 0*	4,5
	absolut [kWh/a]	22.145	23.769

*Tabelle 22 - Gegenüberstellung der inneren Wärmelasten bei den Simulationsmodellen Planung und IST-Zustand (\* die höheren Werte gelten für den Winterfall)*

Abschließend wurde die Technik dort angepasst wo entscheidende Veränderungen vorlagen. Das betraf die Betriebszeiten der BKT, die nun 24 Stunden und die gesamte Woche in betrieb ist. Im Heizbetrieb wird diese mit 24°C und im Kühlbetrieb mit 19°C gefahren.

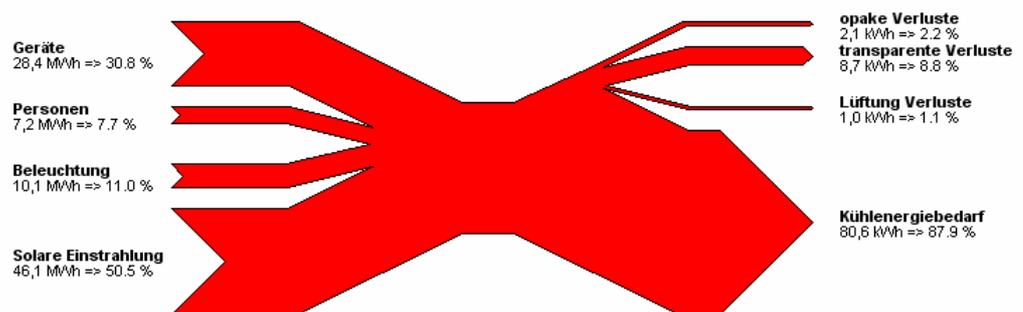
Die Lüftungsanlage läuft nicht mehr 24 Stunde sondern nur noch zur Arbeitszeit sowie am Wochenende für 2 Stunden um eine Frischluftspülung (Gerüche) durchzuführen.

		Simulation Planung	Simulation IST
		2002	2005
Temperatur BKT	heizen / kühlen	23°C / 20°C	24°C / 19°C
Betriebszeiten BKT		Mo. – Fr.	Mo. – So.
Temperaturen RLТ	heizen / kühlen	20°C / 26°C	adiabat
Betriebszeiten RLТ		Mo. – Fr. 24h	Mo. – Fr. 7 <sup>00</sup> - 19 <sup>00</sup> Uhr

*Tabelle 23 - Änderungen der Technik und der entsprechenden Regelung bei den Simulationsmodellen: Planung und IST-Zustand*

Bei Betrachtung der Energiebilanz für das Gebäude zeigt sich das die Wärmequelle von Personen, Geräte, Beleuchtung und der solaren Einstrahlung in der Summe etwa die gleiche Größenordnung bei den Simulationsmodellen aufweisen. Dem gegenüber stehen die Verluste über transparent und opake Bauteile sowie den Lüftungsverlusten.

Insbesondere die Verluste für die Frischluft sind im Modell der Planung erheblich größer. Gründe für den o.g. Mehrbedarf der Lüftung sind die längeren Laufzeiten der Anlage, sowie die höhere Infiltration. Der Heizenergiebedarf für die BKT zeigt sich in beiden Modellen als weitgehend identisch (vgl. Abbildung 57).



*Abbildung 56 – Energiebilanz im Sommer Simulation IST 2005*

Wirkt sich die bessere Gebäudehülle im Heizfall positiv auf den Heizenergiebedarf aus, so sorgt sie im Kühlfall für höheren Bedarf an Kühlenergie. Die Auskühlung (Wärmesenken) im Sommer über die Konstruktionen und Lüftung sind ebenso gering. Der Kühlenergiebedarf beläuft sich im Modell für den IST-Zustand auf ~91.600 kWh/a.

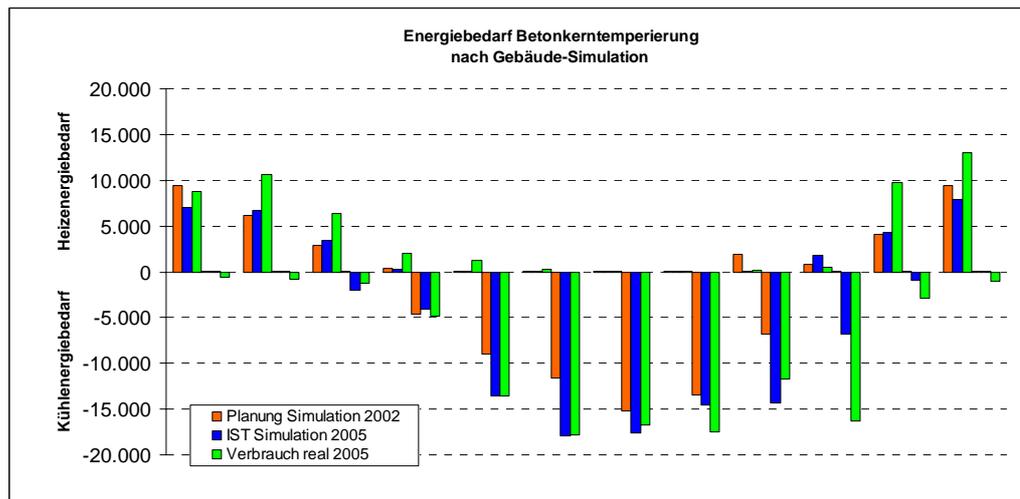


Abbildung 57 - Energiebedarf der BKT für die Simulationsmodelle: Planung und IST-Zustand sowie dem realen Verbrauch für 2005

## 7.2 Verbrauch elektrische Energie

Da das Gebäude ausschließlich mit Strom betrieben wird, liegt hier ein wesentlicher Schwerpunkt der Messungen. Strom weist den schlechtesten Primärenergiefaktor auf, begründet durch die ungünstige Erzeugung und den dort entsprechenden Verteilverluste. Daher hat die Vermeidung von Strom oder zumindest die wesentliche Reduzierung auf ein Mindestmaß – insbesondere in diesem Forschungsprojekt – die oberste Priorität.

In den drei Bereichen Heizung/Kühlung, Beleuchtung und Arbeitshilfen steht jeweils Strom im Vordergrund. Für Beheizung- bzw. Kühlung der Räumlichkeiten wird Erdwärme genutzt, welche von den Erdwärmesonden bereitgestellt wird. Die Erdwärme ist primärenergetisch als Neutral zu betrachten, doch muss sie mittels elektrischer Pumpen gefördert werden. Von dort gelangt sie zur Wärmepumpe die ebenfalls elektrisch angetrieben wird. Die Verteilung der Wärmeenergie in die jeweiligen Etagen wird wiederum über Pumpen realisiert. Die mechanische Frischluftversorgung der Büroräume erfolgt über die Lüftungsgeräte mit elektrisch betriebenen Ventilatoren.

Weitere wichtige elektrische Verbraucher sind die Kunstlichtbeleuchtung, die elektrischen Arbeitsmittel (wie z.B. PCs, Kopierer, Drucker), den Aufzug und die Warmwasserbereitung in den Tee-Küchen.

Die Tabelle 24 zeigt den Energieverbrauch für Strom im Jahr 2005. Mit dem PE-Faktor von 3,0 erreicht das Gebäude nach Solarbau-Richtlinien einen PE-Kennwert von 83,7 kWh/m<sup>2</sup>a. Den höchsten Wert erzielt hierbei die Beleuchtung der Büroräume mit 10,8 kWh/m<sup>2</sup>a, gefolgt von der Wärmeerzeugung mit 6,6 kWh/m<sup>2</sup>a. Die Förderung von Frischluft schlägt mit 4,3 und die Kälteerzeugung mit 3,3 kWh/m<sup>2</sup>a zu buche. Den Abschluss bildet der Stromverbrauch für die Sekundärpumpen mit 2,7 kWh/m<sup>2</sup>a.

Weitere Verbrauchsgruppen außerhalb der Bilanzgrenze von Solarbau wie Aufzug und Arbeitsmittel sind in dem unteren Teil der Tabelle aufgeführt. Die Arbeitsmittel stellen den größten Anteil mit 37 kWh/m<sup>2</sup>a an dem PE-Kennwert dar (s. Kapitel 7.2.4).

Sonstige Verbraucher auf dem Stromzähler „Allgemein“ sind neben den o.g. Sekundärpumpen die Beleuchtung des Parkplatzes sowie des Treppenhauses in den Abendstunden und weitere Verbraucher wie die Regenwasserpumpe. Hier fallen noch mal 2,4 kWh/m<sup>2</sup>a an.

Weniger ins Gewicht fallen die Durchlauferhitzer und der Aufzug im Gebäude mit 0,3 bzw. 0,4 kWh/m<sup>2</sup>a.

<b>Energieverbrauch BOB 2005</b>	spezifischer Verbrauch [kWh/m <sup>2</sup> a]	Absoluter Verbrauch [kWh/a]
Heizung (WP + Primär-Pumpe)	6,6	13.708
Kühlung (Primär Pumpe)	3,5	7.293
Luftförderung	4,3	9.008
Beleuchtung	10,8	22.397
Sekundär-Pumpen	2,7	5.725
Summe	27,9	58.131
<b>Primärenergiebedarf</b>	<b>83,7</b>	<b>174.393</b>
<b>Bilanz nach Solarbau</b>		
Warmwasserbereitung	0,3	623
Aufzug	0,4	780
Beleuchtung (Außen + TRH), Regenwasserpumpe	2,4	5.002
Arbeitsmittel (PC, Drucker, Monitor)	37,0	76.583
Summe	40,1	82.988
<b>Primärenergiebedarf</b>	<b>120,3</b>	<b>248.964</b>
<b>Bilanz Sonstige</b>		

*Tabelle 24 - Energieverbrauch von elektrischer Energie in 2005 nach Verbrauchsgruppen*

Die Abbildung 58 zeigt den spezifischen Stromverbrauch in den Jahren 2004 bis 2006 mit den Verbrauchsgruppen für die Bilanzgrenze nach Solarbau. Erwähnenswert sind die Absenkung des Stromverbrauches zur Erzeugung von Wärme um 22% und der damit verbundene Verbrauch der Sekundär-Pumpen um 20%. Der Stromverbrauch für Kühlung ist geringfügig gesunken. Die Beleuchtung konnte um 13% abgesenkt werden. Allein die Belüftung nimmt um 11% zu.

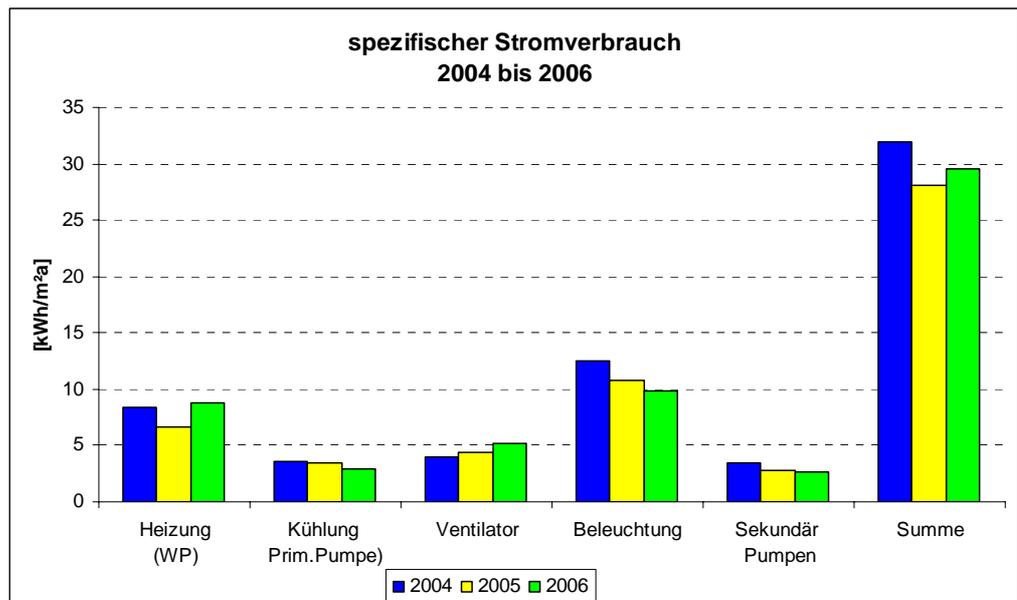


Abbildung 58 - spezifischer Stromverbrauch Bilanzgrenze Solarbau nach Verbrauchsgruppen unterteilt für die Jahre 2004 bis 2006

### 7.2.1 Beleuchtung

Im Mittel sind in den Etagen 7,5 W Beleuchtung installiert. Damit werden am Arbeitsplatz bis 500 lux erreicht. Die Zielwerte zwischen 3,5 bis 12 kWh/m²a nach LEE werden überwiegend eingehalten.

Von 2004 an nimmt der spezifische Stromverbrauch für Beleuchtung stetig für alle Nutzungseinheiten ab. Mit 5,3 kWh/m²a heben sich die Nutzungseinheiten 2006 im 1.OG links und im 2.OG mit dem niedrigsten Wert von den anderen ab. Der geplant Wert von 10 kWh/m²a wird mit 15% bis knapp 100% von den anderen Nutzungseinheiten überschritten. Die Verbrauchswerte liegen aber noch im Bereich des Grenzwertes von 22 kWh/m²a nach LEE für Räume mit geringem Tageslichtanteil.

Die durchschnittliche Jahresnutzungsdauer betrug 2006 - Vollnutzung vorausgesetzt - 1.500 Stunden. Der Grenzwert nach der „Frankfurter-Liste“ sieht 1.000 Beleuchtungsstunden vor. Durch die niedrig installierte Leistung wird nach:

$$\text{Jahresnutzungsdauer} \times \text{installierte Leistung} \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

ein Jahresenergieverbrauch von 11,25 kWh/m² erreicht und liegt damit im Grenzwertbereich der „Frankfurter-Liste“ zwischen 10 und 12 kWh/m².

	2003 [kWh/m <sup>2</sup> a]	2004 [kWh/m <sup>2</sup> a]	2005 [kWh/m <sup>2</sup> a]	2006 [kWh/m <sup>2</sup> a]
EG	20,4	24,1	20,2	19,8
1.OG li.	5,4	5,6	5,6	5,3
1.OG re.	13,9	14,4	12,6	11,5
2.OG	5,1	5,6	5,6	5,3
3.OG	10,0	20,0	16,7	12,5

Tabelle 25 - spezifischer Verbrauch für Beleuchtung in den jeweiligen Nutzungseinheiten in den Jahren 2004 bis 2006

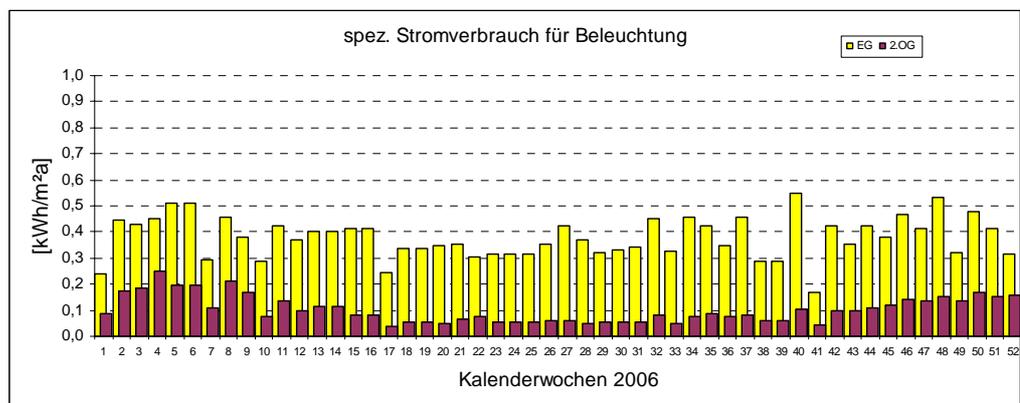


Abbildung 59 - wöchentlicher Endenergieverbrauch 2006 für die Beleuchtung im EG und im 2.OG

Insbesondere das EG sowie das 3.OG treten hier besonders vor. Beide Nutzungseinheiten haben dunkle Holzböden die weniger Licht reflektieren. Weiterhin weisen diese Nutzungseinheiten eine hohe Personendichte auf. Das bedeutet, dass sich ein Teil der Arbeitsplätze nicht mehr in Fensternähe befindet und somit nicht ausreichend Tageslicht erhält.

Im Erdgeschoss ist durch die Nachbarbebauung zum Teil noch weniger Tageslicht verfügbar. Weiterhin sind zum einen die Innenwände weniger transparent ausgeführt, so dass in der Mittelzone der Tageslichtanteil praktisch gleich null ist.

Die Tageslichtsteuerung wurde 2005 zunächst nur im 2.OG angewendet und 2006 dann auf das gesamte Gebäude ausgedehnt. Im 2.OG ist der Energieverbrauch für die Beleuchtung bei aktivierter tageslichtabhängiger Beleuchtungsteuerung leicht gesunken. Der Einspareffekt ist jedoch weniger hoch als erwartet ausgefallen. Ein Grund dafür ist, dass die Einsparung durch die erhöhte Nutzung und zunehmende Bürobelegung zu einem Teil kompensiert worden ist.

Im 1.OG links ist im Vergleich zum EG ein sehr geringer Bedarf für die Beleuchtung zu erkennen. Dort arbeiten wenige Personen an hoch technisierten Arbeitsplätzen. Hohe Beleuchtungsstärken werden vielfach eher als störend empfunden. Teilweise wird an diesen

Arbeitsplätzen eine Tischleuchte benutzt. Entsprechend dem geringen Beleuchtungsbedarf ist der spezifische Verbrauch für die Arbeitsmittel im Vergleich mit den anderen Nutzungseinheiten sehr hoch (siehe Kapitel 7.2.4).

## 7.2.2 Belüftung

Das Bürogebäude ist als Nichtrauchergebäude konzipiert und hat nach LEE einen Zielwert von 6 kWh/m<sup>2</sup>a für die maschinelle Belüftung. Der spezifische Stromverbrauch steigt in den Jahren 2004 bis 2006 in allen Etagen stetig an. Das EG erreichte in den betrachteten Jahren immer einen höheren Verbrauchswert, in 2006 bis 9,8 kWh/m<sup>2</sup>a. Im gleichen Jahr überschreitet auch das 3.OG den nach LEE gesetzten Zielwert. Der Verbrauch der Lüftungsgeräte in den beiden anderen Etagen hingegen nicht.

Die Gründe für die variierenden Werte sind vielfältiger Natur. Zum einen ist es die hohe Belegungsdichte einiger Büros die höhere Luftmengen notwendig machen. Zum anderen wird die Lüftung oft dem temporären individuellen Bedarf angepasst. Dazu wird am Lüftungsgerät die Lüftungsstufe „per Hand“ eingestellt und oft nicht zurück gestellt. Damit wird aber auch der Vorgabewert der GLT übersteuert.

Der geplante Verbrauchswert von 2,0 kWh/m<sup>2</sup>a wird annähernd vom 2.OG erreicht, da hier auch die berücksichtigte Gleichzeitigkeit (vgl. Kapitel 4.3.1) von 50% eingehalten wird. Die Mitarbeiter befinden sich häufig auf Auswärtsterminen, so dass hier die geringere Luftmenge ausreicht. In den anderen Nutzungseinheiten zeigt es sich, dass diese Annahme nicht zutrifft. Es handelt sich zumeist um regelmäßig besetzte Arbeitsplätze.

	2003 [kWh/m <sup>2</sup> a]	2004 [kWh/m <sup>2</sup> a]	2005 [kWh/m <sup>2</sup> a]	2006 [kWh/m <sup>2</sup> a]
EG	10,0	7,4	7,7	9,8
1.OG	9,6	3,9	4,8	5,4
2.OG	2,2	2,0	2,5	2,7
3.OG	9,7	5,3	5,5	6,9

*Tabelle 26 - spezifischer Verbrauch für die Lüftungsgeräte in den jeweiligen Nutzungseinheiten in den Jahren 2003 bis 2006*

Für die installierte Leistung für Luftförderung ist bei der „Frankfurter-Liste“ e als Grenzwert 3 bis 10 W/m<sup>2</sup> gesetzt. Die Lüftungsgeräte mit jeweils 1,2 KW Anschlussleistung erzielen für das Bob-Gebäude 2,5 W/m<sup>2</sup> installierte elektrische Leistung. Die Volllaststunden der Lüftung betragen im Jahr 3.068 h und somit mehr als 300 Stunden oberhalb des Grenzwertes. Die elektrische Energie zur Luftförderung beträgt bei Bob entsprechend 7,7 kWh/m<sup>2</sup> berechnet nach „Frankfurter-Liste“. Bezieht man den Stromverbrauch von 10.855 kWh im Jahr 2006 auf die Nutzfläche, so erhält man 6,2 kWh/m<sup>2</sup>a.

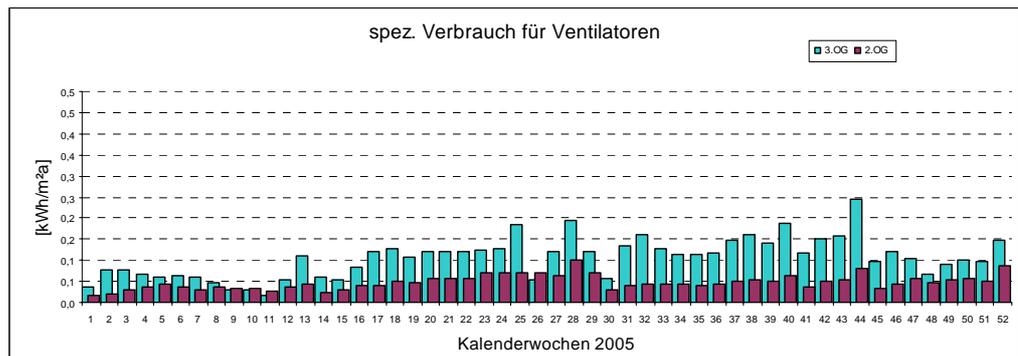


Abbildung 60 - wöchentlicher spezifischer Stromverbrauch für die Belüftung 2005 im 2. OG und 3.OG

In der Abbildung 60 ist der Unterschied zwischen dem 2. und 3. OG im elektrischen Verbrauch für die Lüftung im Jahr 2005 zu erkennen. Der Mehrverbrauch im 3.OG zeigt sich ab dem ersten Vierteljahr besonders deutlich. Auch sind die unregelmäßigen Schwankungen die durch das manuelle Eingreifen auf das Lüftungsgerät zu erkennen.

### 7.2.3 Durchlauferhitzer

Der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung ist erwartungsgemäß gering und bleibt von Jahr zu Jahr annähernd gleich. Er betrug im Jahr 2005 für das gesamte Gebäude 623,6 kWh. Es zeigt sich ein spezifischer Stromverbrauch von 0,4 kWh/m²a. Dieser Wert ist für die Solarbau Bilanz nicht relevant.

Neben der unterschiedlichen Belegung spielen besonders beim Warmwasser unterschiedliche Komfortbedürfnisse eine Rolle. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich zwischen dem EG und 3.OG. Aus 2 anderen Nutzungseinheiten konnten keine Daten erhoben werden, da die entsprechenden Zähler nicht angeschlossen worden waren.

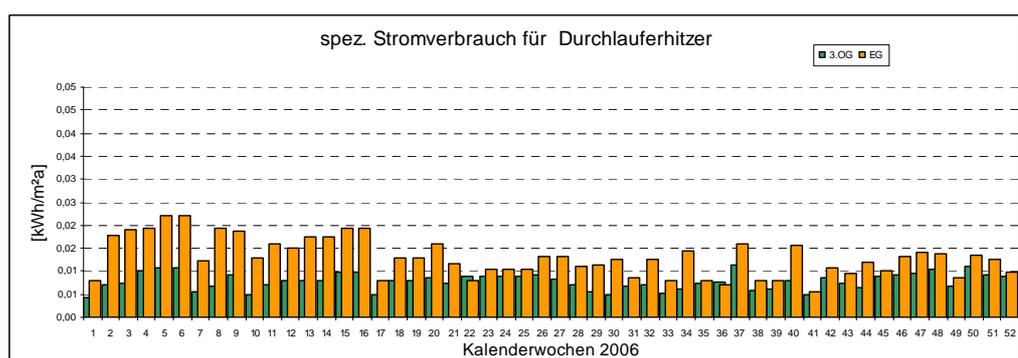


Abbildung 61 - Wöchentlicher spezifischer Stromverbrauch für die Durchlauferhitzer 2006 im EG und im 3.OG

## 7.2.4 Arbeitsmittel

Zu den elektrischen Arbeitsmitteln zählen neben den Computern und Monitoren, die Druckermedien, zusätzliche Tischleuchten sowie Netzteile für Kleingeräte wie Mobiltelefone und Akkuladegeräte etc. Auch werden Kühlschränke und Mikrowellengeräte sowie die Kreispumpen der BKT mit auf den Stromzählern erfasst. Diese Geräte fallen somit mit in die Betrachtung der in Kapitel 6.6.1 beschriebene Differenzbildung.

Einen relativ stetigen Verbrauch zwischen den Jahren 2004 bis 2006 weisen die Büros im EG sowie im 1.OG rechts und links auf. Im 2. und 3. OG hingegen steigt der Bedarf. Die Nutzungseinheit 1.OG links weist 2006 den höchsten Stand mit 78,2 kWh/m<sup>2</sup>a auf; den niedrigsten Verbrauch hat die Nachbareinheit auf der gleichen Etage mit 28,2 kWh/m<sup>2</sup>a. Insgesamt ist von 2004 auf 2006 ein Anstieg von 14% des Stromverbrauchs für Arbeitsmittel zu verzeichnen.

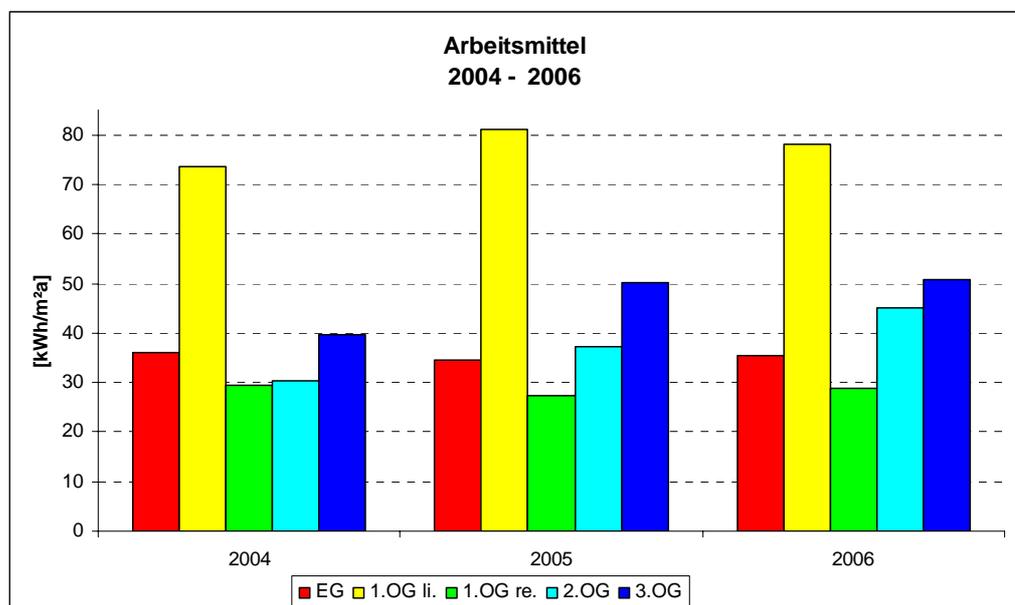


Abbildung 62 - spezifischer Stromverbrauch der Arbeitsmittel in den Jahren 2004 bis 2006

Die Gründe dafür sind recht unterschiedlich, wie es auch die Aufgaben der unterschiedlichen Unternehmen sind. Allgemein zeigt sich der Ersatz von Altgeräten durch neue energieeffizientere Geräte, wie z.B. der Austausch von Flachbildschirmen (TFT) gegen herkömmliche (Röhren-) Monitore als Energie sparende Maßnahme. Dem steht zum einem die Zunahme von Personal (2. und 3.OG) mit entsprechenden Arbeitsgeräten gegenüber, als auch längere Nutzungszeiten dieser Geräte.

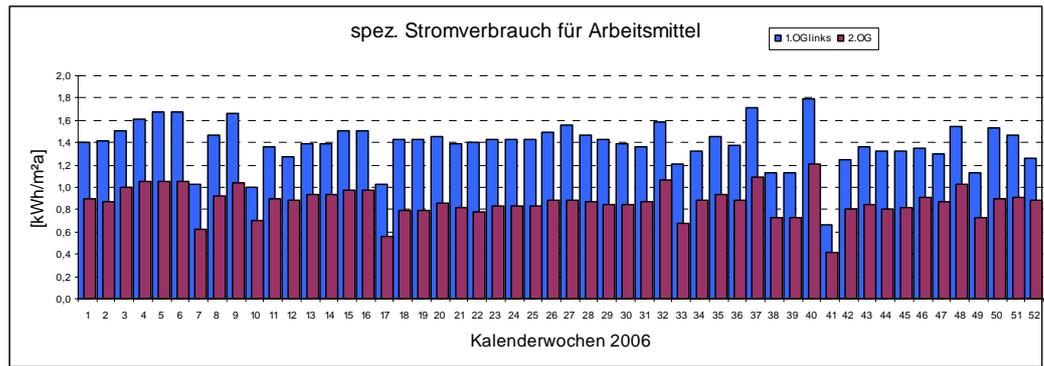


Abbildung 63 - wöchentlicher spezifischer Stromverbrauch für die Arbeitsmittel im 1.OG links und 2.OG in 2006

Sehr hohen Bedarf an Arbeitsmitteln weist das 1.OG links auf Grund der sehr umfangreichen Ausstattung der Arbeitsplätze auf. Die Arbeitsplätze verfügen zum Teil über zwei PCs mit zwei oder drei Bildschirmen. Des Weiteren gibt es unterschiedlichste Versuchs-Apparaturen die elektrisch betriebene werden und deren Energieverbrauch sich im normalen Arbeitsverlauf nicht bestimmen lässt.

Durch die differenzierte Betrachtung des Stromverbrauchs im 2.OG ab dem Jahr 2005 konnte der Verbrauch nochmals zwischen PC und Sonstige Verbraucher getrennt betrachtet werden. Es zeigt sich dass der Gesamtverbrauch in 2006 etwa um 50 % bezogen auf das Jahr 2004 angestiegen ist. Erfuhr der Stromverbrauch von Computern nur einen geringen Anstieg von 2,0 kWh/m<sup>2</sup>a so verdoppelte sich der Stromverbrauch von Sonstigen Geräten von 2005 auf 2006. Eine Begründung hierfür konnte nicht gefunden werden.

	2003 [kWh/m <sup>2</sup> a]	2004 [kWh/m <sup>2</sup> a]	2005 [kWh/m <sup>2</sup> a]	2006 [kWh/m <sup>2</sup> a]
2.OG - Gesamt	28,8	30,2	37,4	45,2
2.OG - PC	-	-	27,0	29,0
2.OG - Sonstige	-	-	4,5	10,1

Tabelle 27 - Stromverbrauch für die elektrischen Arbeitsmittel im 2.OG in den Jahren 2004 bis 2006

Die so genannte Druckerinsel im 2.OG wurde ebenfalls mit Energiezählern erfasst. Dazu wurden jeweils ein Laserdrucker (schwarz/weiß) ein Tintendrucker (Farbe) und ein Kopiergerät wöchentlich abgelesen. Für die beiden Drucker (Laser und Tinte) ergaben sich ein durchschnittlicher Wochenverbrauch von 0,34 bzw. 0,45 kWh. Das Kopiergerät lag erwartungsgemäß höher bei 4,17 kWh pro Woche.

Zu Beginn der Messung in 2005, ab der 10. Kalenderwoche, wurde das Kopiergerät gegen ein neues Gerät ausgetauscht. Mit den neuen Funktionen diese Gerätes stieg die Nutzung und damit auch geringfügig der Verbrauch auf 4,33 kWh pro Woche. Gleichzeitig sinkt aber

auch der Verbrauch der beiden Drucker. Beim Tintenstrahldrucker zeigt sich ein ca. 6%iger und beim Laserdrucker ein ca. 16%iger Rückgang.

Fabrikat	Typ	Leistung in Bereitschaft [W]
Tintendrucker - HP 1220C (DIN A 3)	Tinte - Farbe	5,0
Laserdrucker - Konica Minolta Magiccolor 2300 DL	Toner - Farbe	4,4
Kopiergerät - alt	Toner - Schwarz	13,0
Kopiergerät - neu Triumph-Adler DC 2125	Toner - Schwarz	

Tabelle 28 - Liste der Drucker und Kopierer im 2.OG

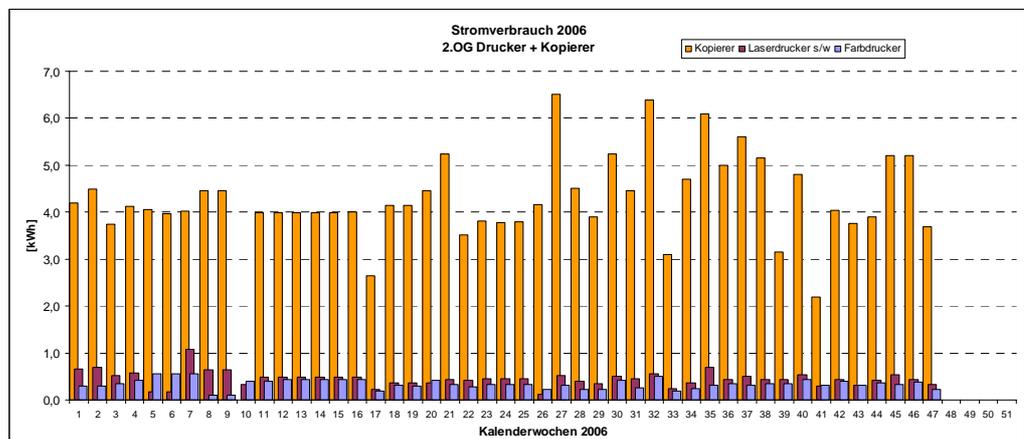


Abbildung 64 - wöchentlicher Stromverbrauch im 2.OG für die Drucker und Kopierer im Jahr 2006

## 7.2.5 Pumpen

Aussagen über den Stromverbrauch der Transportpumpen kann wie in Kapitel 6.1.3 erläutert, indirekt über die Laufzeiten getroffen werden. Folgende Pumpen werden betrachtet:

- Primärpumpe Sole - 1M3 2,2 KW
- Ladepumpe Speicher - 1M4 0,14 KW
- Entladepumpe heizen - 2M5 0,28 KW
- Entladepumpe kühlen - 2M1 0,28 KW
- BKT Hauptpumpe 0,28 KW
- Lüftungspumpe 0,06 KW
- Wärmepumpe (Verdichter) 13,0 KW

Die beiden Kreispumpen in den jeweiligen Etagen können nicht differenzierter betrachtet werden, da die Laufzeiten nicht aufgezeichnet werden.

Der Profilverlauf der Laufzeiten aus Abbildung 65 zeigt deutlich den Bedarf an Wärme und Kälte entsprechend den Jahreszeiten. Der Verdichter der Wärmepumpe arbeitet selbstverständlich hauptsächlich zur Winterzeit. Zwischen Mitte April bis Ende Oktober werden nur noch wenige Betriebsstunden aufgezeichnet.

Die Primärpumpe läuft ganzjährig da sie Wärme- und insbesondere Kälteenergie zur Verfügung stellt. Das ist besonders in den Sommerwochen 26 bis 32 sowie 37 bis 39 zu erkennen. Zur gleichen Zeit ist dann auch die Entladepumpe für die Bereitstellung von Kälteenergie in Betrieb.

Die Ladepumpe für den Wärmespeicher springt dann an, wenn auch der Verdichter arbeitet. Die erzeugte Wärme wird direkt in den Speicher geladen und von dort wird sie entsprechend über die Entladepumpe 2M5 (Wärme) in das System gespeist.

	2005 [kWh/m <sup>2</sup> a]	2006 [kWh/m <sup>2</sup> a]
Wärmepumpe	5,1	6,8
Primärpumpe Sole (Wärmetransport) - 1M3	1,7	2,4
Primärpumpe Sole (Kältetransport) - 1M3	3,4	2,8
Ladepumpe Speicher	0,1	0,1
Entladepumpe (Wärmetransport) – 2M5	0,7	0,8
Entladepumpe (Kältetransport) – 2M1	0,9	0,8
BKT-Hauptpumpe (Wärmetransport)	0,6	0,5
BKT-Hauptpumpe (Kältetransport)	0,4	0,4
Summe	13,0	14,7

Tabelle 29 - spezifischer Stromverbrauch der Pumpen in 2005 und 2006 ermittelt über die wöchentlichen Laufzeiten

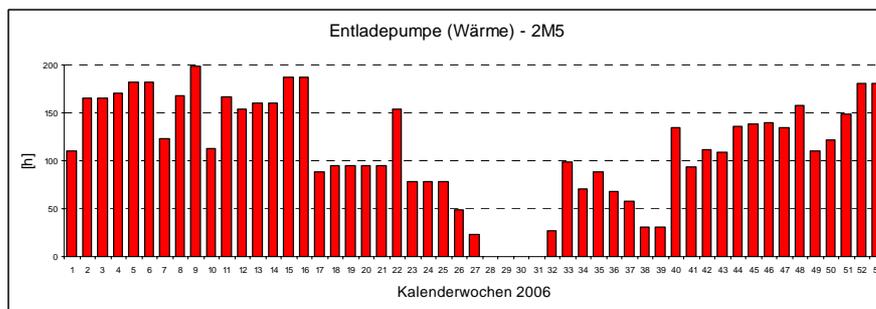
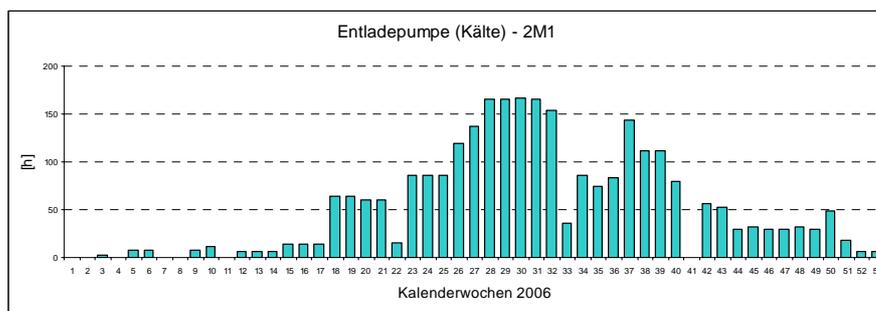
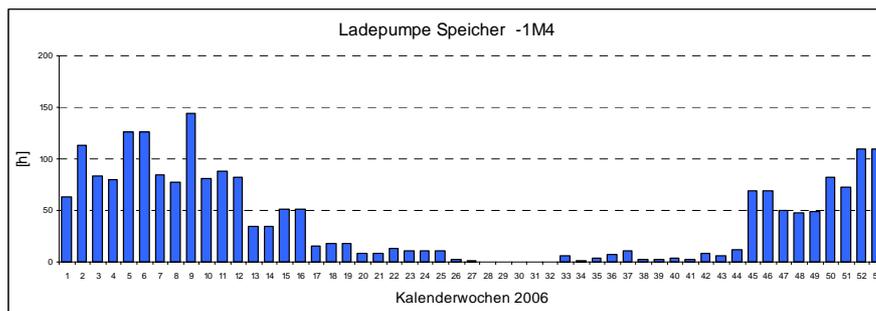
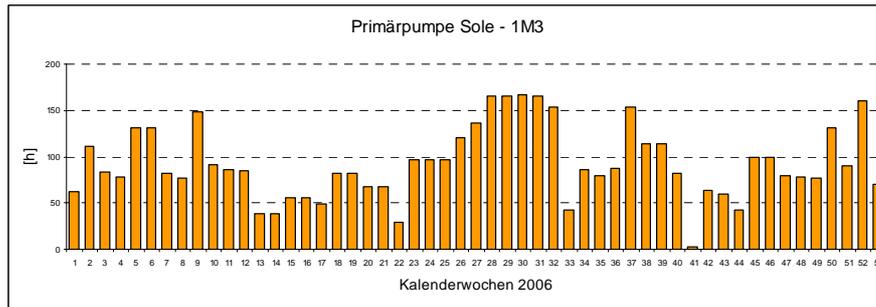
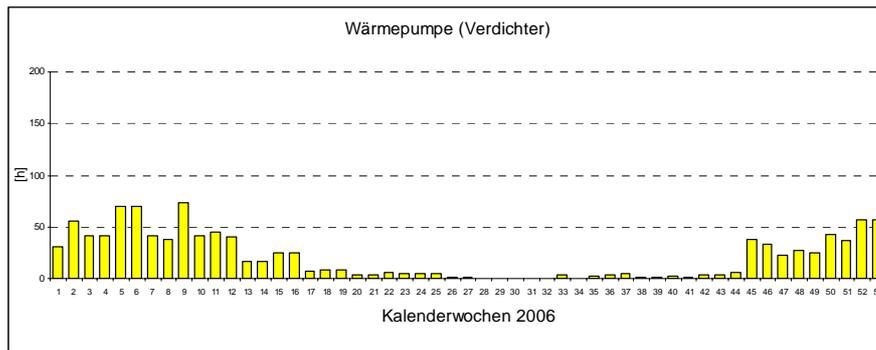


Abbildung 65 - Laufzeiten von Pumpen und Verdichter in 2006

## 7.3 Verbrauch thermische Energie

### 7.3.1 Heizenergie - Wärmepumpe

Der Zielwert des Projektes für den Heizenergieverbrauch von 83.000 kWh/a wird über die betrachteten Jahre eingehalten. Er ist aber größeren Schwankungen unterworfen. Lag der Verbrauch für 2003 und 2005 bei rund 54.000 bzw. 52.000 kWh/a so erreichte er 2004 fast 62.000 und 2006 sogar 72.000 kWh/a. Der spezifische und bereinigte Verbrauch nach VDI 3807 ist der Tabelle 5 zu entnehmen.

In 2003 wurde der Verbrauch aufgrund noch nicht eingebundener WMZ abgeschätzt. In den nachfolgenden Jahren wurden genaue Daten erhoben. Der Vergleich der Heizgradtage und den Temperaturbedingungen in den Heizperioden der betrachteten Jahre weist nur geringe Unterschiede auf, so dass hier die großen Differenzen nicht begründet sind.

Die Regelung nach den Referenzräumen wurde zum Jahreswechsel 2004 / 2005 auf die „Energiebedarfsgerechte Regelung“ umgestellt. Das führte zu einer Einsparung von 16%. Das nachfolgende Jahr 2006 verzeichnete wiederum einen Anstieg um fast 40%, was durch Fehler in der neuen Regelungstechnik verursacht wurde. Der neue Regelalgorithmus machte das Umschalten zwischen Kühlen und Heizen träger, so dass teilweise in Zeiten, in denen kein Energiebedarf existiert, weiter gekühlt oder geheizt wurde. Anschließend erkannte der Algorithmus die Auskühlung und Aufheizung des Gebäudes - die durch die Nutzer nicht bemerkt wurde - und arbeitete der vorherigen Kühl- oder Heizfunktion entgegen.

Dieser Fehler ist zwischenzeitlich behoben. Das Ziel, einen relativ großen Bereich zu generieren, in dem keine Heiz- oder Kühlanforderung existiert, wurde zudem ebenso erreicht, so dass der Energiebedarf für Heizung, Kühlung und Pumpenstrom weiter reduziert sein müsste. Die Auswertung der Energiedaten 2007 sollte dieses Ergebnis zeigen.

	Verbrauch Heizenergie [kWh/a]	spez. Verbrauch* [kWh/m <sup>2</sup> a]	Heizgradtage nach VDI 3807	JAZ [-]
Planung	83.000	40,0		> 4,0
2003	53.199	26,6	1.320	3,1
2004	61.897	30,6	1.334	3,5
2005	51.750	26,3	1.297	3,8
2006	72.088	36,3	1.310	3,9

Tabelle 30 - Heizwärme, spezifische Kennzahl (\* nach VDI 3807 bereinigt), die Anzahl der Heizgradtage sowie die Jahresarbeitszahl

In Verbindung mit Heizsystemen mit niedrigen Systemtemperaturen, wie es bei einer BKT der Fall ist, ist eine Arbeitszahl > 3,0 zu erwarten.

Die Arbeitszahl der Wärmepumpe in 2005 liegt bei 3,9. 2004 lag sie noch bei 3,5 und 2003 noch bei 3,1. Der Grund für die Erhöhung ist die Reduzierung der Soll-Temperatur der

Wärmepumpe. Diese arbeitete zu Beginn mit einer Soll-Temperatur von 40 °C. In 2004 wurde die Soll-Temperatur auf 30 °C reduziert. Weiterhin wurde zum Ende des Jahres die Regelstrategie verändert.

Die Berechnung der Arbeitszahl erfolgt inklusive des Strombedarfs für die Solepumpe. Dies entspricht der Standardenergiekennzahl (SKEZ), wie sie vom Wärmepumpentestzentrum ermittelt wird. Dabei wird für Sole/Wasser-WP pauschal ein Betrag von 2,6% zur Wärmepumpenleistung angesetzt.

Die Messungen berücksichtigen nicht die etwaigen Verluste eines Pufferspeichers. Arbeitszahlen die nach den neuen Testbedingungen der DIN EN 14511 ermittelt wurden, sind im Schnitt 4% geringer als nach der alten Prüfnorm EN 255.

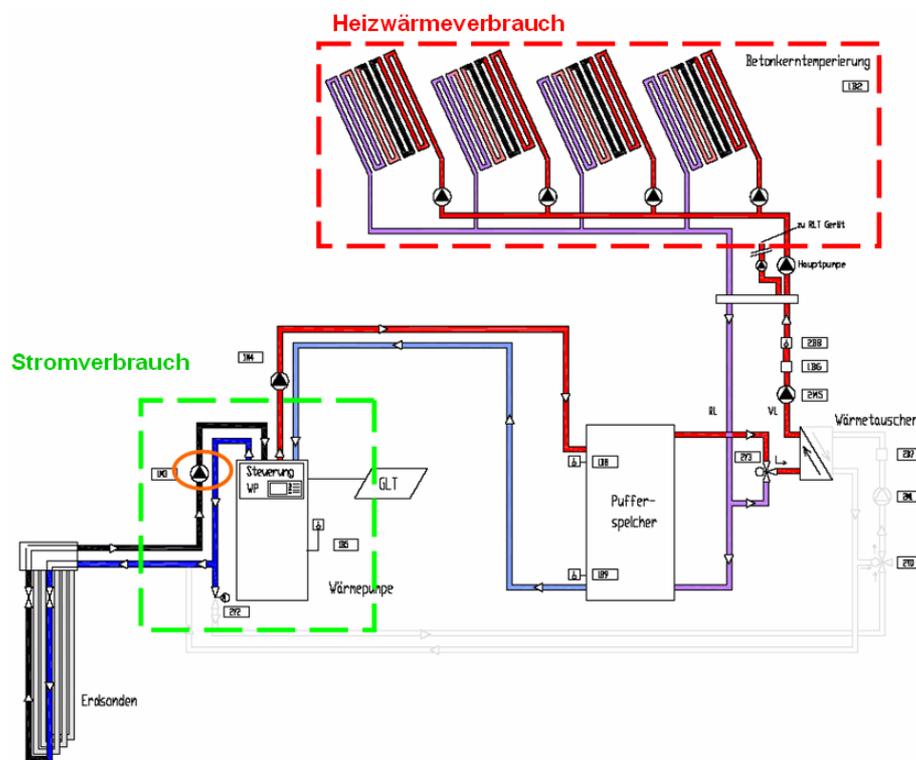


Abbildung 66 - Bilanzgrenze zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

### 7.3.2 Kühlenergiebereitstellung

Die Kühlenergie wird vollständig durch das Erdsondenfeld bereitgestellt. Damit ist für die Kühlenergieerzeugung einzig der Strombedarf für die Pumpen anzusetzen. Ein zusätzlicher Wärmemengenzähler zur Messung der Kälteenergie wurde 2005 eingebaut, liefert aber bislang keine brauchbaren Messwerte.

Eine Abschätzung ist über die Differenz der Vor- und Rücklauftemperatur der Sole sowie den Laufzeiten der Pumpen durchgeführt worden. Diese Abschätzung liefert einen Energieverbrauch für Kühlung von ca. 105.000 kWh/a oder einen spezifischen Verbrauch

von  $50,7 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Mit 3.315 Betriebsstunden der Primärpumpe für Kühlung ergibt sich eine Jahresarbeitszahl von 14.

Für eine mittlere Wärmelast von  $40 \text{ W/m}^2$  wird nach LEE (Leitfaden Elektrische Energie) von einer mittleren spezifischen Kühlleistung von  $13 \text{ W/m}^2$  ausgegangen. Für ein Büro ergibt sich daraus bei angenommenen 600 Vollbetriebsstunden (nach LEE) ein spezifischer Energieverbrauch für die Kühlung von  $7,8 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ .

Der reale Verbrauch für die Kühlung des Gebäudes betrug im Jahr 2005  $7.293 \text{ kWh}$ . Der spezifische Energieverbrauch für die Kühlung beträgt somit  $3,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Das ist im Vergleich zum verbesserten Richtwert nach LEE weniger als die Hälfte.

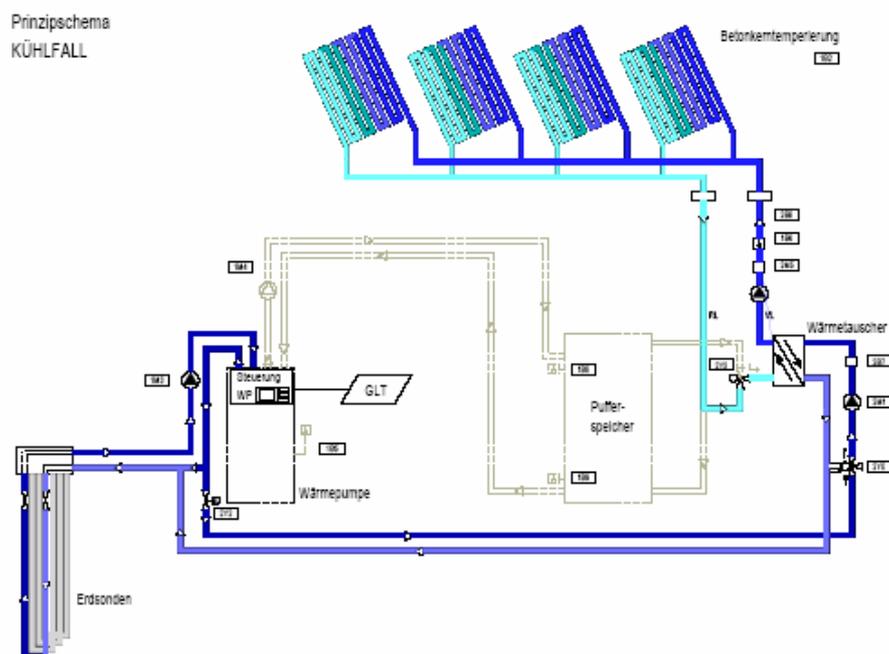


Abbildung 67 - Prinzipschema für den Kühlfall

### 7.3.3 Sondenfeld - Soletemperaturverhalten im Betrieb

Da das Gebäude sowohl gekühlt als auch beheizt wird, wird auch das Erdreich in 40 m Tiefe im Wechsel beheizt und gekühlt. Durch den äußerst trägen Wärmeaustauschmechanismus ist Wärme, die im Sommer in der Tiefe angelagert wird, im Winter als Heizwärme nutzbar. Im Sommer hingegen, wird die Kühlenergie genutzt, die im Winter dem Erdreich als Wärme entzogen wird.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Soletemperatur im Vergleich zur Außenlufttemperatur über einen mehrjährigen Zeitraum. Man erkennt dass im Mittel die Soletemperatur annähernd konstant ist (Trendlinie).

Da vor der ersten Heizperiode im Jahr 2003 keine Kühlperiode stattfand, konnte nachgewiesen werden, dass ca. 4 K im Sommer als Heizwärme angelagert werden. Hinweis darauf ist, dass in den weiteren Heizperioden die Vorlauftemperatur der Sole im Mittel um 4 K höher lag.

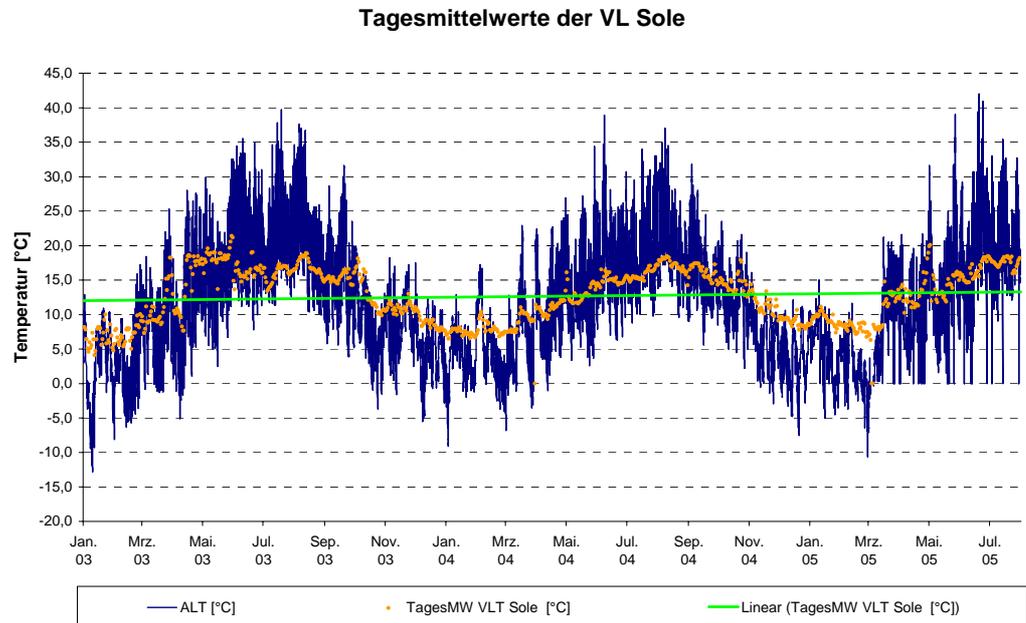


Abbildung 68 - Vorlauftemperatur Sole im Vergleich zur Außenlufttemperatur

### 7.3.4 Lüftung – Heizen und Kühlen

Nach ersten Erfahrungen mit dem Betrieb der Lüftung wurde die Konditionierung der Zuluft über das System Geothermie/Wärmepumpe weitgehend deaktiviert, ohne dass diese Maßnahme bei der Behaglichkeit zu spüren gewesen wäre. Die Zulufttemperatur ist somit wesentlich vom Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsgeräte abhängig.

Anhand der Energieerfassung wurde festgestellt, dass bei Konditionierung der Zuluft der Anteil an Heizenergie bis 24 % beträgt. Nach einer Anpassung der Temperaturen in 2006 sank der Verbrauchswert auf 14% des Gesamtwärmeverbrauchs.

Die Wärmetauscher der Lüftungsgeräte werden mit der gleichen Vorlauftemperatur wie die der BKT versorgt. In den vergangenen 3 Jahren wurde die Vorlauftemperatur für den Heizfall stetig von ~35° bis auf ~28°C herabgesenkt.

Der Wärmetauscher erreicht einen Wirkungsgrad bis zu 75% und erzeugt damit im Mittel Zulufttemperaturen von 18° bis 24°C. Die Zuluft braucht nur wenig vorkonditioniert werden, da verhältnismäßig kleine Luftmengen in die Räume eingebracht werden. Da die Luftkanäle nicht gedämmt sind und zum Teil innerhalb der BKT-Decke verlaufen, nimmt die Frischluft die Temperatur des Raumes bzw. der Decke an. Die Zulufttemperatur am Luftauslass ist im Heizfall um 2-5 K höher als die Zulufttemperatur unmittelbar am Lüftungsgerät.

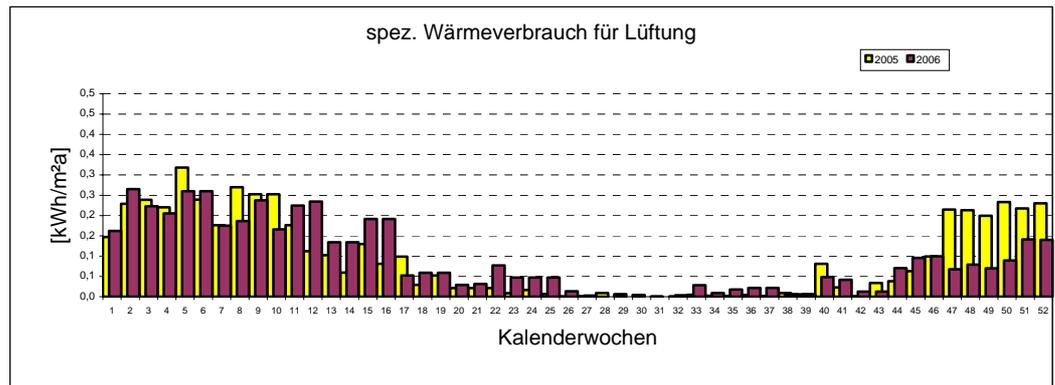


Abbildung 69 - wöchentlicher Wärmeverbrauch für die Lüftung in 2005 und 2006

## 7.4 Behaglichkeit

### 7.4.1 Temperatur

Die Raumtemperaturen sind einige der wichtigsten Parameter die zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit herangezogen werden. Hierbei unterscheidet man zwischen der Lufttemperatur und der sogenannten Empfindungstemperatur, die ein Mittelwert zwischen den Oberflächentemperaturen und der Temperatur der Luft im Raum entspricht.

In den Referenzräumen auf der Südseite des Gebäudes werden die Luft- und Empfindungstemperaturen durch entsprechende Sensoren aufgenommen. Auf der Nordseite sind nur Sensoren für die Lufttemperatur vorhanden. Die nachfolgende Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen die Lufttemperaturen der Nord- und Südbüros. Auf der Nordseite stellen sich Temperaturen von 21° bis knapp über 25°C ein. Auf der Südseite liegen die Lufttemperaturen deutlich über 22°C bis 26°C. Die höheren Temperaturen erreicht das 3.OG aufgrund der größten solaren Einstrahlung, die durch Oberlichter nochmals forciert werden.

Die Empfindungstemperatur schwankt jeweils in einem deutlich kleineren Bereich, da die Strahlungstemperatur der BKT den Einfluss der Lufttemperatur überlagert.

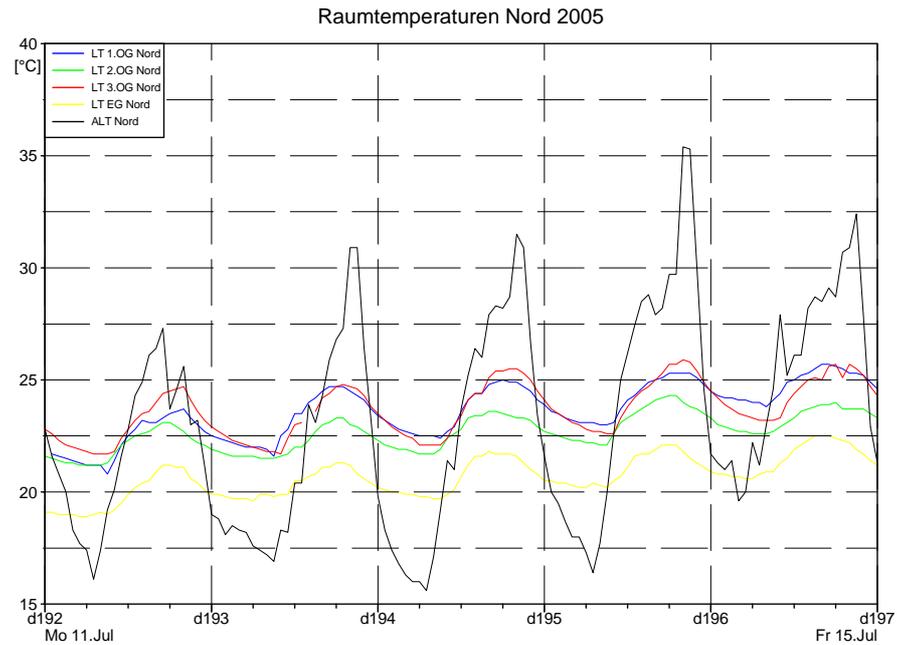


Abbildung 70 - Raumlufttemperaturen in den nördlichen Referenzräumen für eine Woche im Kühlfall

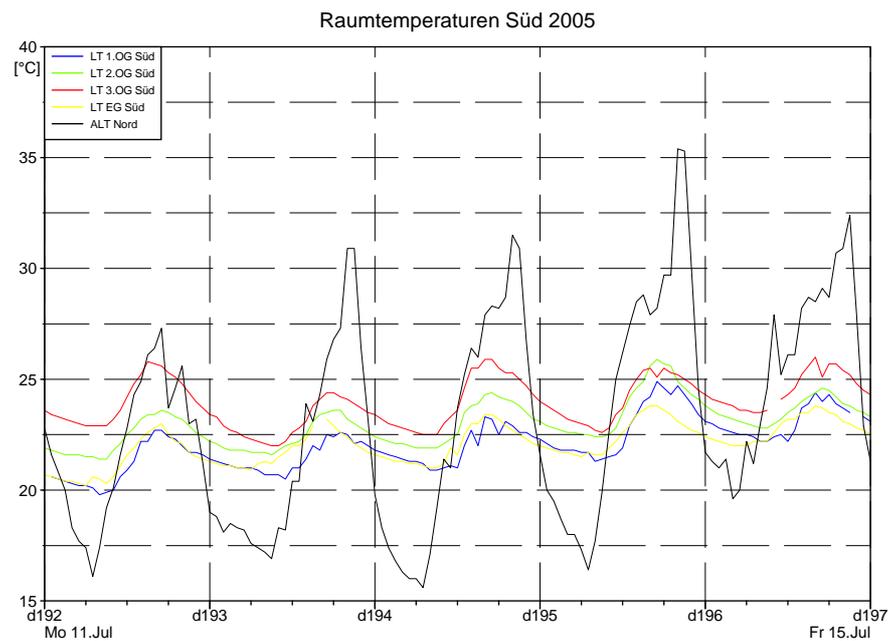


Abbildung 71 - Raumlufttemperatur in den südlichen Referenzräumen für eine Woche im Kühlfall

Zeigt Abbildung 72 eine Abhängigkeit zur der Höhe des jeweiligen Geschosses, ist dies allerdings nicht durchgängig zu beobachten. Die unterschiedliche Nutzung der Räume, die Bedienung des Blendschutzes sowie Öffnungsverhalten der Fenster beeinflussen die Messung entsprechend. Im Winter, bei niedrigem Sonnenstand, ist in einigen Stunden eine Verschattung einiger Büroräume im EG durch das benachbarte Einfamilienhaus gegeben.

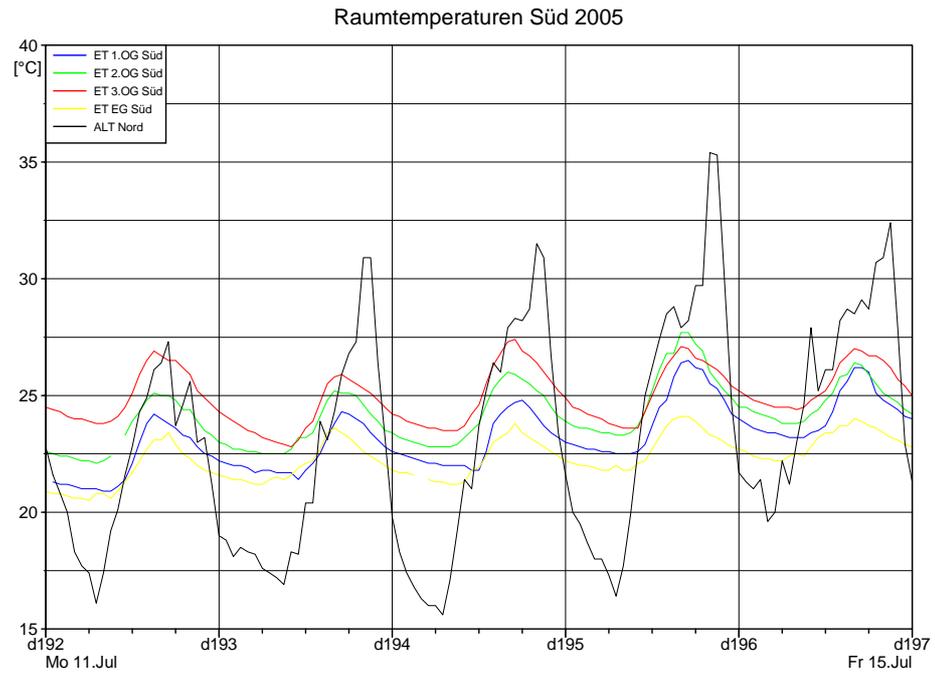


Abbildung 72 - Empfindungstemperatur in den südlichen Referenzräumen für eine Woche im Kühlfall

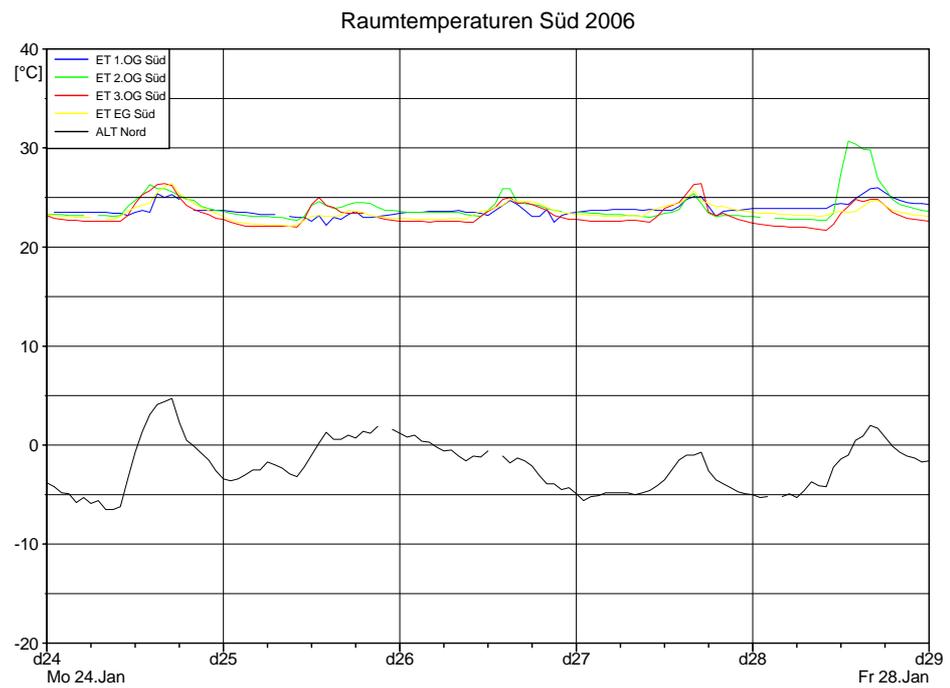


Abbildung 73 - Empfindungstemperatur in den südlichen Referenzräumen für eine Woche im Heizfall

Die Oberflächentemperatur der Decke und des Fußbodens werden im Referenzraum 2.OG auf der Südseite gemessen. Die Messstellen sind an der Decke und unterhalb des Regals auf dem Fußboden angelegt. Auf die direkte Einbindung in die Konstruktion (einputzen)

musste verzichtet werden, so dass die Kontaktstelle des Sensors nicht ganz korrekt ausgeführt werden konnte. Ist der Sensor auf dem Fußboden durch das Regal vor Einstrahlung und Luftbewegung geschützt, so zeigt der Sensor an der Decke einen geringen Einfluss von der Lufttemperatur im Raum.

In Abbildung 74 ist dieser Zusammenhang deutlich zu erkennen. In den Nachtstunden verlaufen die Oberflächentemperaturen ungestört mit einer Differenz von 1,5 K parallel zueinander. Erst mit Einsetzen der Lüftungsanlage, der Computer und der solaren Einstrahlung steigt die Lufttemperatur an. Die Oberflächentemperatur der Decke steigt ebenfalls allerdings mit Verzögerung und geringerem Maximum als die Luft an.

	<b>2004</b> <b>[ET / LT]</b>	<b>2005</b> <b>[ET / LT]</b>	<b>2006</b> <b>[ET / LT]</b>
EG Süd	49 / k.A.	99 / 80	214 / 128
1.OG Süd	k.A. / 5	113 / 5	466 / 63
2.OG Süd	k.A. / 0	157 / 0	272 / 8
2.OG Nord	k.A. / 5	50 / 2	78 / 29
3.OG Süd	24 / 12	330 / 82	326 / 62

Tabelle 31 - Anzahl der Stunden mit Temperaturen >26°C (ET / LT) während der Arbeitszeit (Mo. – Fr. zwischen 8<sup>00</sup> - 18<sup>00</sup> Uhr) für die Referenzräume

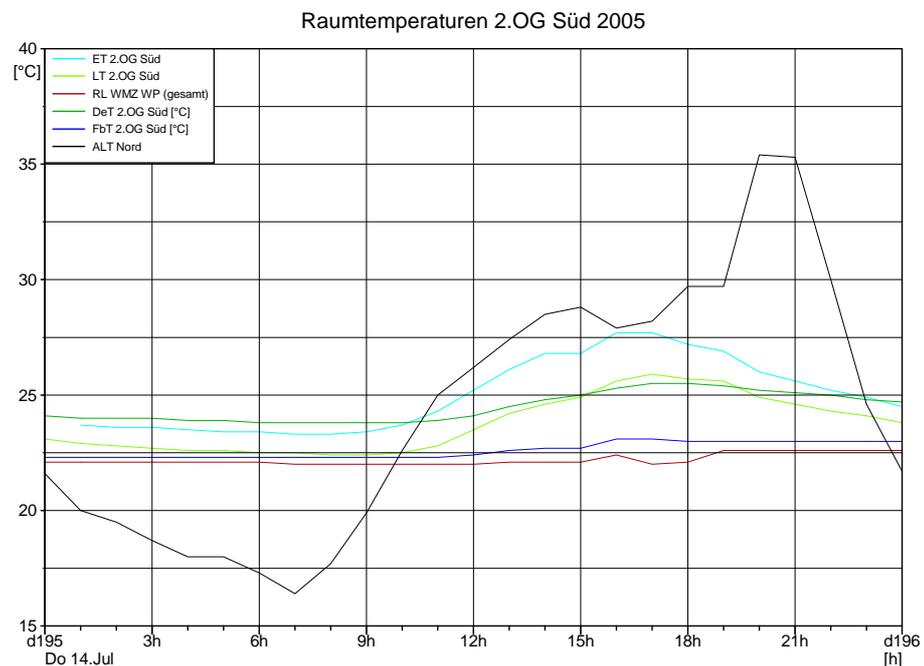


Abbildung 74 - Raumtemperaturen, Oberflächentemperaturen und der Rücklauftemperatur der BKT an einem Sommertag für den Referenzraum 2.OG Süd

Eine Temperatur-Messung in einem Südwest Eckbüro im EG mit vollflächiger Verglasung zeigt Abbildung 75. Bei mittleren Außenlufttemperaturen von 5° bis 8°C stellen sich Temperaturen von 21° bis 22°C ein. Luft- und Empfindungstemperatur sind in etwa identisch. Die Luftgeschwindigkeit am Messort ca. 1m von der Fassade der Verglasung

beträgt zwischen 0,02 und 0,03 m/s. Es stellt sich damit kein unbehaglicher Luftzug ein (s.a. Kapitel 7.4.4). Dies konnte auch von dem Nutzer bestätigt werden. Im Sommer wie auch im Winter ist das Temperaturniveau nach Aussagen der Nutzer angenehm.

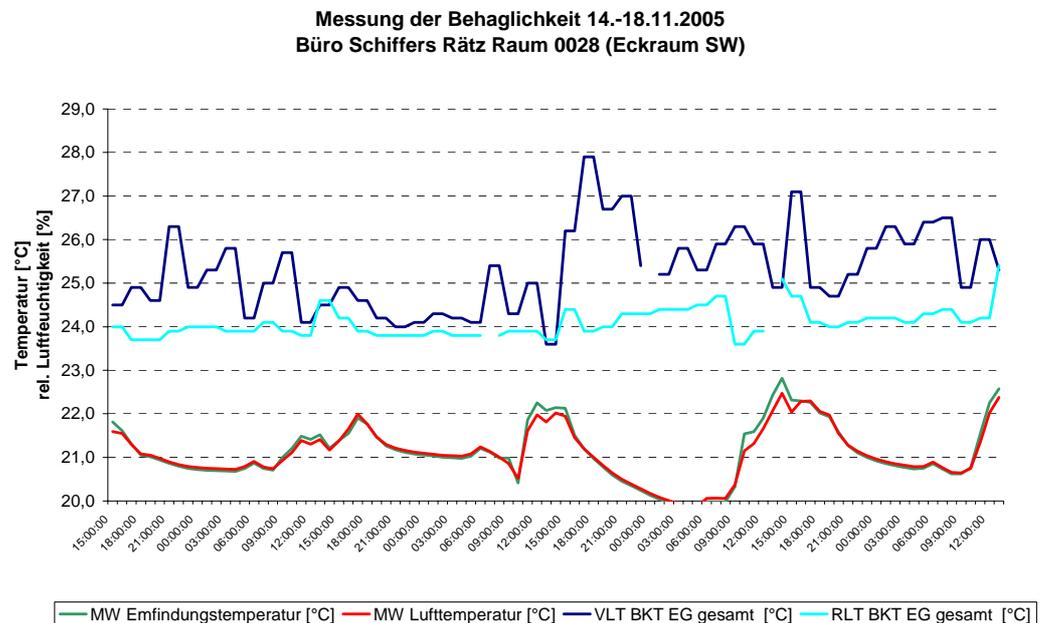


Abbildung 75 - Messung von Empfindungs- und Raumlufttemperatur im Vergleich zu VL- und RL-Temperatur der BKT

## 7.4.2 Mischgas

Sensoren für Mischgasdetektion in den Referenzbüros geben Aussagen über die Qualität der Luft in den Büros wie z.B. Gerüche und den damit verbundenen Frischluftbedarf der Nutzer wieder. Die Referenzbüros sind unterschiedlich belegt und auch das Frischluftbedürfnis ist ebenso unterschiedlich ausgeprägt.

Referenzbüro	EG Süd	1 – 2	Personen
Referenzbüro	1.OG Süd	1	Person
Referenzbüro	2.OG Süd	1 – 2	Personen
Referenzbüro	2.OG Nord	2	Personen
Referenzbüro	3.OG Süd	2	Personen

Durch Fensterlüftung kann der Nutzer für zusätzliche Frischluft sorgen. Das wird im Büro EG und im Büro 2. OG (Südseite) auch stärker genutzt als es in den anderen Referenzbüros der Fall ist. Die Abbildung 76 zeigt einen typischen Tagesverlauf im Sommer für die Luftqualität innerhalb der Räume.

Um 7<sup>00</sup> Uhr laufen die Lüftungsgeräte an, was deutlich am Einknicken der Kurven zu erkennen ist. Die Luftqualität verschlechtert sich mit der Anwesenheit der Nutzer, die Kurve steigt an. Im betrachteten Büro des EGs zeigt die Kurve vor Einschalten der Lüftungsanlage

den Einknick. Dies lässt vermuten dass der Nutzer früh anwesend war und das Fenster geöffnet hat. Die Sensoren im 3.OG und im 2.OG auf der Nordseite weisen Werte von 950 ppm auf. Hier wird die Grenze des Sensors erreicht. Im 3.OG ist das Maximum des Sensors mit 950 ppm erreicht. Hier bleibt die Konzentration des Mischgases weitgehend konstant und man kann davon ausgehen, dass auch höhere Werte vorliegen.

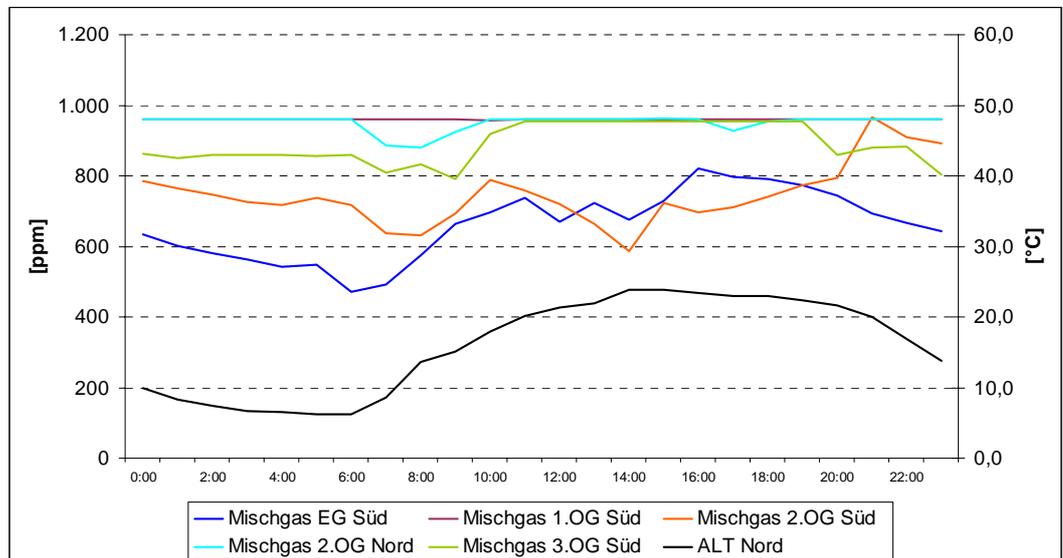


Abbildung 76 - Verlauf des Mischgases an einem Tag im Sommer (14. Juni 2005)

Es zeigt sich das der Verlauf der CO<sub>2</sub>-Kurve ähnlich dem des Mischgases verhält nur entsprechend niedriger. Die Betrachtung über das Jahr in diesem Büroraum weist überwiegend Werte im Bereich zwischen 300 und 650 ppm CO<sub>2</sub> auf. Die maximal empfohlene CO<sub>2</sub>-Konzentration am Arbeitsplatz bleibt damit deutlich unterschritten.

Überträgt man das Verhältnis der beiden Konzentrationen auf die anderen Büroräume, kann man darauf schließen dass die Konzentration von CO<sub>2</sub> dort ebenfalls um 40 bis 50% geringer ausfällt. Die gilt unter der Voraussetzung, dass in allen Räumen die gleiche Raumluftverhältnisse (Ausdünstungen von Möbeln und Personen etc.) vorliegen.

Diese Rückschlüsse treffen vorwiegend auf die Referenzbüros zu, da die übrigen Büroräume teils mit wenigen oder mit deutlich mehreren Personen belegt sind. Nach den Umfragen bei den Nutzern zur Folge ergab sich eine Zufriedenheit von 64 bis 88%.

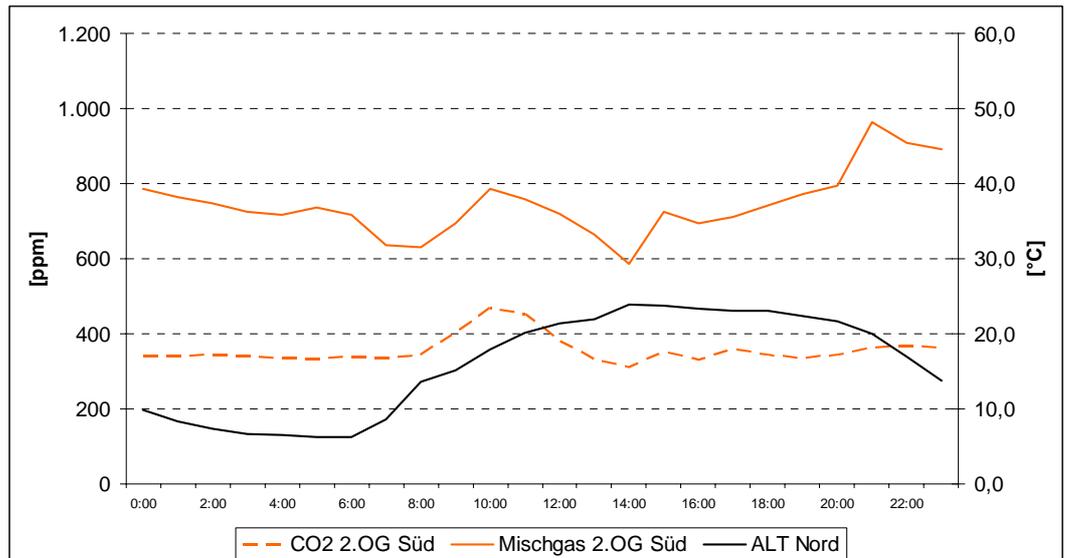


Abbildung 77 - Verlauf CO<sub>2</sub> und Mischgas im Referenzbüro 2.OG Süd an einem Tag im Sommer (14. Juni 2005)

### 7.4.3 Feuchtigkeit

Bei BOB findet keine Befeuchtung der Zuluft statt. Die Messungen der Jahre 2004 bis 2006 zeigen, dass die relative Feuchte zwischen 20% und 60% schwankt. In 2004 und 2005 liegen knapp 1/5 der Stunden unterhalb der allgemein gültigen Behaglichkeitsgrenze von 30% relativer Luftfeuchtigkeit.

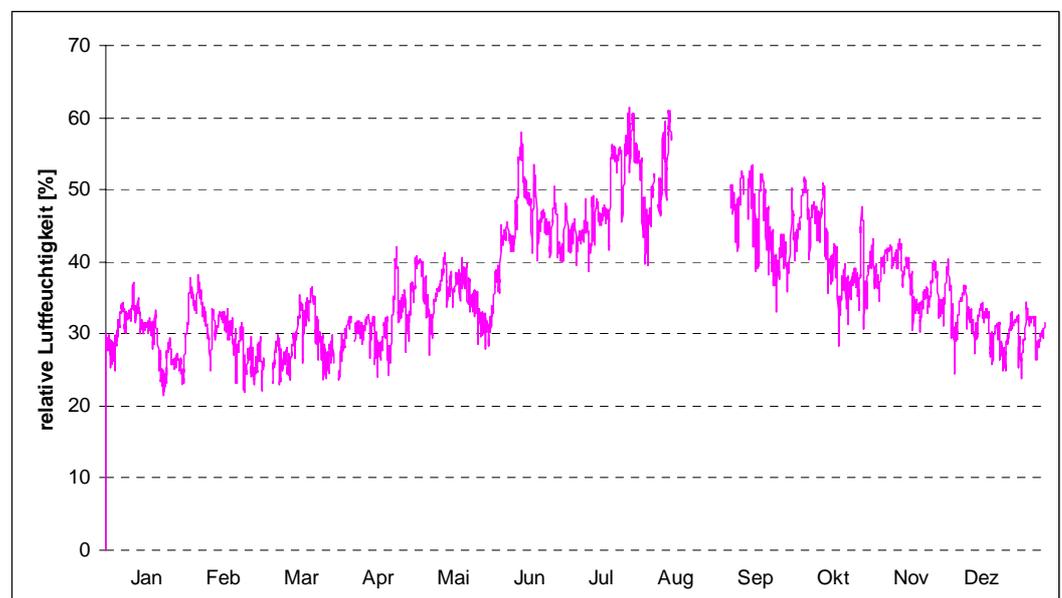


Abbildung 78 - mittlere relative Luftfeuchtigkeit aller Referenzbüros im Gebäude 2004

Nach den beiden durchgeführten Nutzerbefragungen im Jahr 2004 wurde die Luftfeuchtigkeit von 30% (Befragung im Sommer) bis 40% (Befragung im Winter) als etwas zu trocken empfunden. In einer Nutzungseinheit stellten sich 2006 die Mitarbeiter in

einigen Räumen separate Luftbefeuchter auf, da hier die Luft als zu trocken empfunden wurde. Der Stromverbrauch über die mechanische Lüftung in dieser Etage ist in den Jahren hingegen weitgehend konstant geblieben.

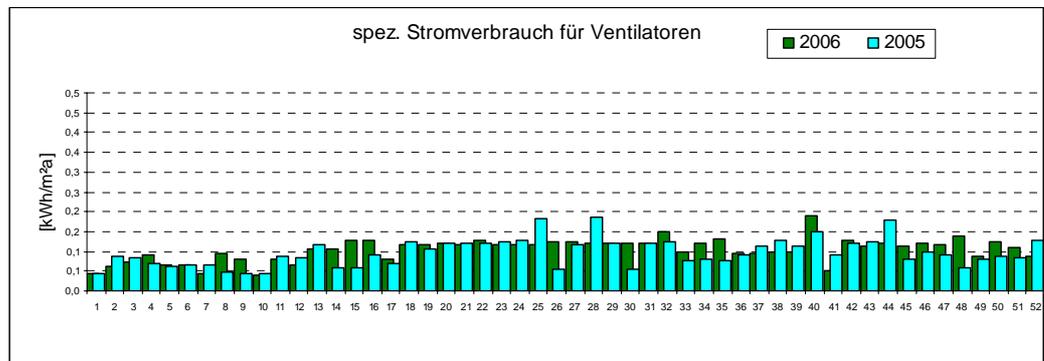


Abbildung 79 - wöchentlicher Stromverbrauch für die Lüftung in 2005 im 1.OG (linke Nutzungseinheit)

#### 7.4.4 Luftgeschwindigkeiten

Durch die Beschränkung der Zuluft auf den notwendigen hygienischen Luftwechsel sind die transportierten Luftmengen gering. Des Weiteren ist die Gebäudehülle luftdicht ausgeführt. Dadurch ergeben sich keine Zugerscheinungen und keine Geräuschemissionen beim Eintrag der Luft in die Büros. Entsprechend hoch zeigt sich die Nutzerzufriedenheit.

Wie die folgende Grafik zeigt ergeben sich selbst bei großen Glasflächenanteilen (bodentiefe Fenster) nur geringe Luftgeschwindigkeiten im Raum.

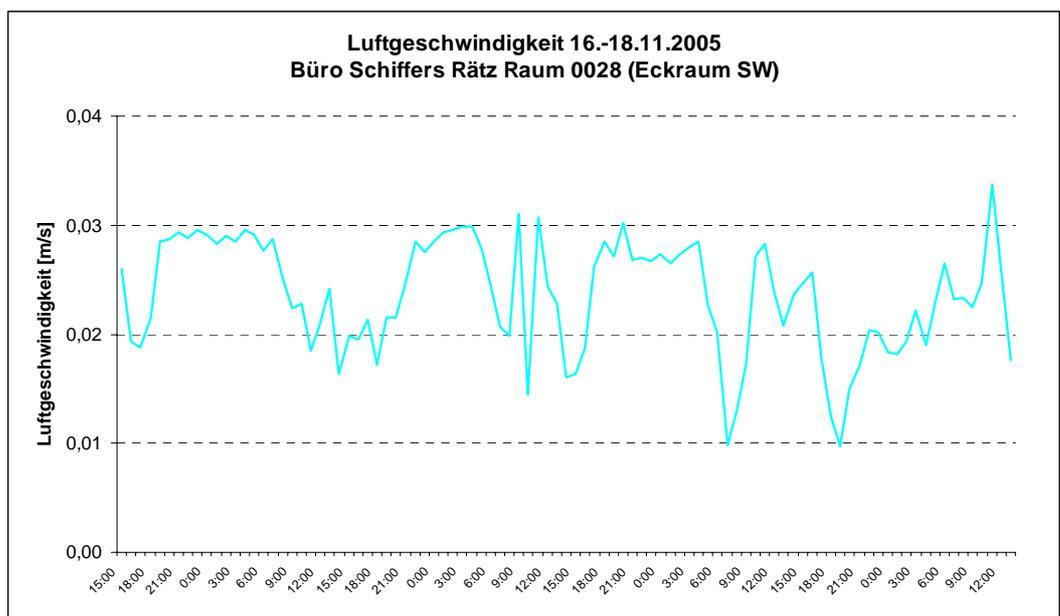


Abbildung 80 - temporäre Messung der Luftgeschwindigkeit im EG 2005 in einem Büro mit bodentiefen Fenstern

## 7.4.5 Licht

Die optische Behaglichkeit eines Raumes wird neben der Raumgestaltung (Möbel und Ausstattung) über eine gute Sichtverbindung nach außen, einen ausreichenden Tageslichteinfall sowie eine ausreichende künstliche Beleuchtung beschrieben. Im Allgemeinen gilt in halber Raumtiefe ein Tageslichtquotient von 1% als Mindestanforderung. Gute Werte bis sehr gute Werte liegen bei 2 -3%.

Wie im Kapitel 6.5 erläutert, wurde der Tageslichtquotient für ein Büro auf der Nordseite (hier Referenzbüro 2.OG) an einem gleichmäßig bewölkten Tag gemessen. Dabei stellt sich ein Tageslichtquotient zwischen 12,4% in der Nähe der Verglasung und 0,85% in 3,6m Entfernung zur Fassade ein. Mit 4,5% im Mittel ist eine sehr gute Tageslichtausleuchtung gegeben. Die Beleuchtungsstärke im Büro (zum Zeitpunkt der Messung) beträgt im Mittel 276 lux.

Durch die unterschiedlich starke Bestückung der Regale mit (schwarzen) Ordnern in den unterschiedlichen Büros wird der Tageslichtquotient beeinflusst. Helle Farben wirken sich positiv auf den Quotienten und die Helligkeitswahrnehmung aus.

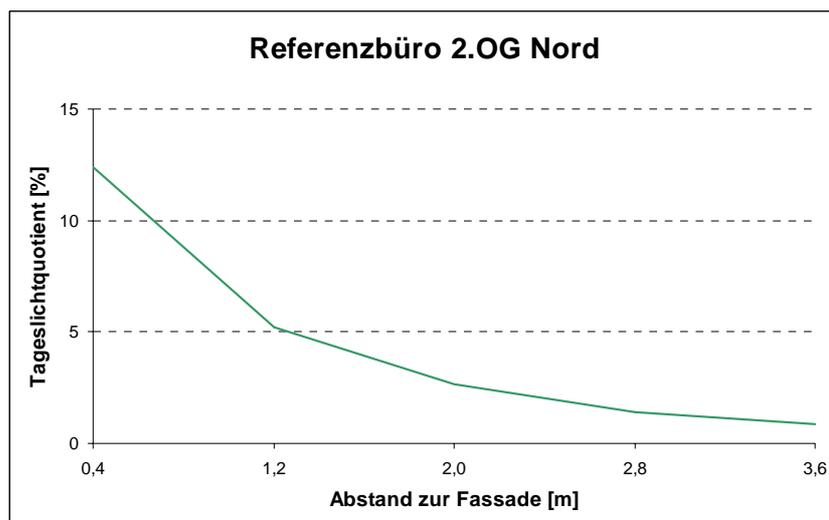


Abbildung 81 - Tageslichtquotient im Referenzbüro 2.OG auf der Nordseite

Blendung durch die Sonne tritt hauptsächlich im Süden sowie bei niedrigem Sonnenstand auf der Ost- und Westseite auf. Die dort angebrachten innen liegenden Jalousien werden durch den Nutzer manuell bedient und haben im oberen Teil eine Licht lenkende Funktion, so dass das Tageslicht weiterhin genutzt werden kann.

Eine vergleichende Messung im Sommer (klarer sonniger Tag) in dem Referenzbüro auf der Südseite (2.OG) zeigt den Nutzen eines solchen Systems. Die Messpunkte wurden direkt am Arbeitsplatz (1,2 und 2,0m Entfernung zur Verglasung) festgelegt und dabei die Jalousie mit unterschiedlichen Einstellungen variiert.

	Messpunkt A 1,2m [lx]	Messpunkt B 2,0m [lx]
Jalousie geöffnet (hochgezogen) Lichtlenklamellen (hochgezogen)	2.185	1.332
Jalousie geschlossen Lichtlenklamellen geschlossen	411	312
Jalousie geschlossen Lichtlenklamellen geöffnet	433	384

*Tabelle 32 - Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz bei unterschiedlicher Stellung des Blendschutzes im Referenzbüro Süden 2.OG*

Bei geöffneten Lichtlenklamellen wird an Messpunkt A 5% und an Messpunkt B 23% höhere Beleuchtungsstärke gemessen, als bei geschlossenen Lamellen. Das Ergebnis zeigt auch, dass die Lichtlenklamellen vorwiegend in der Raumtiefe wirken.



*Abbildung 82: Blendschutz mit Licht lenkender Funktion im oberen Drittel*

Der Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke über einige Tage im Spätsommer für das Eckbüro im Südwesten zeigt Abbildung 83. Der Sensor ist mit 2m von der Verglasung in Schreibtischhöhe aufgestellt worden. Im Tagesmaximum werden Beleuchtungsstärken im Mittel von 500 bis 1.000 Lux aufgezeichnet. In den späten Mittagsstunden zeigt sich ein extrem hoher Beleuchtungspeak durch die untergehende Sonne, die durch das Westfenster scheint.

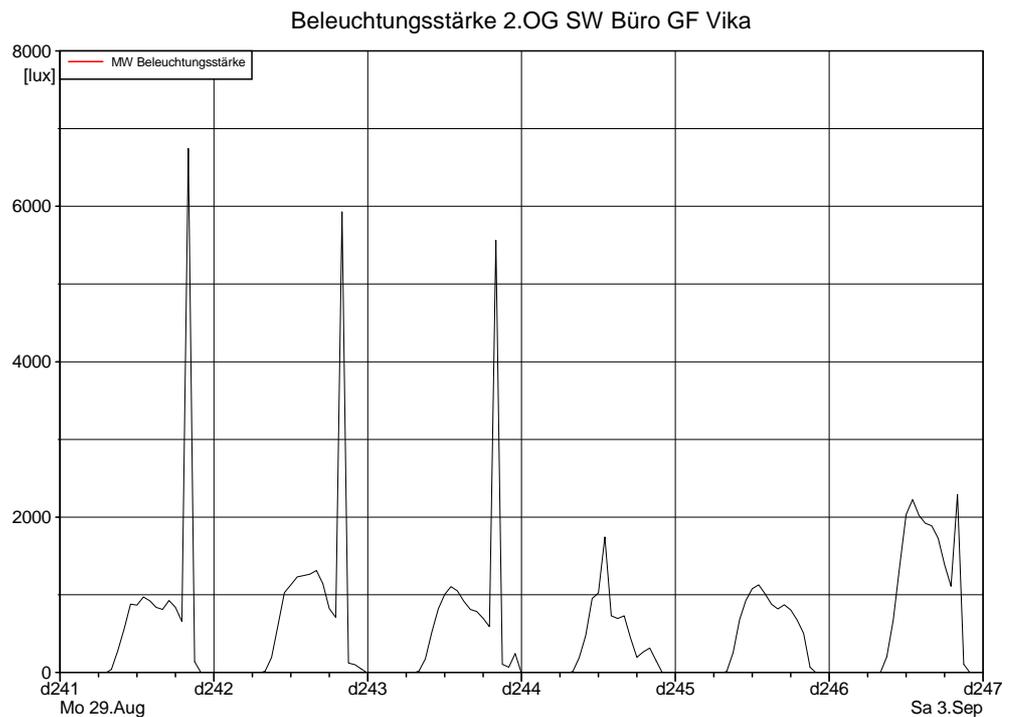


Abbildung 83 - Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke im Südwest Eckbüro im 2.OG

Hoher Tageslichtanteil sowie die konsequente Nutzung der Licht lenkenden Funktion des Blendschutzes durch den Nutzer sollen den Anteil an Kunstlicht weit möglichst reduzieren. Dies wird durch eine tageslichtabhängige Kunstlichtsteuerung unterstützt. Bei BOB wird über Dach die Außenhelligkeit gemessen. Dieser Wert wird als Führungsgröße für die Kunstlichtnachführung genutzt. Je nach Etage und damit Anteil an Tageslicht können unterschiedliche Kurven – Dimmungsgrad über Außenhelligkeit – eingestellt werden. Um die automatische Dimmung für den Nutzer nicht sichtbar zu machen, wird bei einer sprunghaften Änderung der Außenhelligkeit das Kunstlicht in kleineren Schritten nachgeführt.

#### 7.4.6 Akustik

Im 2. Obergeschoss des BOB wurden schalltechnische und akustische Untersuchungen angestellt. Es sollte ermittelt werden warum in der Nutzerbefragung teilweise eine Unzufriedenheit bezüglich der schalltechnischen Situation geäußert wurde.

Die Messungen fanden in einem nordöstlichen Kombibüro statt. Dies teilt sich in zwei offene Büroeinheiten, die jeweils für maximal drei Personen ausgelegt sind (siehe Abbildung 84).

72,8 % der Befragten sind mit der Raumakustik „sehr zufrieden“ bzw. „zufrieden“. Dagegen sind 17,2 % der Befragten „unzufrieden“ oder „sehr unzufrieden“. Die ermittelte Nachhallzeit von 0,43 s liegt unterhalb der Optimalwerte nach DIN 18041. Das etwas zu geringe A/V-Verhältnis des Raumes legt die Vermutung nahe, dass hierin ein Grund für die

Unzufriedenheit zu sehen ist. Folge ist, dass sich die Akustik negativ auf die Kommunikation auswirkt. So können Gespräche von Kollegen und Telefonate über größere Entfernungen im Büro wahrgenommen werden.

Dies wird auch durch die Frequenzspektrumanalyse bestätigt. Die arithmetischen Mittelwerte liegen im Toleranzbereich zwischen 40 und 55 dB und damit in dem vom Arbeitsschutz festgelegten Bereich. Im sprachrelevanten Bereich der Frequenzen hingegen, sind die gemessenen Werte zu hoch (>55 dB). Zusammenfassend sind die raumakustischen Eigenschaften des Kombibüros auf Grund der unterschiedlichen Ergebnisse im akzeptablen Bereich und wirken sich nicht negativ auf die Leistungsfähigkeit der Nutzer aus.

Die Nutzer des Kombibüros schlagen eine Belegung durch 2 Personen vor, um o.g. Beeinträchtigung zu unterbinden. Um die bestehende Situation zu verbessern sind baukonstruktive Lösungen notwendig, wie z.B. durch den Einsatz von schallabsorbierenden Materialien. Der Aufwand für solche Maßnahmen ist allerdings recht hoch und aufwändig.

Der überwiegende Teil der weiteren Büros in der Nutzungseinheit ist durch Glastrennwände voneinander getrennt, so dass hier insgesamt eine hohe Nutzerzufriedenheit anzutreffen ist.



Abbildung 84 - Kombibüro für die akustische und schalltechnischen Messungen und Umfragen im 2.OG

Die Beeinträchtigung durch Geräuschimmissionen von außen ist nur bei geöffnetem Fenster gegeben. Vor dem Gebäude verläuft eine Strasse mit geringem Verkehrsaufkommen (PKW und eine Buslinie), sowie in 200m Entfernung eine Bahnlinie auf einem hoch gelegenen Bahndamm.

## 7.5 Gebäudehülle

### 7.5.1 Druckdifferenzmessung

Bei der Blower-Door Messung während der Bauphase handelte es sich hauptsächlich um eine qualitative Überprüfung des Einbaus der Fenster und deren Luftdichtigkeit. Der Aufbau der Messung wurde bereits in Kapitel 6.2 beschrieben.

Durch den eingeblasenen Kunstnebel werden verschiedene Undichtigkeiten ermittelt:

- die noch nicht richtig eingestellten Fensterflügel
- die Entwässerungsöffnungen im äußeren Blendrahmen
- nicht genau zu ortende Undichtigkeiten zwischen Fenster und äußerer Fensterbank.

Um die Undichtigkeiten über die Entwässerungsöffnungen und die Fensterflügel auszuschließen, wurden die Öffnungen von außen abgeklebt, so dass für eine qualitative Bewertung nur die entscheidenden Undichtigkeiten zwischen Fenster und Fensterbank verblieben.

Letztendlich wurden Undichtigkeiten in den Anschlüssen zwischen Fenster und Fassade insbesondere in den Eckbereichen der Außenfensterbank durch den Nebelversuch eindeutig identifiziert.

Es handelte sich um gravierende Undichtigkeiten, die zur Gewährleistung des hohen energetischen Standards in Verbindung mit einer Lüftungsanlage mit WRG ein n50-Wert unter 0,6 h-1 beseitigt werden mussten.



*Abbildung 85 - Luftundichtigkeit am Fenster durch Kunstnebel sichtbar gemacht*

Eine weitere Luftdichtigkeitsmessung fand 2003 statt. Dazu wurde das Gebäude nach den Vorgaben der DIN 13829 vorbereitet, um die gesamte wärmeübertragenden Gebäudehülle zu prüfen. Das bedeutete u.a. dass alle innen liegenden Türen geöffnet wurden, damit das gesamte beheizte Volumen erreichbar ist. Alle Fenster und Außentüren wurden geschlossen, die Lüftungsanlage abgeschaltet und deren Zu- sowie Fortluftöffnungen abgedichtet.

Damit man bei der Messung auch die Eingangstür prüfen konnte, wurde das Messgerät in einem Fenster im EG eingebaut und entsprechend eingedichtet. Die aus

brandschutztechnischen Gründen vorhandene Öffnung im Fahrstuhlschacht wurde temporär für die Messung luftdicht verschlossen.

Zu Beginn fand eine sogenannte Leckagemessung statt um evtl. vorhandene Schwachstellen zu finden und nachträglich abdichten zu können. Dazu wurde im Unterdruck eine konstante Druckdifferenz von 50 Pa durch das Messgerät aufrecht erhalten.

An einigen Stellen der Lamellenfenster im Treppenhaus wurden geringfügige Undichtigkeiten festgestellt. Auch im Schwellenbereich der Eingangstür konnte ein geringer Luftzug festgestellt werden. Ein Durchbruch vom Hausanschlußraum zur beheizten Hülle zur Durchführung von Rohren wurde mittels Dichtungsbändern und Mineralwolle langfristig abgedichtet.

Die abschließende Messung der Luftdichtigkeit fand bei Außenlufttemperaturen von 29,3°C und völliger Windstille statt. Es wurde stufenweise eine Druckdifferenz von 12 Pa bis 56 Pa im Unter- und Überdruck durch den Ventilator des Messgerätes aufgebaut. Der gemittelte Leckagevolumenstrom im Unter- bzw. Überdruckmessung betrug 1.873 m<sup>3</sup>. Bezogen auf das gesamte beheizte Gebäudevolumen entspricht das einem n<sub>50</sub>-Wert von 0,3 1/h.

## 7.5.2 Thermographie

Die Thermografie wurde für zwei Betrachtungsweisen herangezogen. Zum einen für die Ermittlung der Fassadentemperaturen im Winter und zum anderen für die Bestimmung der Oberflächentemperatur der BKT im Winter als auch im Sommer.

### Außen-Thermografie

Die Thermografiemessung wurde am 14. Januar 2003 in den Morgenstunden bei Außenlufttemperaturen von 6°C durchgeführt. Die Regelfassade des Gebäudes ist hinterlüftet. Lediglich einige Bereich im 3.OG sind mit einem Wärmedämmverbundsystem versehen. Das Treppenhaus sowie einige Büros im EG bestehen aus einer Pfosten-Riegelkonstruktion. Da die Ziegelplatten-Fassade hinterlüftet ist, lassen sich keine eindeutigen Aussagen zur Oberflächentemperatur und somit keine Aussagen zur Qualität der Dämmung machen.

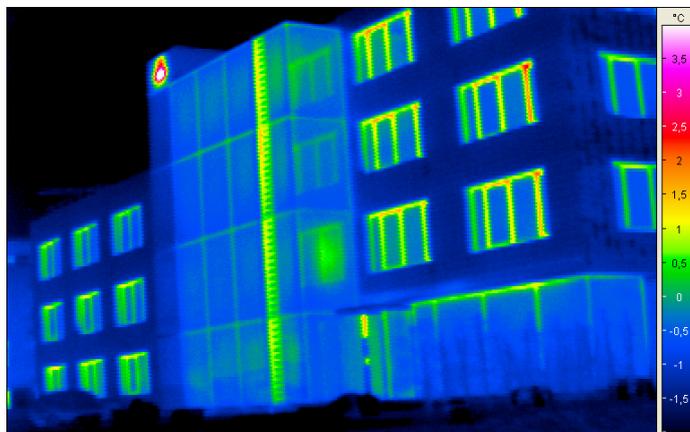


Abbildung 86 - Thermografieaufnahmen der Northwest-Fassade

Anhand der Infrarot-Aufnahmen erkennt man einige Besonderheiten der Fassade. Deutlich ist die Lüftungsöffnung des Fahrstuhlschachtes im Bereich der Überfahrt (in Abbildung 86 als weißer Fleck oben links) zu erkennen. Hier gelangt die Raumluft des Treppenhauses über den Fahrstuhl nach Außen (s. Abbildung 46). Die Lamellenfenster im Treppenhaus haben einen hohen Rahmenanteil, sind somit aus thermischer Sicht das schwächste Bauteil der Pfosten-Riegel Konstruktion, so dass diese Lamellen in der IR-Aufnahme klar zu erkennen sind. Die Aluminiumrahmen der Fenster sind Passivhaus tauglich. Ihre äußere Oberflächentemperatur ist entsprechend der thermischen Trennung und dem hochwertigen Randverbund sehr gering. Es zeigen sich Temperaturen von  $1^{\circ} - 5^{\circ}\text{C}$  (mit Emissionsfaktor  $\varepsilon=0,2$ ).

### Innen-Thermografie

Da die BKT-Flächen direkt zugänglich sind, wurden im gesamten Gebäude die Oberflächentemperaturen der BKT mittels der Thermografie gemessen. Bei den Büros im EG mit bodentiefer Verglasung waren zunächst unbehagliche Temperaturen durch den Nutzer beanstandet. Die Oberflächentemperaturen der BKT hatten die notwendige Temperatur. Als Schwachpunkt stellte sich die Fußbodenheizung dar, die in den Büros mit Pfosten-Riegel Fassade installiert wurde. Das Problem war eine Pumpe die nicht den benötigten Volumenstrom lieferte. Durch eine Anpassung der Pumpeneinstellung konnte die Behaglichkeit wieder hergestellt werden.

Die Untersuchung der Oberflächentemperaturen zeigte weiterhin dass lediglich eine BKT-Matte nicht die erwarteten Temperaturen lieferte. In einem Eckbüro auf der Nordwestseite im 2.OG konnten Temperaturdifferenzen von 1 K zur benachbarten BKT-Matte gemessen werden. Der Temperaturunterschied wurde auch von dem Nutzer des Büros als unbehaglich festgestellt. Das komplette Öffnen der zugehörigen Verteilerventile konnte zu keiner messbaren Verbesserung führen.

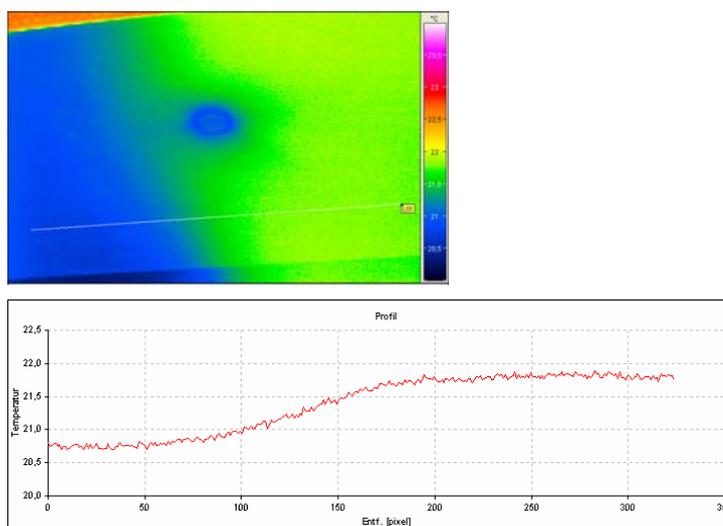


Abbildung 87 - Oberflächentemperatur einer nicht ausreichend durchflossenen BKT Matte (2.OG Eckbüro Nordwest)

## 7.6 Nutzerzufriedenheit

Die Nutzerakzeptanz für das Heiz- und Kühlsystem mittels Betonkerntemperierung ist sehr hoch. Während die Heizfunktion eher als normal betrachtet wird, führt der Effekt der behaglichen Strahlungskühlung zu positiven Rückmeldungen der Nutzer. Die geringe Auslegung der Frischluftmenge von 20 m<sup>3</sup>/hp (unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit der Büronutzung) hat sich als praktikabel erwiesen. Der Grundluftwechsel, der auch am Morgen oder nach dem Wochenende für frische Luft sorgt und die Tatsache, dass die Nutzer die Fenster zusätzlich öffnen können, wird als angenehm empfunden. Auch bei sehr geringen oder sehr hohen Außentemperaturen hat sich eine längere Fensterlüftung als relativ unkritisch für die thermische Behaglichkeit erwiesen.

Die tageslichtlenkenden Jalousien werden positiv aufgenommen, insbesondere die Tatsache, dass es keine automatische Steuerung gibt und die Nutzer somit den Grad der Blendschutzwirkung und den der Tageslichtlenkung selbst einstellen können. Trotz ausschließlich innen liegender Verschattung war auch in dem extrem heißen Sommer des Jahres 2003 das Raumklima nach Aussagen der Nutzer zufrieden stellend. Diese Aussagen der Bauherren und Nutzer werden im Jahr 2004 durch die ersten Messresultate bestätigt.

Die tageslichtabhängige Kunstlichtsteuerung in der Kombizone wird durch die Nutzer kaum bemerkt. Durch die Gebäudeleittechnik und das internetbasierte Energiemanagement kann eine weitere Optimierung im Betrieb des Gebäudes vorgenommen werden. Das Gebäude verlangt nach Nutzeraussagen keine hohen Bedienkenntnisse.

	Winter	Sommer
Zufriedenheit am Arbeitsplatz	++	++
Büroausstattung	+++	++
Geräusche	+	+
Temperatur	+	++
Lüftqualität	++	+++

geringe Zufriedenheit [- / -]    mäßige Zufriedenheit [+ / 0]    hohe Zufriedenheit [+++ / ++]

Abbildung 88 - Zufriedenheit am Arbeitsplatz für verschiedene Parameter /vi/

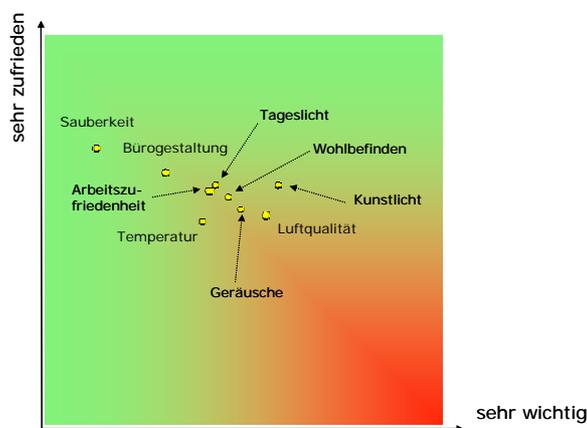


Abbildung 89 - Zufriedenheitsmatrix nach Wichtigkeit für die Benutzer /vii/

## 7.7 Wirtschaftlichkeit

Mit Investitionskosten von 1.125 €/m<sup>2</sup> Nettogeschossfläche liegen diese Kosten unterhalb des mittleren Standards nach dem Baukostenindex (BKI) gebauter Vergleichsobjekte. Dabei entspricht die gebaute Qualität mindestens dem mittleren Standard. Hochwertige langlebige Materialien wurden ebenso eingesetzt, so dass auf eine Kühlung und Belüftung nicht verzichtet werden musste. Letzteres ist nach wie vor für Büro Neubauten nicht Standard.

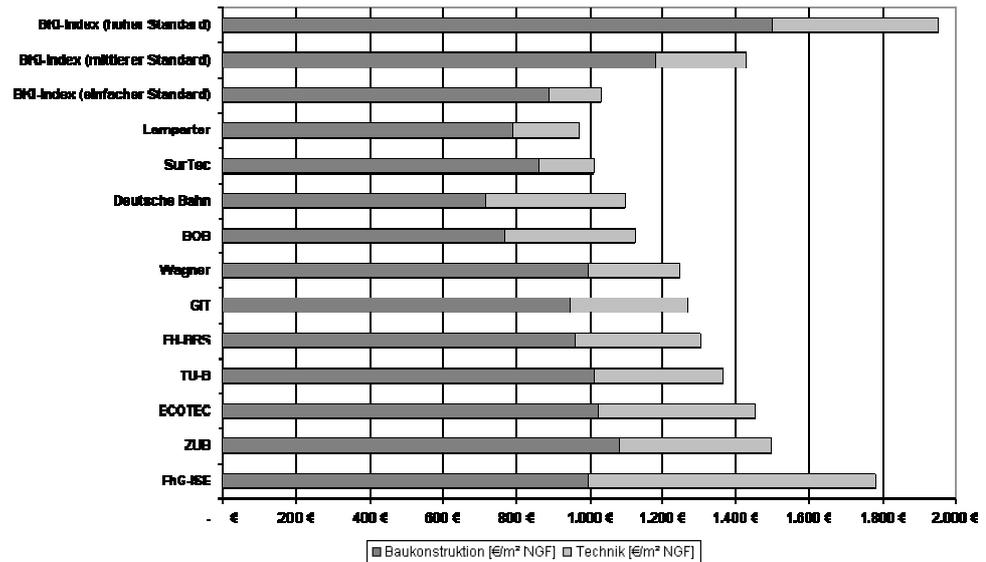


Abbildung 90 - Vergleich der Baukosten

Damit kann nachgewiesen werden, dass energieeffizientes Bauen nicht teures Bauen sein muss. Erreicht wurde dieses Ergebnis durch die Kompensation von Mehrkosten zum Beispiel der Geothermie durch Einsparung in der Konstruktion oder kein äußerer Sonnenschutz. Vorgefertigte Treppen- und Fassadenelemente reduzierten die Baukosten.

In 2005 wurden folgende Energiekosten gemessen:

Energiekosten BOB 2005		€/m <sup>2</sup> a
Heizung		0,64
Kühlung		0,39
Luftförderung		0,46
Beleuchtung		0,91
Warmwasserbereitung		0,03
Aufzug		0,04
spezifische Jahresenergiekosten		2,47
spezifische Monatsenergiekosten		0,21 €/m <sup>2</sup> Monat

Tabelle 33 - Spezifische Energiekosten 2005

Im Vergleich zu ähnlichen Büro Neubauten in derselben thermischen Qualität betragen die Energiekosten 0,80 €/m<sup>2</sup>Monat bis 1,50 €/m<sup>2</sup>Monat. Somit werden diese Kosten um den Faktor 4 bis 7 unterboten.

Eine exakte Wirtschaftlichkeitsberechnung im Vergleich zu konventionellen Neubauten erübrigt sich somit, da bei denselben Investitionskosten deutlich geringere Energiekosten erreicht werden, so dass vom ersten Tag an mit dem Gebäude Geld verdient wird.

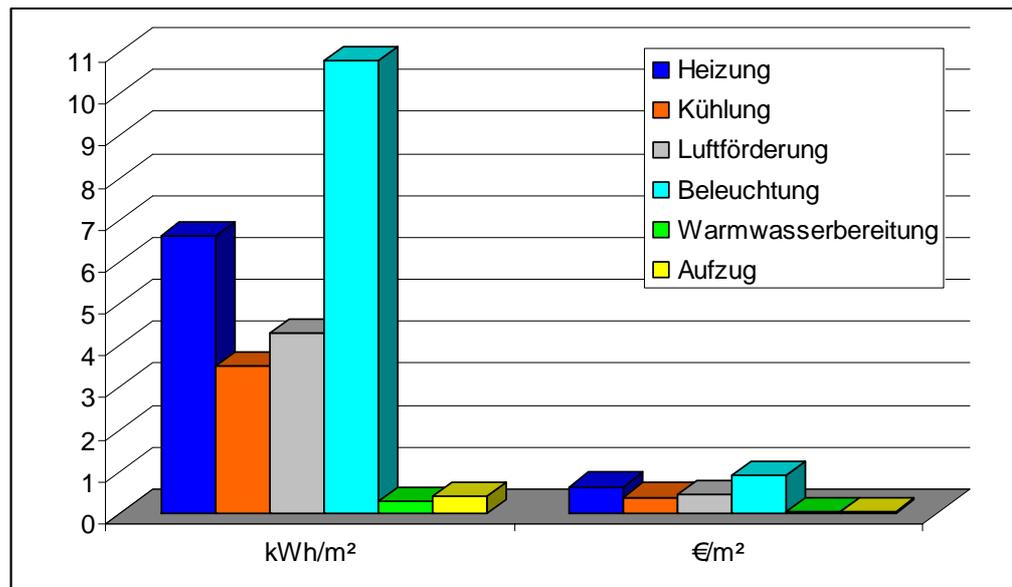


Abbildung 91 – Endenergie- und spezifische Energieverbrauchskosten nach Gruppen

## 8 Erfahrungswerte

Die Erfahrung zeigt, dass jedes Gebäude zu Beginn der Nutzung noch Anfangsschwierigkeiten hat. Manche „offensichtliche“ Probleme werden sofort erkannt, wenn z.B. Heizkörper durch ein defektes Thermostat nicht die benötigte Temperatur im Raum erzeugen können. Andere weniger augenscheinliche Probleme wie ein zu hoher Energieverbrauch werden zumeist erst nach Abrechnung durch den Energieversorger im kommenden Jahr aufgedeckt. Ob sie dann auch zu Konsequenzen führen ist eine andere Frage.

Damit man eine Vielzahl von Problemen recht schnell erkennt und beheben kann, wurde bei dem Bob-Gebäude ein erweitertes Messkonzept realisiert. Die durch das Forschungsprojekt Solarbau benötigten Informationen wurden damit abgedeckt und darüber hinaus konnten weitere Daten gesammelt werden.

So wurden u.a. die Temperaturen der BKT auf der Nord- und auf der Südseite aufgezeichnet. Man erhoffte, dass sich ein entsprechendes Temperaturgefälle zwischen der Nord- und Südseite einstellen wird, um einen Wärmeaustausch innerhalb einer BKT-Etage zu

realisieren. Doch zeigten sich keine relevanten Temperaturunterschiede innerhalb der BKT-Etage, so dass auf diese Möglichkeit verzichtet werden konnte.

Während der Anfangszeit wurden alle Sensoren auf ihre richtige Bezeichnung hin geprüft. Aufkleber mit dem Namenskürzel auf den Sensoren, den Pumpen und den Wärmemengenzählern wurden mit der Handliste und insbesondere den Zuweisungen der GLT überprüft. Es konnten einige vertauschte Bezeichnungen lokalisiert und entsprechend korrigiert werden.

Die schriftliche Handliste, die wöchentlich zur Erfassung der Energieverbräuche geführt wurde, war ebenfalls hilfreich innerhalb der GLT Unstimmigkeiten abzugleichen. Die GLT ihrerseits zeigte auf, welche Sensoren betriebsbereit waren und welche Sensoren defekt waren und somit keine Daten lieferten. Ebenfalls wurde die Handliste zur Überprüfung und Korrektur der GLT Stromzähler hinzugezogen (vgl. Kapitel 6.6.1).

In den ersten Betriebswochen wurde man auf die hohen Zulufttemperaturen der Lüftungsgeräte aufmerksam. Eine Einschränkung der Behaglichkeit wurde nicht bemerkt, da die Luftmengen planungsgemäß recht niedrig sind. Dies ist ein typischer Fehler der ohne ein Monitoring nicht bemerkt werden würde und der damit verbundene erhöhte Energieverbrauch würde wahrscheinlich nicht ergründet.

Neben der Handliste ist die GLT ein wichtiges Werkzeug zur Bereitstellung der Daten. Betrachtungen des momentanen Betriebszustandes der Pumpen und Temperaturen der Haustechnik geben einen schnellen Überblick. Die GLT wurde in den ersten beiden Betriebsjahren dahin gehend verbessert, dass die Ausgabefunktionen optimiert und die Eingreifmöglichkeiten geschaffen wurden.

Konkret waren das folgende Punkte:

- Daten-Exportfunktion erweitert für alle geloggte Daten
- Differenzierung der Export-Daten nach Monaten
- Aufschaltung weiterer Sensordaten (z.B. Rücklauftemperaturen der BKT, Zustandsänderungen der WP etc.)
- Umrechnung der Verbrauchseinheiten (bit-Angaben in kWh) bereits innerhalb der GLT
- Einrichten einer Eingabemöglichkeit zur Einstellung der Tageslichtsteuerung
- Aufschalten der Alarmanlage

Mit der ersten Jahresauswertung ergaben sich allerdings auch neue Fragestellungen, die mit dem vorhandenen Monitor-Konzept nicht ausreichend beantwortet werden konnte. So stellte sich die Frage wie man den Wärmebedarf für die Kältebereitstellung durch die Erdsonden genauer erfassen konnte. Man entschied sich für einen weiteren Wärmemengenzähler und einer entsprechenden Programmierung innerhalb der GLT, die

diese Daten aufzeichnet. Die fehlenden Messgeräte wurden im Hausanschlußraum installiert, doch wurde bislang die Programmierung an der GLT noch nicht zu Ende geführt.

Die Änderung der Regelstrategie von einer Referenzraumregelung zu einer Energiebedarfsregelung fand Ende 2004 statt (vgl. Kapitel 5.2.4). Da nun nicht mehr der Zustand eines (Referenz-) Raumes die Regelung vorgibt, konnte die Behaglichkeit verbessert werden und der Energieverbrauch reduziert werden. Die Einfachheit der Referenzraumregelung war wohl zunächst auch der Grund, länger diese Regelung beizubehalten als zuvor geplant. Die nachfolgende Energiebedarfsregelung war gerade zu Anfang schwieriger einzuregulieren. Die optimalen Bemessungszeiträume mussten für die Gebäude empirisch ermittelt werden.

Die Lage der Raumsensoren musste so erfolgen, dass sie die künftige Nutzung nicht beeinträchtigen, aber dennoch brauchbare Daten lieferten. Zu Beginn des Projektes war dass bei den Empfindungstemperatursensoren, die in der Raummitte aufgehängt waren, weniger ein Problem. Mit der Zeit wurden diese allerdings durch den jeweiligen Büronutzer aus dem Sichtbereich entfernt und auf das Regal gelegt. Lediglich im 2.OG wurde darauf bestanden diese Sensoren nicht zu entfernen. Hier wurde auch eine Messung mittels einer mobilen Station zum Vergleich der Raumsensoren durchgeführt.

Der Sensor auf der Nordseite zur Erfassung der Außenlufttemperatur auf dem Dach des Gebäudes war zu Betriebsanfang nicht gegen direkte Einstrahlung geschützt, da man nicht damit rechnete an dieser Position eine Beeinflussung durch direkte Sonnenstrahlung zu haben. Die Messwerte zeigten das Gegenteil, so dass der Sensor durch ein zusätzliches Blech abgeschirmt wurde.

Da die Messwertaufnahme neben einer Beurteilung des Gebäudes teilweise auch für die Regelung verwendet wird, muss die Genauigkeit ausreichend sein, um eine sinnvolle Generierung der Vorgabeparameter zu gewährleisten.

Da die Betonkernaktivierung mit Oberflächentemperaturen von 24 °C im Winter und ca. 22 °C im Sommer arbeitet, sind nur geringfügige Änderungen der Vorlauftemperatur gewünscht. Dies macht sehr präzise Messsensoren notwendig.

Ein relativer Messfehler von nur zwei Prozent bedeutet zum Beispiel eine Messwertabweichung von 0,52 K. Bei einem konventionellen Heizkörpersystem ist diese Änderung vollkommen unerheblich, bei der Betonkernaktivierung, ist dieser Unterschied jedoch bereits spürbar. Entsprechend mussten Kompensationsmaßnahmen und Erfahrungswerte in die Regelung einfließen, die seitdem ohne Probleme für die Behaglichkeit bei gleichzeitiger hoher Energieeffizienz funktioniert.

## 9 Fazit und Ausblick

Am Objekt konnte nachgewiesen werden, dass ein hocheffizientes Bürogebäude mit sommerlichem Wärmeschutz bei hoher Nutzerakzeptanz zu herkömmlichen Investitionskosten gebaut werden kann.

Die Idee der Gebäudeentwickler ist daher, aus BOB ein Produkt zu machen und ihn an mehreren Standorten nachzubauen. Das Monitoring bei BOB.1 in Aachen soll dann ebenso fortgeführt werden, wie ein vereinfachtes Monitoring an den weiteren Standorten. Auf diese Weise können weitere wichtige Erkenntnisse über Gebäude dieses Typs gewonnen werden.

## 10 Veröffentlichungen und Auszeichnungen

### 10.1 BDA Aachen - Auszeichnung guter Bauten 2003

Die „Auszeichnung guter Bauten 2003“ des Bundes deutscher Architekten Aachen wird an Architekten/innen Stadtplaner/innen und Landschaftsplaner/innen gemeinsam mit ihren Bauherren für beispielhafte baukünstlerische Arbeiten verliehen.

Die Jury befand:

„Das Ziel, ein Gebäude als einen interdisziplinären Entwurf zu realisieren, bei dem Haustechniker, Statiker und Architekt zusammen klar die Ausgangspunkte und Zielsetzungen, wie zum Beispiel Budget, Energieverbrauch, integrale Technik, Materialökonomie oder hohe Einteilungsflexibilität zu Beginn festlegen, um so gemeinschaftlich zu einem Gebäudekonzept zu kommen, wurde auf überzeugende Weise erreicht. Die Ausgewogenheit der architektonischen Lösung gerät dabei etwas in den Schatten der gesamtplanerischen und technischen Innovation.“

### 10.2 Natürliche Klimatisierung

Der Anspruch an ein modernes Gebäude ist weitreichend. Neben den harten Faktoren wie Lage, Form und Fassadengestaltung, werden auch die weichen Faktoren immer bedeutender. Das heißt, die Menschen, die in diesem Gebäude leben oder arbeiten, müssen sich dort auch wohlfühlen. Dabei spielt das Raumklima eine wichtige Rolle.

Für die Planung und Schaffung eines guten Raumklimas steht dem Planer eine Vielzahl konventioneller, technischer Lösungen zur Verfügung. Eines haben sie alle gemeinsam: Der Energiebedarf des Gebäudes steigt stark an.

Das Buch beschreibt, wie mit einer zu einem sehr frühen Zeitpunkt einsetzenden Planung das Raumklima auch mit innovativen Maßnahmen positiv beeinflusst werden kann: zum Beispiel mit einem Lüfterwärmetauscher oder einer Betonkerntemperierung. Neben technischen Lösungen bietet das Buch aber auch Anleitungen zur Gestaltung des gesamten

Gebäudeumfeldes. Exemplarisch werden die Gebäudeausrichtung und Verschattungsmaßnahmen beschrieben.

Fred Ranft, Bernhard Frohn  
 Natürliche Klimatisierung,  
 Birkhäuser, Basel 2004  
 Herausgeber: EnergieAgentur.NRW



### 10.3 Tageslichttechnik in Gebäuden

Architektur ist ein Balanceakt zwischen notwendiger Abgeschlossenheit von Gebäuden und der Offenheit, der Lichtdurchlässigkeit. Während in anderen bautechnischen Bereichen, wie Kühlung, Heizung und Lüftung, vor Jahren ein Umdenken eingesetzt hat, und die natürlichen und energiesparenden Potentiale der Raumgestaltung wieder an Bedeutung gewinnen, wurde das Tageslicht in seinem Wert bislang häufig unterschätzt. "Die unzeitgemäße Idee, Tageslicht sei vollkommen durch künstliche Lichtquellen zu ersetzen, entspricht zum Glück aber nicht mehr aktuellen Erkenntnissen", so Prof. Norbert Hüttenhölcher, Leiter der EnergieAgentur NRW in seinem Vorwort. Bereits in der Planung berücksichtigt, könne Tageslicht eine wichtige Rolle bei der lichttechnischen und raumklimatischen Optimierung der Gebäudehülle spielen. Hüttenhölcher: "Tageslicht hat nicht zuletzt eine positive Auswirkung auf Physis und Psyche, es erhöht das Wohlbefinden von Menschen in Gebäuden, es wirkt stimulierend und motivierend."

Im Vordergrund stehen die lichttechnische und raumklimatische Optimierung der Gebäudehülle sowie der Nutzerkomfort, z. B. an Arbeitsplätzen. Die Komplexität des Themas, die vom geeigneten Sonnen- und Blendschutz bis zur Gebäudeautomation reicht, wird anschaulich und praxisnah vermittelt. Das Buch wendet sich an Architekten, Fachplaner, Bauingenieure, Energieberater, Installateure, Bauträger und Bauherren.

Doris Haas-Arndt, Fred Ranft  
 Tageslichttechnik in Gebäuden  
 C.F. Müller, Heidelberg 2006  
 Herausgeber: EnergieAgentur.NRW



# Anhang

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Luftbild der Solarsiedlung in Aachen im Planungsstadium	4
Abbildung 2 - Visualisierung der Gebäudeansicht	4
Abbildung 3 – Entwurf der Grundstruktur	8
Abbildung 4 - Gebäudeansicht BOB	9
Abbildung 5 - Nutzungsflexibilität durch Teilung der Geschosse EG bis 2.OG	10
Abbildung 6 - Staffelgeschoss und Dachterrasse	10
Abbildung 7 - Außenansichten BOB	11
Abbildung 8 - Innenansichten	12
Abbildung 9 - Energieflussbild	14
Abbildung 10 - System aus Erdsonde, Wärmepumpe und BKT	14
Abbildung 11 - Lüftungskonzept	15
Abbildung 12 - Beispielhafte Darstellung des Tageslichteinfalls	16
Abbildung 13 - Kunstlichtkonzept	16
Abbildung 14 - Messwerterfassung mit der GLT	17
Abbildung 15 - Ausschnitt der Eingabefeldern über die GLT am Beispiel der Beleuchtung	18
Abbildung 16 - Regenwasseranlage	19
Abbildung 17 - Darstellung des Berechnungsmodells mit Schattendarstellung (Sommertag 12 <sup>00</sup> Uhr)	20
Abbildung 18 - Grundriss für die Simulationsberechnungen zum Zeitpunkt der Planung	21
Abbildung 19 – Kühl- und Heizenergiebedarf bei unterschiedlichem Glasflächenanteil	23
Abbildung 20 - Kühlenergiebedarf bei unterschiedlichem Einsatz von Verschattungen	25
Abbildung 21 - Einfluss der Speichermasse auf die Empfindungstemperatur	26
Abbildung 22 - Tagesverlaufes der Empfindungstemperaturen von Heizkörper und Flächentemperierung (Kühlfall) im Hochsommer	27
Abbildung 23 - Tagesverlaufes der Empfindungstemperaturen von Heizkörper und Flächentemperierung (Heizfall)	27
Abbildung 24 - Tagesverlauf der Empfindungstemperaturen an einem heißen Sommertag im August	29
Abbildung 25 - Dämmung der Bodenplatte	30
Abbildung 26 - Erstellung der Außenwände	31
Abbildung 27 - Blick vom Dachgarten auf den Besprechungsraum im 3.OG	31
Abbildung 28 - Innenausbau im 2.OG	32
Abbildung 29 - Erschließung über das Treppenhaus in der Bauphase und nach Fertigstellung	33
Abbildung 30 - Ansicht des Treppenhauses im EG	33
Abbildung 31 - Einbringung und Anschluss der Erdsonden	34
Abbildung 32 - Wärmepumpe mit Steuereinheit (oben) und Solepumpe (unten links) sowie Plattenwärmetauscher (unten rechts)	36
Abbildung 33 - Anlieferung und Verlegung der BKT-Matten	37
Abbildung 34 - Verlegung der BKT-Matten und Druckprüfung	37
Abbildung 35 - Beispiel für die Regelung mit der Lufttemperatur als Führungsgröße	38
Abbildung 36 - Beispiel für die bedarfsorientierte Regelung	39
Abbildung 37 - Lüftungskanäle in der Mittelzone und Lüftungsauslass in einem Besprechungsraum	40
Abbildung 38 - Blick in ein Büro und Lichtlenkung durch innen liegende Verschattung	41
Abbildung 39 - Abhangsegel und Beleuchtungssensor in der Mittelzone	42
Abbildung 40 - Flurbeleuchtung	43
Abbildung 41 - Toilettengang mit Präsenzmelder für Kunstlicht	43
Abbildung 42 - Lage der Messsensoren im Gebäude	45
Abbildung 43 - Messsensoren in den Referenzräumen (Nordseite und Südseite)	46
Abbildung 44 - Blower-Door Messung zur Überprüfung der Luftdichtigkeit der Fenster	49
Abbildung 45 - Abgedichteter Lüftungsauslass auf dem Dach.	50
Abbildung 46 – Blower-Door Messung und offene Luke im Fahrstuhlschacht.	50

Abbildung 47 - Thermografiekamera auf Stativ	51
Abbildung 48 - Messaufbau für den Responsetest //	53
Abbildung 49 - Aufbau der Gesteinsschichten und Prinzipdarstellung des Bohrlochs //	54
Abbildung 50 - Skizze mit den Messpunkten zur Bestimmung des Tageslichtquotienten	55
Abbildung 51 - Mischgas- und CO <sub>2</sub> -Sensor im Vergleich //	56
Abbildung 52 - Außenlufttemperatur nach DWD im Vergleich zu den vor Ort gemessenen Außenlufttemperaturen	59
Abbildung 53 - Globale und diffuse Strahlung nach DWD 2005 (Standort Bochum)	61
Abbildung 54 - Häufigkeit und Maximalwert der Global- und Diffusstrahlung	61
Abbildung 55 - Schattendarstellung im aktuellen Modell für einen Tag im März um 9 <sup>oo</sup> Uhr	63
Abbildung 56 - Energiebilanz im Sommer Simulation IST 2005	65
Abbildung 57 - Energiebedarf der BKT für die Simulationsmodelle: Planung und IST-Zustand sowie dem realen Verbrauch für 2005	66
Abbildung 58 - spezifischer Stromverbrauch Bilanzgrenze Solarbau nach Verbrauchsgruppen unterteilt für die Jahre 2004 bis 2006	68
Abbildung 59 - wöchentlicher Endenergieverbrauch 2006 für die Beleuchtung im EG und im 2.OG	69
Abbildung 60 - wöchentlicher spezifischer Stromverbrauch für die Belüftung 2005 im 2. OG und 3.OG	71
Abbildung 61 - Wöchentlicher spezifischer Stromverbrauch für die Durchlauferhitzer 2006 im EG und im 3.OG	71
Abbildung 62 - spezifischer Stromverbrauch der Arbeitsmittel in den Jahren 2004 bis 2006	72
Abbildung 63 - wöchentlicher spezifischer Stromverbrauch für die Arbeitsmittel im 1.OG links und 2.OG in 2006	73
Abbildung 64 - wöchentlicher Stromverbrauch im 2.OG für die Drucker und Kopierer im Jahr 2006	74
Abbildung 65 - Laufzeiten von Pumpen und Verdichter in 2006	76
Abbildung 66 - Bilanzgrenze zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe	78
Abbildung 67 - Prinzipschema für den Kühlfall	79
Abbildung 68 - Vorlauftemperatur Sole im Vergleich zur Außenlufttemperatur	80
Abbildung 70 - Raumlufttemperaturen in den nördlichen Referenzräumen für eine Woche im Kühlfall	82
Abbildung 71 - Raumlufttemperatur in den südlichen Referenzräumen für eine Woche im Kühlfall	82
Abbildung 72 - Empfindungstemperatur in den südlichen Referenzräumen für eine Woche im Kühlfall	83
Abbildung 73 - Empfindungstemperatur in den südlichen Referenzräumen für eine Woche im Heizfall	83
Abbildung 74 - Raumtemperaturen, Oberflächentemperaturen und der Rücklauftemperatur der BKT an einem Sommertag für den Referenzraum 2.OG Süd	84
Abbildung 75 - Messung von Empfindungs- und Raumlufttemperatur im Vergleich zu VL- und RL- Temperatur der BKT	85
Abbildung 76 - Verlauf des Mischgases an einem Tag im Sommer (14. Juni 2005)	86
Abbildung 77 - Verlauf CO <sub>2</sub> und Mischgas im Referenzbüro 2.OG Süd an einem Tag im Sommer (14. Juni 2005)	87
Abbildung 78 - mittlere relative Luftfeuchtigkeit aller Referenzbüros im Gebäude 2004	87
Abbildung 79 - wöchentlicher Stromverbrauch für die Lüftung in 2005 im 1.OG (linke Nutzungseinheit)	88
Abbildung 80 - temporäre Messung der Luftgeschwindigkeit im EG 2005 in einem Büro mit bodentiefen Fenstern	88
Abbildung 81 - Tageslichtquotient im Referenzbüro 2.OG auf der Nordseite	89
Abbildung 82: Blendschutz mit Licht lenkender Funktion im oberen drittel	90
Abbildung 83 - Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke im Südwest Eckbüro im 2.OG	91
Abbildung 84 - Kombibüro für die akustische und schalltechnischen Messungen und Umfragen im 2.OG	92
Abbildung 85 - Luftundichtigkeit am Fenster durch Kunstnebel sichtbar gemacht	93
Abbildung 86 - Thermografieaufnahmen der Nordwest-Fassade	94
Abbildung 87 - Oberflächentemperatur einer nicht ausreichend durchflossenen BKT Matte (2.OG Eckbüro Nordwest)	95
Abbildung 88 - Zufriedenheit am Arbeitsplatz für verschiedene Parameter //	96
Abbildung 89 - Zufriedenheitsmatrix nach Wichtigkeit für die Benutzer //	96
Abbildung 90 - Vergleich der Baukosten	97
Abbildung 91 - Endenergie- und spezifische Energieverbrauchskosten nach Gruppen	98

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Projektdaten	6
Tabelle 2 - Ziel- und Planungswerte für den Energieverbrauch des Gebäudes	6
Tabelle 3 - Kosten der Baukonstruktion und der technischen Anlagen	6
Tabelle 4 - Tabellen mit Zahlen und Fakten zum Gebäude	13
Tabelle 5 - U-Werte der Bauteile des Gebäudes	13
Tabelle 6 - Gebäudehülle der Endvariante zum Zeitpunkt des Planungsabschlusses	28
Tabelle 7 - Kostenanteile für den Wärmeschutz in Kostengruppe 38000	29
Tabelle 8 - Kostenanteile für die technischen Anlagen in Kostengruppe 400	30
Tabelle 9 - Kennwerte des Erdsondenfeldes	35
Tabelle 10 - Kennwerte der Wärmepumpe	35
Tabelle 11 - Kennwerte der Betonkerntemperierung	36
Tabelle 12 - Kennwerte des Lüftungsgerätes	40
Tabelle 13 - Messpunkte für die Erfassung der Raumklimadaten und beigeordnete Sensoren	46
Tabelle 14 - Messpunkte für Lüftungsanlagen und BKT	46
Tabelle 15 - Messpunkte für technische Anlagen	47
Tabelle 16 - Stromverbrauchsmessungen	48
Tabelle 17 - Abschätzung der Geothermie	52
Tabelle 18 - Ergebnisse des Responsetests	53
Tabelle 19 - Vergleich Planung und Ist auf Primärenergiebasis bezogen	58
Tabelle 20 - Häufigkeit sowie Höchst- und Tiefstwert der Außenlufttemperatur	60
Tabelle 21 - Unterschiede in den U-Werten der Konstruktionen bei den Simulationsmodellen: Planung und IST-Zustand	63
Tabelle 22 - Gegenüberstellung der inneren Wärmelasten bei den Simulationsmodellen Planung und IST-Zustand (* die höheren Werte gelten für den Winterfall)	64
Tabelle 23 - Änderungen der Technik und der entsprechenden Regelung bei den Simulationsmodellen: Planung und IST-Zustand	65
Tabelle 24 - Energieverbrauch von elektrischer Energie in 2005 nach Verbrauchsgruppen	67
Tabelle 25 - spezifischer Verbrauch für Beleuchtung in den jeweiligen Nutzungseinheiten in den Jahren 2004 bis 2006	69
Tabelle 26 - spezifischer Verbrauch für die Lüftungsgeräte in den jeweiligen Nutzungseinheiten in den Jahren 2003 bis 2006	70
Tabelle 27 - Stromverbrauch für die elektrischen Arbeitsmittel im 2.OG in den Jahren 2004 bis 2006	73
Tabelle 28 - Liste der Drucker und Kopierer im 2.OG	74
Tabelle 29 - spezifischer Stromverbrauch der Pumpen in 2005 und 2006 ermittelt über die wöchentlichen Laufzeiten	75
Tabelle 30 - Heizwärme, spezifische Kennzahl (* nach VDI 3807 bereinigt), die Anzahl der Heizgradtage sowie die Jahresarbeitszahl	77
Tabelle 31 - Anzahl der Stunden mit Temperaturen >26°C (ET / LT) während der Arbeitszeit (Mo. – Fr. zwischen 8°° - 18°° Uhr) für die Referenzräume	84
Tabelle 32 - Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz bei unterschiedlicher Stellung des Blendschutzes im Referenzbüro Süden 2.OG	90
Tabelle 33 - Spezifische Energiekosten2005	97

## Quellen- und Bildernachweis

Wenn nicht anders vermerkt, sind alle Baustellen- und Technikfotos von Hahn-Helten und VIKA erstellt worden. Weitere Aufnahmen stammen von:

Hempel – Titelbild, Abbildung 4, Abbildung 7, Abbildung 8, Abbildung 27, Abbildung 29, Abbildung 30

Ranft - Abbildung 38, Abbildung 86, Abbildung 87

---

/i/ Th. Hettinger, G. Kaminsky, H. Schmale – Ergonomie am Arbeitsplatz

/ii/ [www.waermepumpe24.de](http://www.waermepumpe24.de)

/iii/ Lange & Söhne Brunnenbau GmbH

/iv/ Thermokon Sensortechnik GmbH

/v / [www.greeneffect.org](http://www.greeneffect.org) c.o. Stadt Frankfurt - Energierreferat

/vi/ Dipl.-Ing. Elke Gossauer- Universität Karlsruhe (TH) - Nutzerbefragungen in Bürogebäuden als Spiegel der Zufriedenheit (Vortrag Dessau 13. Mai 2005)

/vii/ Dipl.-Ing. Elke Gossauer- Universität Karlsruhe (TH) - Nutzerbefragungen in Bürogebäuden als Spiegel der Zufriedenheit (Vortrag Dessau 13. Mai 2005)