

Revitalisierung des Haupthauses der KfW Bankengruppe in Frankfurt

Monitoring und Betriebsoptimierung im Rahmen von EnSan, Teilkonzept 3

Abschlussbericht

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE



© Carsten Costard

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags unter dem Förderkennzeichen 0335007S gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Auftraggeber: BMWi, Forschungsvorhaben 0335007S

Auftragnehmer: Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau
Karlsruher Institut für Technologie

Fachgebietsleitung: Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner

Autoren: Dipl.-Ing. Michael Kleber
Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner (Koautor)

Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta)
Karlsruher Institut für Technologie, Campus Süd
Englerstraße 7
76131 Karlsruhe

Telefon: +49 721 608 2178
Telefax: +49 721 608 6092
Internet: www.fbta.uni-karlsruhe.de

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage und Gebäude	13
1.1. Förderprojekt EnSan	13
1.2. Projektkontext	14
1.3. Architektur	14
1.4. Zustand vor der Sanierung	15
1.5. Projektbeteiligte	18
2. Energiekonzept	21
2.1. Einleitung	21
2.2. Gebäudehülle	22
2.2.1. Fassade	22
2.3. Heizen	23
2.3.1. Fußbodenheizung	24
2.3.2. Warmwasser	25
2.4. Lüften	25
2.4.1. Zentrale Abluftanlage	27
2.4.2. Nachtlüftung und -kühlung	28
2.4.3. Zu- und Abluftanlagen	29
2.5. Kühlen	31
2.5.1. Vorentwurfsplanung	31
2.5.2. Umsetzung	32
2.6. Infrastrukturmaßnahmen	36
2.7. Beleuchten	39
2.7.1. Tageslicht	39
2.7.2. Kunstlicht Büros	40
2.7.3. Kunstlicht Flure	41
2.8. Wasser	42
2.8.1. Vakuumtoiletten	42
3. Monitoring	44
3.1. Ziele des Monitorings	44
3.2. Historie	44
3.3. Messkonzept	45
3.3.1. Erfassung Heizen	45
3.3.2. Erfassung Lüften	46
3.3.3. Erfassung Kühlen	46
3.3.4. Erfassung Beleuchten	47
3.3.5. Gesamtstromverbrauch und sonstige Stromverbraucher	47
3.3.6. Erfassung Raumparameter	48
3.3.7. Erfassung Klimadaten	49
3.3.8. Datenanbindung	50
3.3.9. Fehlerhaft eingebaute Wärmezähler	50
3.4. Mobile Messungen	52
3.4.1. Raumklimaanalysator	52

3.4.2.	Nachhallzeit- und Schallpegelmessgerät	52
3.4.3.	Netzanalysegerät	53
3.4.4.	Luxmeter	53
3.4.5.	Mobile Datenlogger	53
3.4.6.	Steckdosenmessgeräte	54
3.4.7.	Infrarotkameras	54
4.	Ergebnisse des Monitorings	55
4.1.	Energiebilanzen	55
4.1.1.	Bedarf nach EnEV 2002	55
4.1.2.	Bedarf nach Systematik der Energieplaner	55
4.1.3.	Berechnungen nach DIN V 18599	60
4.1.4.	Vergleich von Messung mit Berechnungen	63
4.2.	Heizen	66
4.2.1.	Thermische Qualität der Gebäudehülle	71
4.2.2.	Brennwertkessel und BHKW	74
4.2.3.	Statische Heizung	78
4.2.4.	Fußbodenheizung	81
4.2.5.	Konditionierung der Zuluft	84
4.2.6.	Warmwasser	87
4.2.7.	Hilfsenergie Heizen	88
4.3.	Lüften	90
4.3.1.	Zentrale Abluftanlage	91
4.3.2.	Druckdifferenzen	96
4.3.3.	Luftqualität Büros	96
4.3.4.	Lüftungsanlage Küche	98
4.3.5.	Lüftungsanlage Halle Erdgeschoss	98
4.3.6.	Lüftungsanlage Vorstand	99
4.3.7.	Lüftungsanlage Sitzungssaal	103
4.3.8.	Lüftungsanlage Abluft WCs	103
4.3.9.	Klimageräte EDV	106
4.3.10.	Fazit	106
4.4.	Kühlen	107
4.4.1.	Kühldecken	111
4.4.2.	Klimaboden Sitzungssaal	112
4.4.3.	Luftkühlung gesamt	113
4.4.4.	Luftkühlung Vorstand	114
4.4.5.	Luftkühlung Halle	115
4.4.6.	Luftkühlung Sitzungssaal	115
4.4.7.	Sonstige Luftkühlung	115
4.4.8.	Kälte Klimageräte EDV	118
4.4.9.	Hilfsenergie Kühlen	118
4.5.	Beleuchten	120
4.5.1.	Tageslichtqualität der Büroräume	120
4.5.2.	Kunstlichtregelung	124

4.5.3.	Büros	127
4.5.4.	Flure	129
4.5.5.	Treppenhäuser	132
4.5.6.	WCs	133
4.5.7.	Halle Erdgeschoss	133
4.5.8.	Sitzungssaal	135
4.5.9.	Sonstige Beleuchtung	135
4.6.	Stromverbrauch	136
4.6.1.	Gesamtstromverbrauch	136
4.6.2.	Stromverbrauch weiterer Haustechnik	138
4.6.3.	Stromverbrauch nutzerspezifischer Verbraucher	138
4.6.4.	Stromverbrauch Arbeitsmittel	140
4.6.5.	Aufteilung des Gesamtstromverbrauchs	141
4.7.	Wasser	143
4.8.	Thermischer Komfort	144
4.8.1.	Komfortmessungen	144
4.8.2.	Überschreitungsstunden von Komfortbereichen	146
4.8.3.	Fazit	148
4.9.	Akustischer Komfort	151
4.9.1.	Nachhallzeiten	151
4.9.2.	Schallpegelmessungen an Vakuumtoiletten	152
4.10.	Nutzerverhalten	153
4.10.1.	Anwesenheitszeiten	153
4.10.2.	Sonnenschutz	154
4.10.3.	Fensteröffnungszeiten	154
4.10.4.	Kunstlichtnutzung	158
4.10.5.	Temperatureinstellung	161
4.11.	Statistische Modelle zur Verbrauchsprognose	165
4.11.1.	Automatisierte Verbrauchsüberwachung	165
5.	Softwareentwicklung	169
5.1.	Messdatenvisualisierung	169
5.2.	Tagesaktuelle Jahresenergiebilanz	171
5.3.	„Laiensystem“	172
6.	Wissenstransfer	173
7.	Fazit und Ausblick	176
A.	Anhang	178
A.1.	Messpunkte	178
A.2.	Planungswerte Lüftungsanlagen	183
A.3.	Abbildungsverzeichnis	185
A.4.	Tabellenverzeichnis	189
A.5.	Literatur	191

Vorwort

Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt die Erkenntnisse und Ergebnisse des durch das Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau des Karlsruher Instituts für Technologie von Januar 2003 bis Mai 2009 durchgeführten Forschungsvorhabens. Gegenstand der Forschung war die wissenschaftliche Begleitung der Revitalisierung des Haupthauses der KfW Bankengruppe in Frankfurt a.M. im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten „EnOB“-Projektes. Diese Begleitung umfasste im Wesentlichen die kontinuierliche und temporäre Erfassung von Messdaten für die Bildung von Energiebilanzen und Kennwerten zur Überprüfung und Optimierung des Gebäudebetriebs.

Für die finanzielle Unterstützung des Projektes durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sei an dieser Stelle besonders gedankt, genauso wie dem Projektträger in Jülich für die durchgängig sehr gute Betreuung.

Erwähnt sei auch die gute Zusammenarbeit mit der KfW Bankengruppe, der ip5 ingenieurpartnerschaft und den weiteren am Projekt beteiligten Firmen und Personen. Der KfW Bankengruppe gebührt insbesondere der Dank für die finanzielle Unterstützung bei der Installation von zusätzlicher Messtechnik sowie für die Verlängerung der Messdatenerfassung um eineinhalb Jahre aus eigenen Mitteln.

Dank gilt auch allen Kollegen, studentischen Hilfskräften und weiteren Beteiligten, die zum Gelingen dieses Projektes beigetragen haben.

Karlsruhe, im November 2009

Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner

Dipl.-Ing. Michael Kleber

Aufbau des Berichtes

Im Folgenden werden die Inhalte der einzelnen Kapitel kurz beschrieben.

- **Kurzfassung**

Die wichtigsten Ergebnisse des Projektes werden hier zusammenfassend erläutert.

- **Kapitel 1: Ausgangslage und Gebäude**

Hier werden zunächst die Einbindung des Projektes in das Förderprogramm sowie die zeitliche Entwicklung des Projektes beschrieben. Die Aufgaben und Zuständigkeiten der Projektbeteiligten werden aufgezeigt. Der abschließende Teil des Kapitels stellt die Gebäudearchitektur dar.

- **Kapitel 2: Energiekonzept**

Dieses Kapitel befasst sich ausführlich mit den zugrundeliegenden Ideen und Konzepten, die das Erreichen bzw. Unterschreiten der Energiebedarfszielwerte sowie hohen Nutzerkomfort gewährleisten sollen. Dazu werden die haustechnischen Anlagen sowie deren Funktion im Gesamtzusammenhang beschrieben.

- **Kapitel 3: Monitoring**

Ca. 300 Messpunkte wurden im 10-Minuten-Intervall oder als Echtzeitereignisse aufgezeichnet und in einer Datenbank gespeichert. In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Erfassung der Messdaten hard- und softwaretechnisch realisiert wurde. Es wird gezeigt, welche Bereiche im Gebäude permanent erfasst und wo mit temporärer Messtechnik ergänzende Messungen durchgeführt wurden. Verschiedene Messgeräte und Messverfahren werden beschrieben.

- **Kapitel 4: Ergebnisse des Monitorings**

Das Kapitel 4 führt die Auswertungen der Messdaten auf. Zu Beginn werden die Gesamtenergiekennwerte des Gebäudes vorgestellt. Die ermittelten Werte werden mit verschiedenen Bedarfsberechnungen verglichen. Getrennt nach den verschiedenen haustechnischen Gewerken werden die Ergebnisse diskutiert, Schwachstellen und Fehler aufgezeigt und durchgeführte Optimierungsmaßnahmen erläutert.

- **Kapitel 5: Softwareentwicklung**

Verschiedene im Rahmen des Projektes entwickelte und weiterentwickelte Software-Tools sind Gegenstand dieses Kapitels. Sie werden anhand von Beispielanwendungen und Grafiken erläutert.

- **Kapitel 6: Wissenstransfer**

Dieses Kapitel zeigt auf, wie gewonnene Erkenntnisse über das Internet und durch Publikationen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurden. Zusätzlich war das Projekt Gegenstand von Vorlesungen und Studienarbeiten.

- **Kapitel 7: Fazit und Ausblick**

Die gewonnenen Erkenntnisse werden resümiert und Hinweise für weiteren Handlungsbedarf hinsichtlich der Betriebsoptimierung des Haupthauses gegeben.

Kurzfassung

Das sogenannte Haupthaus der KfW Bankengruppe wurde 1968 im Frankfurter Westend nahe des Palmengartens erbaut und von 2003 bis 2006 umfassend saniert. Das Gebäude besteht aus vier miteinander verbundenen Bürotürmen mit zehn bis fünfzehn Geschossen. Der vierte, nördlichste Turm wurde im Zuge der Sanierung um drei auf elf Geschosse erhöht. Das Gebäude hat heute eine Nettogeschossfläche von 21.875 m² und bietet Platz für 575 Mitarbeiter. Das Regelgeschoss weist im Wesentlichen nach Osten und Westen orientierte Büroräume auf, die jeweils über einen Flur erschlossen werden. Zwischen den beiden Fluren befinden sich Treppenhäuser und Aufzüge, Sanitärräume, Teeküchen und Archivräume. Im neunten Obergeschoss zweier Türme gibt es Speiseräume mit einer angegliederten Küche, das Erdgeschoss wurde erweitert, so dass dort heute ein großer Sitzungssaal, drei kleinere Sitzungsräume, eine Wandelhalle und ein helles Eingangsfoyer das Raumprogramm ergänzen.

Ausschlaggebend für die Sanierung waren nicht länger zunehmende Mängel im Brandschutz, eine nicht mehr zeitgemäße Arbeitsplatzsituation in den Büros und in die Jahre gekommene haustechnische Anlagen. Die KfW Bankengruppe, die den Klimaschutz im Wohngebäudebereich und im mittelständischen Gewerbe fördert, wollte nicht nur die funktionale und gestalterische Qualität deutlich steigern, sondern im Rahmen einer integralen Planung ein energieeffizientes Gebäude umsetzen und so die Ziele ihrer eigenen Förderprogramme unterstreichen.

Konzept

Durch die Zusammenarbeit von Projektsteuerer, Architekten, Fachplanern und Energieplanern entstand ein integrales Gebäude- und Energiekonzept. Die Energieplaner führten regelmäßig die erzielbare Primärenergiebilanz der Haustechnik für den jeweils aktuellen Planungsstand nach und kommunizierten diese an das Team. Die Berechnung erfolgte nach einer eigens entwickelten Systematik, die sich jedoch an Richtlinien wie z.B. dem Leitfaden Elektrische Energie (LEE) [4], Methoden der DIN EN 832 und der EnEV orientierte.

Die Büroräume werden über Radiatoren im Brüstungsbereich beheizt. Im Erdgeschoss sind die Halle, das Foyer und der große Sitzungssaal mit einer Fußbodenheizung versehen, einige Lüftungsanlagen verfügen über Vor- bzw. Nacherhitzer sowie Wärmerückgewinnung. Die Standardbüros werden je Turm über eine zentrale Abluftanlage belüftet. Dabei strömt Außenluft über Nachströmöffnungen oberhalb jedes zweiten Fensters in die Büros. Abgesaugt wird die Abluft über die Schattenfuge der abgehängten Decke in den Zwischenraum und von dort in einen zentralen Abluftkanal, der sie über das Dach nach außen führt. Diese Lüftung soll präsenz- und außentemperaturabhängig geregelt werden, um unnötige Lüftungswärmeverluste im Winter und vermeidbare Wärmeeinträge im Sommer zu vermeiden. Im Sommer wird die Lüftung auch zur Nachtkühlung genutzt, um die Kühllasten in den Büros tagsüber möglichst weit zu reduzieren.

Der innovative, automatisch betriebene Sonnenschutz aus einem Glas-Sandwichelement mit eingelegtem Streckmetall verringert zusätzlich die externen Lasten. Der verbleibende Kühlbedarf wird über Kühldecken gedeckt. Der Klimaboden im großen Sitzungssaal kann auch gekühlt werden, die Lüftungsanlagen des Sitzungssaals, der Halle, der Küche und weiterer Räume mit höheren Lasten sind mit Kühlregistern ausgestattet.

Die Beleuchtung in den Büros ist präsenz- und tageslichtabhängig ausgeführt, die installierte Leistung beträgt 16 W/m², wobei theoretisch auf dem Arbeitsplatz eine Beleuchtungsstärke bis 1200 lx möglich ist, momentan aber eine Einstellbarkeit durch den Nutzer zwischen 300 und 750 lx implementiert wurde. In den Fluren beträgt die installierte Leistung bis auf wenige Ausnahmen 6 W/m².

Neben den klassischen Energieträgern war auch die Ressource Wasser Gegenstand des Energiekonzeptes. In den WCs wurden Vakuum-Toiletten installiert, das Wasser aus den Waschbecken wird einer Grauwassernutzung zugeführt und das Regenwasser vom Dach wird in einer Zisterne gesammelt und für die Gartenbewässerung genutzt.

Die Bereitstellung von Wärme und Kälte erfolgt aus einem Kraft-Wärme-Kälte-Verbund, in den drei BHKW, zwei neue Gasbrennwertkessel, vier Absorptionskältemaschinen und vier Kompressionskältemaschinen integriert sind. Dieser Verbund versorgt auf dem Areal der KfW zur Zeit noch zwei weitere Gebäude. Der Betrieb dieses Verbundes wirkt sich entscheidend auf die Primärenergiefaktoren und somit auch auf die Primärenergiebilanz aus. Diese Verbrauchsbilanz für die ersten zwei Jahre des Gebäudebetriebs zu ermitteln und mit den berechneten Bedarfswerten zu vergleichen, war das primäre Ziel des Monitorings.

Monitoring

Für das Monitoring wurde anders als z.B. im Projekt „Monitoring DB Netz AG“ [12] kein eigenes Messnetz aufgebaut, sondern auf die Gebäudeleittechnik aufgesetzt. Raumparameter wie Zustand der Beleuchtung oder Position des Sonnenschutzes waren bereits verfügbar, da im Gebäude eine komplexe Einzelraumregelung implementiert wurde. Wärme-, Kälte- und Stromzähler sowie weitere zusätzliche Sensoren wurden auf den vorhandenen LON-Bus [14] aufgeschaltet. Alle Daten werden zentral über einen OPC-Server bereitgestellt. Auf einem eigenen Rechner im Gebäude wird vom fbta ein OPC-Client betrieben, der alle zehn Minuten die aktuellen Daten des OPC-Servers abfragt, diese in eine Datei exportiert und einmal pro Nacht über das Internet an den Datenbankserver in Karlsruhe schickt. Hier werden mittlerweile Daten von vier Gebäuden gehalten und verwaltet.

Nicht so reibungslos wie erhofft funktionierte dabei jedoch die Kommunikation zwischen dem OPC-Client und den Servern. Immer wieder gab es für mehrere Stunden, manchmal auch Tage, Ausfälle. Es musste festgestellt werden, dass OPC [15] zwar als Standard bezeichnet wird, sich in Details jedoch Unterschiede von Hersteller zu Hersteller ergeben. In Bezug auf die Energiezähler muss festgestellt werden, dass der sachgemäße Einbau und die zuverlässige Inbetriebnahme heute noch nicht zum Standardrepertoire einer jeden Heizungsfirma gehören. Insbesondere im Bestand ergeben sich für die Messgenauigkeit der Zähler Probleme, weil die erforderlichen Beruhigungsstrecken nicht immer eingehalten werden können.

Zur Auswertung der erfassten Daten wurde auf Basis der langjährigen Erfahrung im Monitoring eine Software entwickelt, die unabhängig von der eingesetzten Gebäudeleittechnik und vom Betriebssystem funktioniert und speziell auf Auswertungen im Gebäudebetrieb zugeschnitten ist. Dieses Werkzeug bietet einen übersichtlichen Umgang mit den gespeicherten Messdaten an.

Die kontinuierlichen Messungen wurden durch temporäre Raumklima-, Strom-, Schall- und Lichtmessungen ergänzt. Außerdem wurden Thermobildanalysen der Gebäudehülle durchgeführt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitung zeigen, dass in bestimmten Bereichen von Beginn an oder durch erfolgte Optimierungen gute Kennwerte erreicht wurden, sie offenbaren aber auch, dass es an einigen Stellen noch Handlungsbedarf gibt.

Die Energiekennzahlen (Abbildung 1) zeigen, dass die Zielwerte noch nicht erreicht werden konnten. Insbesondere bei der Heizenergie und dem Stromverbrauch für die Lüftungsanlagen besteht noch Handlungsbedarf. Der Kälteverbrauch wurde von 2007 auf 2008 deutlich gesenkt, der Stromverbrauch für die

Beleuchtung lag bereits im ersten Jahr im Bereich der Werte aus dem Förderantrag und unterhalb der Prognosen aus dem Jahr 2006.

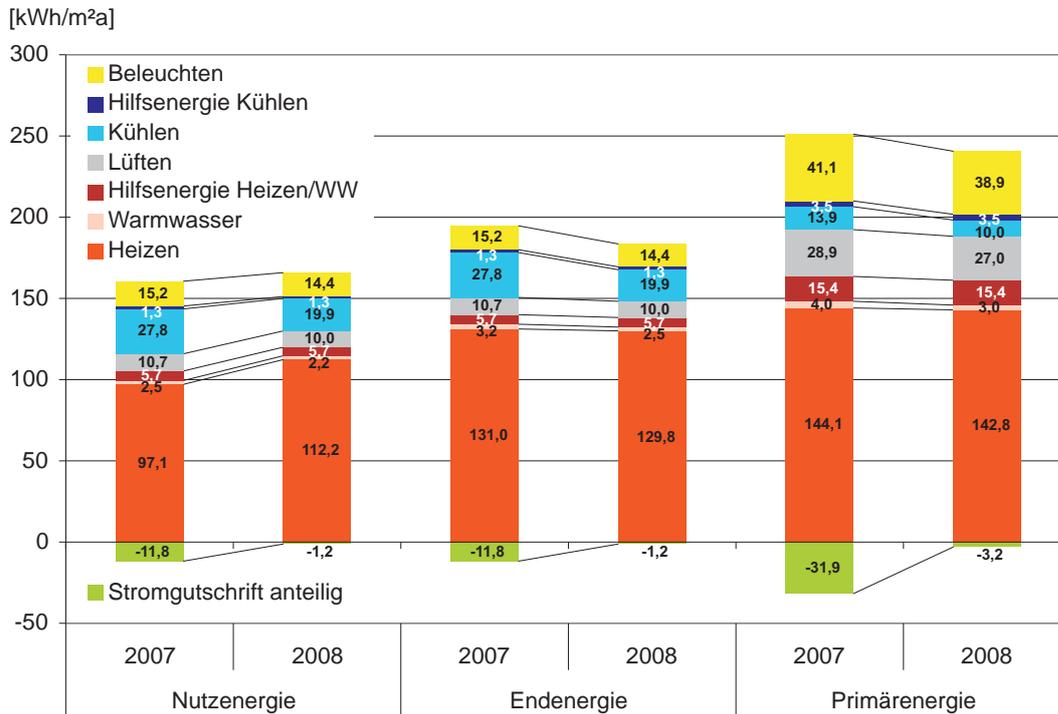


Abbildung 1: Die ermittelten Energieverbrauchskennzahlen für die Jahre 2007 und 2008 getrennt nach Gewerken und Nutz-, End- und Primärenergie

Der Endenergieverbrauch für die Heizung lag mit ca. 130 kWh/m²a sowohl 2007 als auch 2008 deutlich über dem Zielwert. Ein Grund für einen größeren Heizwärmebedarf sind die höheren Solltemperaturen in den Büros, die im Mittel bei 22 °C liegen. In der letzten Bedarfsprognose war dieser Einfluss gegenüber einer Solltemperatur von 20 °C mit zusätzlich 7 kWh/m²a beziffert worden. Auswirkung auf den Wärmeverbrauch hat ebenso die verminderte Luftdichtheit des Gebäudes, die im Bereich der Aufzugsschächte nachweislich vorhanden war. Diese waren aufgrund des Brandschutzes auf dem Dach zur Außenluft hin geöffnet, wurden aber 2008 nachträglich durch brandschutztaugliche Jalousieklappen geschlossen. Diese Maßnahme sollte nach Berechnungen die Infiltrationsluftwechselrate um 0,1 h⁻¹ vermindern und damit 7 kWh/m²a Heizenergie einsparen. Hinzu kommt, dass der Sitzungssaal und die Halle im EG deutlich mehr Nutzungsstunden aufwies als in der Planung angenommen. Da in den dortigen Lüftungsanlagen die Zuluft erwärmt wird, musste auch hier mehr Heizenergie aufgebracht werden. Schließlich konnte noch festgestellt werden, dass die Regelung der zentralen Abluftanlage nicht optimal eingestellt war. Der Ventilator lief entgegen der Planung teilweise nachts im Winter und in den Übergangszeiten, so dass kalte Luft ins Gebäude gesaugt und dadurch die Lüftungswärmeverluste zusätzlich erhöht wurden.

Für den Stromverbrauch der Luftförderung wurden im Jahr 2008 endenergetisch 10 kWh/m²a ermittelt, was doppelt soviel ist wie der berechnete Bedarf. Zum einen spiegeln sich hier ebenso die höheren Nutzungszeiten wider, zum anderen war die Regelung einiger Anlagen noch nicht so umgesetzt wie geplant. Die Lüftungsanlage der Halle im EG z.B. wies 2007 2.000 statt der angenommenen 600 Volllaststunden auf. Eine WC-Abluftanlage lief lange Zeit im Dauerbetrieb, die Regelung wurde im Juli 2008 korrigiert und der Stromverbrauch konnte hier um 60% gesenkt werden. Außerdem wurde anhand der ermittelten maximalen Leistungsaufnahmen der Ventilatoren festgestellt, dass deren Effizienz nicht an die Planwerte heranreicht. Auffällig sind die Anlagen für die Halle und den Sitzungssaal mit volumetrischen Kenn-

werten von jeweils ca. $0,9 \text{ Wh/m}^3$. Hier sind die beengten Verhältnisse im Baubestand und die deshalb teilweise geringen Kanalquerschnitte die Ursache.

Die Beleuchtung in den Büros ist effizient und der tageslichtabhängige Verbrauch anhand von Stromverbrauchswerten gut zu erkennen. In einem der vier Treppenhäuser wurde durch temporäre Messungen mittels Datenloggern festgestellt, dass dort die Beleuchtung im Dauerbetrieb brannte, während sie in den anderen nach einem Zeitprogramm geschaltet wurde. In einem von diesen war das Zeitschaltprogramm auch am Wochenende aktiv. Hier ließen sich durch die richtige Regelung 31 Prozent des Stromverbrauchs einsparen. Insgesamt betrug der Endenergieverbrauch für die Beleuchtung im Jahr 2007 $15,2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und $14,4 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ im darauffolgenden Jahr.

Lag der Kälteverbrauch 2007 mit $27,8 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Endenergie) noch erheblich über dem Planwert von 14,6, wurde 2008 ein Kennwert von $19,9 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ erreicht. Primärenergetisch macht sich hier aber der Ausfall zweier Absorptionskältemaschinen (AKM) bemerkbar, insgesamt trugen die AKM im Jahr 2007 nur 27 % zur Kälteerzeugung bei, den Rest deckten die Kompressionskältemaschinen. Für die Berechnung der Primärenergiebilanz musste hier der Primärenergiefaktor grob ermittelt werden. Er liegt mit 0,5 im Bereich des Wertes vor der Sanierung, der Wert für den optimalen Betrieb des Kraft-Wärme-Kälte-Verbundes wurde in der Planungsphase auf 0,3 berechnet.

Für die Wärmeerzeugung war der Ziel-Primärenergiefaktor inklusive der Stromgutschrift für die Blockheizkraftwerke bei 80% Deckungsanteil auf ca. 0,1 berechnet worden. Im Jahr 2007 stellten die BHKW jedoch nur 22 % der Heizenergie bereit, 2008 waren es wegen eines Defekts der Anlagen nur noch 1,5 Prozent. Entsprechend erhöht fällt die Primärenergiebilanz in diesen Bereichen aus. Abbildung 2 zeigt die mit den realen Primärenergiefaktoren ermittelten Kennwerte im Vergleich zu jenen bei einem optimalen Betrieb des Kraft-Wärme-Kälte-Verbundes.

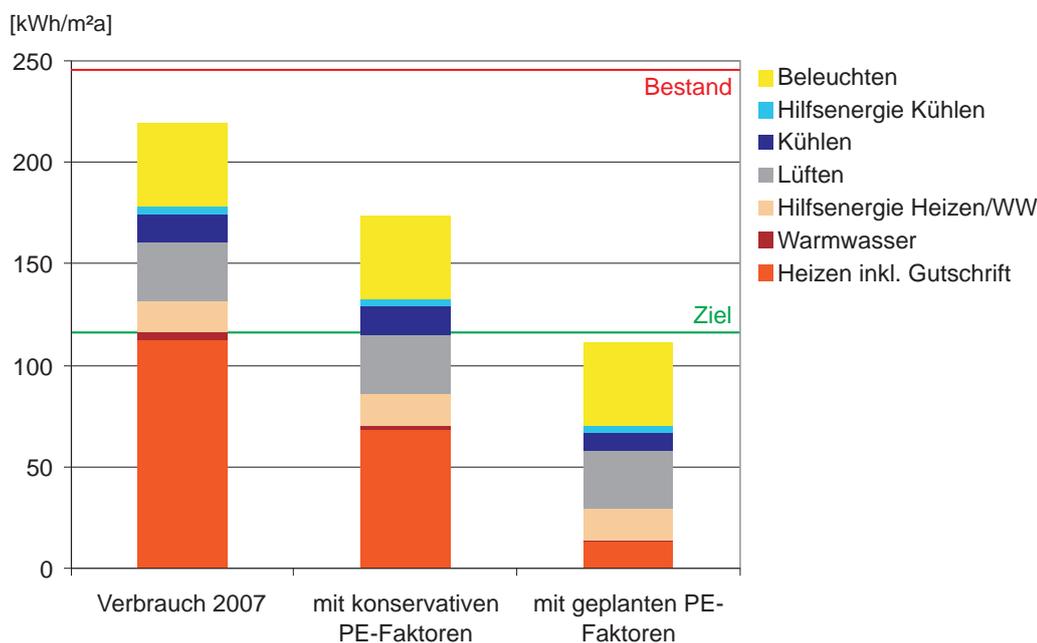


Abbildung 2: Vergleich der Primärenergiebilanzen bei unterschiedlichen Primärenergiefaktoren; die etwas konservativeren Werte von 2003 wurden in einer Berechnung 2004 nochmals gesenkt

Die sommerlichen Raumtemperaturen wiesen im Jahr 2007 mehr Überschreitungsstunden auf als in der Planungsphase als Zielvorgabe definiert. Die Regelung der Kühldecken war noch nicht optimal eingestellt, die Anpassung im Jahr 2008 führte zu einer Verbesserung des thermischen Komforts. Messungen an den Nachströmöffnungen in einigen Büros zeigten, dass nicht überall die geplanten Luftwechsel bei

der Nachlüftung erreicht wurden, wodurch die Situation hinsichtlich des thermischen Komforts verschärft wurde.

Die fortlaufende Messung der CO₂-Konzentrationen hat erwiesen, dass die Werte in den Büros dauerhaft in einem guten Bereich liegen. In Bezug auf die relative Luftfeuchte hat sich aber gezeigt, dass die Raumluft in den Wintermonaten eher zu trocken ist. Durch einen reduzierten Luftwechsel im Winter kann diesem Umstand entgegengewirkt werden.

Wie in anderen Projekten des EnOB-Förderprogramms [16] hat sich auch hier die Wichtigkeit der Überprüfung von Gebäudebetrieb und Verbrauchswerten gezeigt. Die festgestellten Probleme waren oft nicht konzeptionell begründet, sondern durch den Betrieb der Anlagen, und traten auch bei diesen ambitionierten Projekten auf. Die Ergebnisse beim Haupthaus der KfW Bankengruppe zeigen, dass bezüglich Energieverbrauch und Anlagenbetrieb noch Handlungsbedarf besteht. Diesem Handlungsbedarf wird durch eine Weiterbeauftragung der wissenschaftlichen Begleitung über die Förderlaufzeit hinaus Rechnung getragen.

1. Ausgangslage und Gebäude

1.1. Förderprojekt EnSan

Obwohl in den vor 1982 erstellten Gebäuden (Altbauten) über 90% der in Deutschland benötigten Heizenergie verbraucht wird, waren in dieser Gebäudegruppe in den 90er Jahren kaum Aktivitäten hinsichtlich eines verbesserten Wärmeschutzes zu erkennen. Es gab und gibt auch heute immer noch viele Hemmnisse, die einer erfolgreichen Umsetzung von notwendigen Maßnahmen im Wege stehen. Neben einem großen Informationsdefizit bei den Entscheidungsträgern bezüglich der real erreichbaren Einsparraten und Kosten spielen heute immer noch Vorurteile gegenüber der Effizienz von Sanierungsmaßnahmen eine Rolle. Die Erfahrungen aus der Vergangenheit haben andererseits gezeigt, dass durch eine aufeinander abgestimmte Förderung von Querschnittstechniken, Planungsinstrumenten für die Praxis und gezielten Demonstrationsvorhaben langfristig wirkende Anstoßeffekte ausgelöst werden konnten.

Vor diesem Hintergrund hatte das Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) 1998 das Förderkonzept „Energetische Sanierung der Bausubstanz (EnSan)“ gestartet, das als Ergebnis Konzepte aufzeigen soll, mit denen zielgerichtet und beschleunigt der Energieaufwand für Altbauten reduziert werden kann. Als Zielwert in diesem Programm war zum damaligen Zeitpunkt eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs durch die Sanierungsmaßnahme um mindestens 50 % festgeschrieben.

Die KfW Bankengruppe konnte im Jahr 2002 für die Sanierung ihres in unmittelbarer Nähe des Frankfurter Palmengartens gelegenen Haupthauses aus dem Jahre 1968 eine Aufnahme in das EnSan-Förderprogramm (Förderkennzeichen 0335007S) erreichen. Das Monitoring durch das Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta) des Karlsruher Instituts für Technologie wurde im Rahmen des Teilprojektes 3 gefördert, eventuelle Mehrkosten für Planung und Investitionen waren nicht Bestandteil der Förderung.

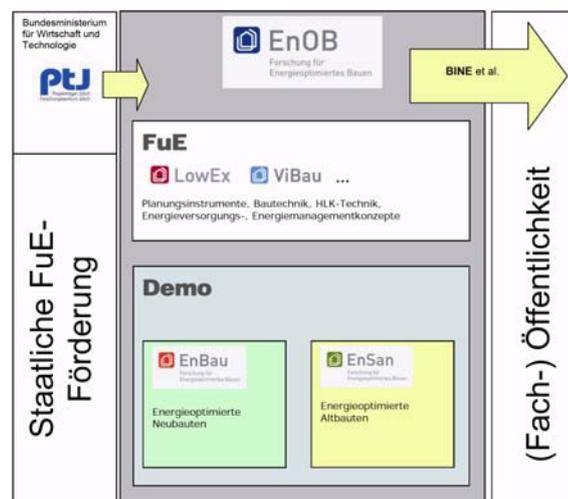


Abbildung 3: Struktur des EnOB-Forschungsprogramms. Neben Forschungs- und Entwicklungsvorhaben spielt die Anwendung und Überprüfung der entwickelten Produkte in Demonstrationsgebäuden eine wichtige Rolle (Quelle: enob.info)

Heute ist das Demonstrationsprogramm EnSan in das Gesamtvorhaben Energieoptimiertes Bauen (EnOB) eingebettet [16] (Abbildung 3). Mit der Neuauflage des Programms im Jahr 2007 wurden auch die Förderkriterien angepasst. Die Zielwerte für den erreichbaren Energiebedarf orientieren sich heute an der DIN V 18599 [11].

Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt ausführlich das Energiekonzept des Gebäudes, die Strategie des Monitorings und die aus der wissenschaftlichen Begleitung gewonnenen Erkenntnisse.

1.2. Projektkontext

Die KfW Bankengruppe ist in Deutschland an den Standorten Berlin, Bonn und Frankfurt tätig. Die Niederlassung Frankfurt befindet sich im Stadtteil Westend nahe dem Palmengarten und dem Diplomatenviertel. Die Arbeitsplätze verteilen sich auf mehrere Gebäude, von denen eines, das sogenannte Haupthaus, im Jahr 1968 erbaut wurde. Im Jahr 2001 entschied sich die KfW Bankengruppe für eine Revitalisierung dieses Gebäudes.

Defizite im baulichen Brandschutz, die nicht sichergestellte Gebäudeentfluchtung, die nicht den Anforderungen der geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV) [17] gerecht werdende Fassade sowie die veraltete bauliche und technische Arbeitsplatzsituation waren die ausschlaggebenden Gründe für eine Neustrukturierung des gesamten Gebäudekomplexes und demzufolge ebenso für eine Sanierung der Gebäudefassade. Neben einer Erneuerung der gebäudetechnischen Anlagen sollte auch eine deutliche Verbesserung des energetischen Standards erzielt werden.

Der architektonische Entwurf stammt vom Architekturbüro RKW Architekten, das auch für die Generalplanung verantwortlich zeichnet. Der ursprüngliche Zeitplan war durch die Insolvenz des Generalunternehmers „Walter Bau AG“ deutlich verzögert worden (Tabelle 1), wodurch sich der Start des Monitorings auf Anfang 2007 verschoben hatte. Durch die zeitliche Verschiebung von Fördermitteln und eine zusätzliche Finanzierung durch die KfW Bankengruppe konnte jedoch die wissenschaftliche Begleitung bis Mitte 2009 fortgeführt werden.

Phase	Zeitraum
Realisierungsstudie	Juli - November 2001
Beginn der Planungen	April 2002
Baufreimachung	Mai 2003 bis Oktober 2003
Entkernung / Abbruch	Juni 2003 bis Februar 2004
Ausbau	März 2004 bis Februar 2005
Baustopp 4 Wochen (Insolvenz Walter Bau)	Februar 2005
Neustart	März 2005
Bezug des Gebäudes	August 2006 bis März 2007
Fertigstellung des Gebäudes	August 2007

Tabelle 1: Die Projektphasen im Überblick: die Insolvenz des Generalunternehmers führte zu einer deutlichen Verzögerung des Projekts, Beginn des Monitoring war im Januar 2007

1.3. Architektur

Das Haupthaus der KfW Bankengruppe besteht aus vier miteinander verbundenen Hochhaustürmen unterschiedlicher Höhe, welche an die südlich gelegene Nordarkade anschließen. Die vier Bauteile werden von Süd nach Nord mit den Buchstaben A bis D bezeichnet (Abbildung 4). Die Büros sind größtenteils auf der West- und Ostseite der Türme angeordnet, mit Ausnahme des nördlichsten Gebäudeteils (D), in dem sich die Räume auch nach Norden hin in Richtung Palmengarten öffnen.

Vor jedem Bürotrakt befindet sich ein Flur. Die Gebäudeteile sind so gegeneinander verschoben, dass immer ein Flur durchgängig ist und am Ende über Fenster nach Norden oder Süden natürlich belichtet werden kann. Die Kerne im Innern der Türme nehmen die vertikale Erschließung (Treppenhäuser, Aufzüge), Teapoints, Archiv- und Lagerräume sowie Sanitärräume auf.

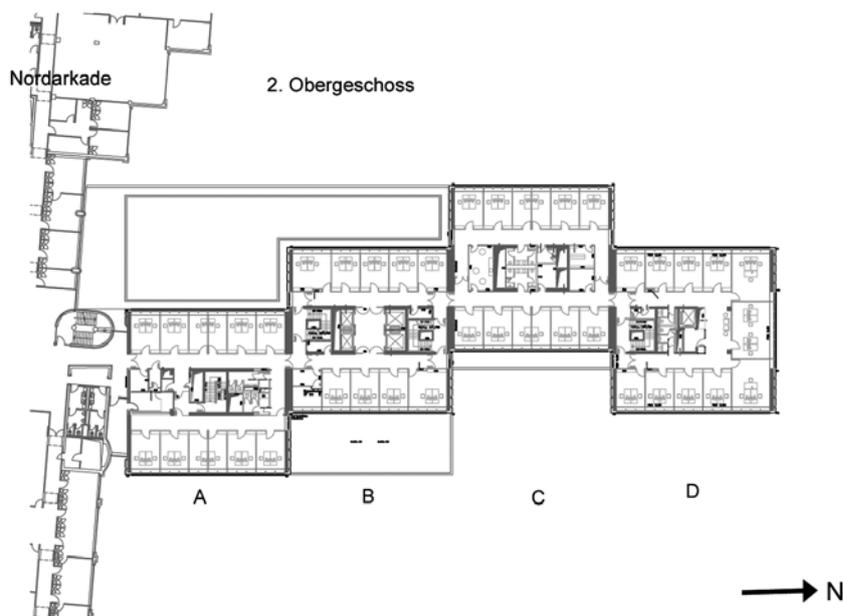


Abbildung 4: Grundriss des Regelgeschosses, als Beispiel das 2. Obergeschoss, Büros sind im Wesentlichen nach Osten und Westen orientiert

Im Zuge der Sanierung wurde das Gebäude im Erdgeschoss um Wandelhalle, Foyer und Sitzungsräume und Bauteil D um drei Geschosse nach oben erweitert, so dass die BGF nun rund 26.000 m^2 beträgt (23.000 m^2 vor der Sanierung). Nach der Sanierung hat Bauteil A zwölf Vollgeschosse, Bauteil B fünfzehn Vollgeschosse und ein Technikgeschoss, Bauteil C zehn Vollgeschosse und einen Technik-Aufbau, Bauteil D elf Vollgeschosse und ein Technikgeschoss (Abbildung 5).

Das Gebäude bietet Platz für 575 Mitarbeiter, die Belegung wurde für den Januar 2008 mit 543 Mitarbeitern angegeben. Vor der Sanierung waren im Gebäude 484 Arbeitsplätze vorhanden, von denen im März 2003 418 belegt waren. Die beheizte NGF, welche im weiteren auch als Energiebezugsfläche verwendet wird, beträgt 21.875 m^2 (19.470 m^2 vor der Sanierung). Die Nutzfläche A_N als Summe aus HNF und NNF beträgt gemäß CAFM-Angaben der KfW 10.910 m^2 .

Das beheizte Volumen (Außenmaße nach EnEV) wurde für den EnEV-Nachweis mit 98.655 m^3 ermittelt. In der Berechnung nach DIN V 18599 wurde für das gesamte Netto-Raumvolumen (inklusive unbeheizter Zonen) ein Wert von 63.400 m^3 und für das beheizte Netto-Volumen ein Wert von 55.300 m^3 errechnet.

Die Kosten für die Gesamtmaßnahme belaufen sich gemäß einer Kostenschätzung nach DIN 276 durch den Projektsteuerer im Jahr 2001 auf ca. 80 Mio. Euro. Weitere Angaben zu den Kosten standen uns nicht zur Verfügung.

1.4. Zustand vor der Sanierung

Die Fassade befand sich nach mehr als 30 Jahren nicht nur in einem optisch unansehnlichen, sondern auch energetisch ungünstigen Zustand. So wies die Außenwand des Gebäudes vor der Sanierung mit $2,5 \text{ cm}$ Mineralwolle eine nur geringe Dämmstärke auf (Tabelle 2). Der g-Wert der früheren Verglasung betrug $0,63$, woraus sich eine Überhitzungsproblematik im Sommer ergab. Die geringe Transmission des sichtbaren Lichtspektrums verringerte die Tageslichtautonomie, was zu Lasten eines erhöhten Kunstlichtanteils ausfiel. Zusätzlich wurde die Tageslichtversorgung durch die über die Fensterebene

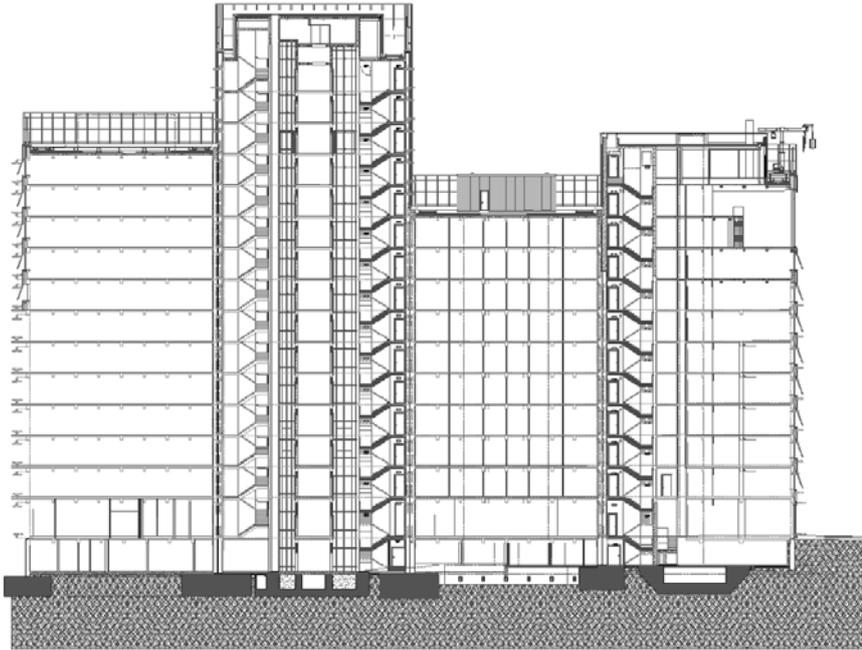


Abbildung 5: Längsschnitt durch das Gebäude

auskragenden Putzbalkone weiter verringert (Abbildung 6). Der U-Wert eines gesamten Fensters lag bei $2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Die Büros wurden ausschließlich über die Fenster belüftet, eine Kühlung der Büros erfolgte nicht. Als Sonnenschutz dienten außenliegende Lamellen. Die Fenster mitsamt Sonnenschutz konnten leicht ausgestellt werden.

Durch die fehlende passive oder aktive Kühlmöglichkeit sowie die abgehängten Decken in den Büros konnte ein ausreichender thermischer Komfort im Sommer nicht gewährleistet werden. Bei Messungen durch die Energieplaner im Jahr 2001 wurden bei Außenlufttemperaturen zwischen 16 und $24 \text{ }^\circ\text{C}$ in den Büros teilweise bereits Temperaturen über $26 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. An sehr warmen, sonnigen Tagen stellten sich in einigen Räumen Raumlufttemperaturen im Bereich von $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ein.

Bauteil	Aufbau	U-Wert
Außenwand	35 cm Beton, 2,5 cm Mineralwolle, ca. 2 cm Luftschicht, 3 cm Naturstein	1,10
Fenster	$\tau_{\text{vis}} 51 \%$, g-Wert 63 %	2,90
Dach	20 cm Beton, 15 cm Dämmung	0,79
Bodenplatte	Estrich, Trittschalldämmung, 30 cm Beton	0,81

Tabelle 2: U-Werte der jeweiligen Bauteile vor der Sanierung



Abbildung 6: Fassade des Bestandgebäudes mit den ursprünglichen Putzbalkonen, Quelle: ip5

Klimatisiert wurden nur der Vorstandsbereich sowie die Konferenz- und Serverräume. Die Kälteversorgung erfolgte durch drei Kompressionskältemaschinen aus dem Jahr 1986, zwei Kolbenverdichter und einen Turboverdichter. Außerdem wurden im Jahr 1997 zwei Absorptionskältemaschinen hinzugefügt. Wichtige Komponenten der vorhandenen Technik wurden bei einer Begehung im Jahr 2001 in Augenschein genommen.

Maschine	Größe	Baujahr	Bemerkung
Absorptionskältemaschine	2x350 kW	1997	guter Zustand
Kompressionskältemaschine	1x981 kW Turbo, 2x161 kW Kolben	1986	Turboverdichter wurde im Jahr 1997 auf neues Kältemittel umgestellt; konnte im Jahr 2000 auf Grund der fehlenden Rückkühlleistung nicht betrieben werden

Tabelle 3: Die Kälteerzeuger im Bestandsgebäude

Die Anlagen versorgten neben dem Haupthaus auch noch zwei weitere Gebäude, nämlich die Nordarkade und die Südarkade. Abbildung 7 zeigt die anteilige Kältearbeit der einzelnen Anlagen im Jahresverlauf. Die Wärmeversorgung erfolgte im Bestand über zwei Gaskessel mit jeweils 1.860 kW Leistung und drei Blockheizkraftwerke (BHKW) mit jeweils einer Leistung von 321 kW elektrisch. Die BHKW wurden im Jahr 1997 eingebaut und waren zu Beginn der Sanierungsmaßnahmen in einem guten Zustand. Die Effizienz der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung spiegelt sich in den bereits vor der Sanierung vergleichsweise guten Primärenergiekennwerten wider (siehe Kapitel 4.1).

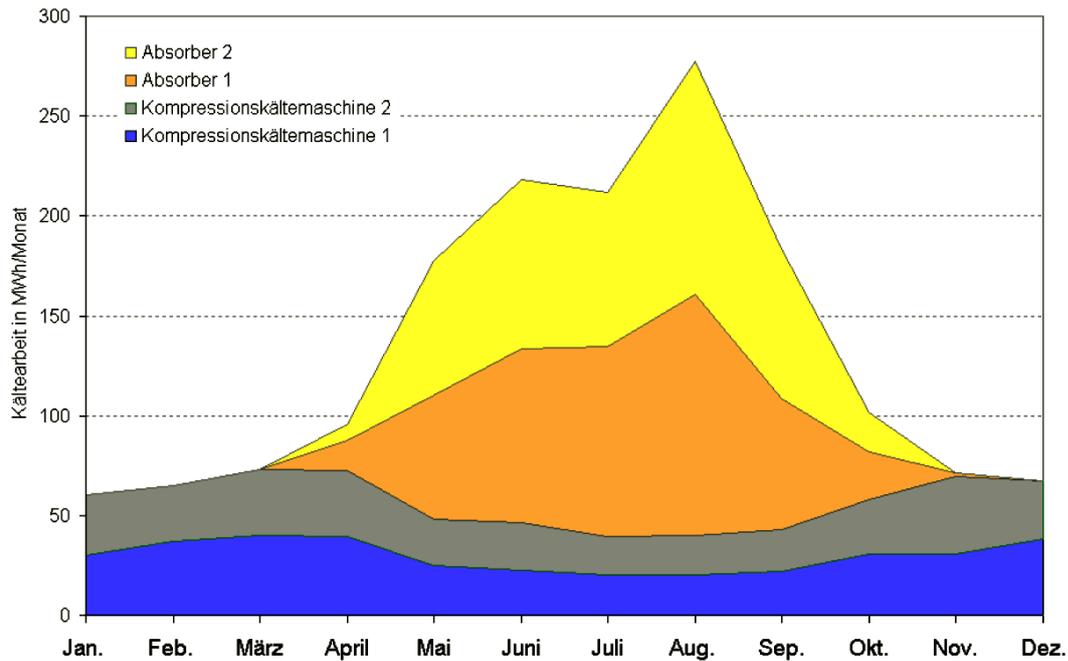


Abbildung 7: Kältearbeit im Bestand für die drei Gebäude Haupthaus, Nord- und Südarkade im Verbund, Quelle: ip5

1.5. Projektbeteiligte

Mit der Abwicklung des Projektes war zu Beginn die Walter Bau AG, einer der größten deutschen Baukonzerne, als Generalunternehmer beauftragt gewesen. Am 1. Februar 2005 jedoch stellte die Walter Bau AG den Antrag auf Eröffnung eines Insolvenzverfahrens. Die KfW entschied sich, das Projekt mit dem Projektsteuerer Weber Baumanagement in Einzelvergabe fortzuführen. Abbildung 8 stellt die organisatorische Struktur dar, mit der nach dem Ausscheiden des Generalunternehmers das Projekt fortgesetzt wurde. Tabelle 4 zeigt die Verantwortlichen in den einzelnen Gewerken auf.

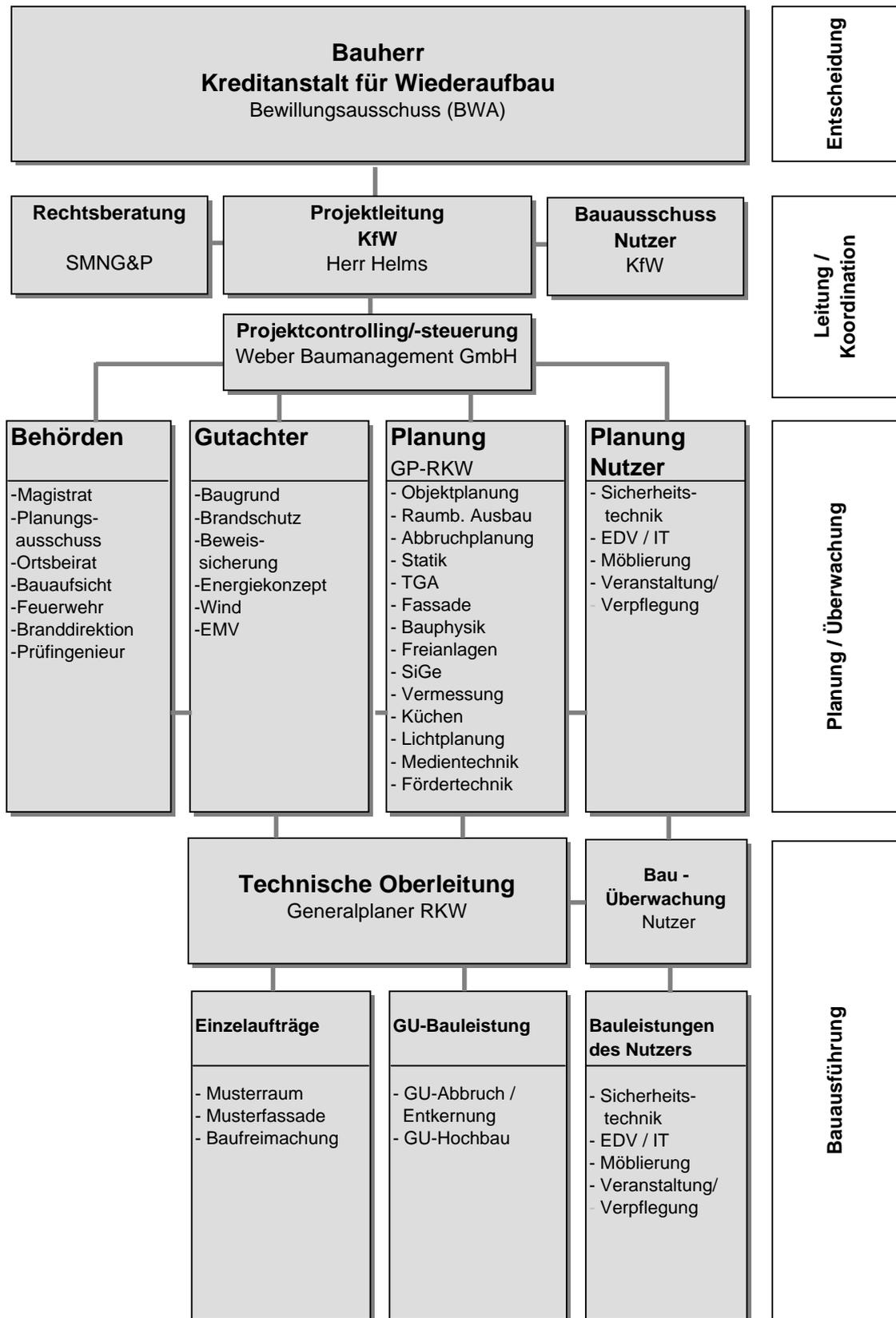


Abbildung 8: Organigramm der Projektbeteiligten, Quelle: Weber Baumanagement, Mainz

Bereich Generalplanung	
Architektur, Innenarchitektur	RKW - Rhode Kellermann Wawrowsky Architekten, Düsseldorf
Abbruchplanung	Arcadis, Darmstadt
Tragwerksplanung	BGS Ingenieurgesellschaft mbH, Frankfurt
Fassadenplanung	FBM Mosbacher und Roll Beratungs- und Planungsgesellschaft für Fassadentechnik mbH, Friedrichshafen
Fassadenarbeit	Dobler Metallbau GmbH, München
TGA-Planer GWA, WBR	TechDesign Gesellschaft für Technische Ausrüstung und Energietechnik mbH, Frankfurt
TGA-Planer ELT, NT, MSR, LON	TP Elektroplan GmbH, Gaggenau
Lichtplanung	Licht Kunst Licht AG, Ingenieure Designer Architekten für Beleuchtung, Bonn
Küchenplanung	Großküchentechnik Niedermeyer, Dettelbach
Medientechnik	TP Elektroplan GmbH, Gaggenau
Fördertechnik	Hundt & Partner Ingenieurgesellschaft GmbH, Hannover
Vermessung	Grandjean & Kollegen, Frankfurt
Landschaftsplanung	Sommerlad Haase Kuhli Landschaftsarchitekten Partnerschaft, Gießen
SiGe-Koordination	RKW - Rhode Kellermann Wawrowsky Architekten, Düsseldorf
Entwicklung Sonnenschutzelement	INGLAS Innovative Glassysteme GmbH & Co. KG, Friedrichshafen
Serienfertigung Sonnenschutzelement	BGT Bischoff Glastechnik AG, Bretten
Gebäudeleittechnik Einzelraumregelung	euromicron systems GmbH, Frankfurt
Gebäudeleittechnik Primäranlagen	Hörburger AG, Niederlassung Chemnitz (ehemals GTS Control Systems)
Bereich Gutachter / Berater	
Energieberatung, Simulation	ip5 ingenieurpartnerschaft, Karlsruhe
Schallschutzberatung, EnEV Nachweis	FRITZ GmbH - Beratende Ingenieure VBI, Einhausen
Blower-Door-Test	ebök Planung und Entwicklung Gesellschaft mbH, Tübingen
Brandschutzberatung	ER fire engineering, Büro für baulichen und betrieblichen Brandschutz GmbH, Hofheim
Baugrundberatung	ITUS GmbH & Co.KG, Weiterstadt
Windberatung	Wacker Ingenieure, Birkenfeld
Beweissicherung	Architektur- und Sachverständigen-Büro Borkmann, Wiesbaden

Tabelle 4: Die für einzelne Gewerke zuständigen Firmen, Quelle: Weber Baumanagement

2. Energiekonzept

2.1. Einleitung

Das Büro ip5 ingenieurpartnerschaft aus Karlsruhe wurde vom Bauherrn mit der Erstellung eines ressourcenschonenden Konzepts auf den Gebieten Haustechnik, Raumklima, Tageslichtsituation, Kunstlichteinsatz sowie Wärme- und Kälteerzeugung beauftragt. Dabei sollten stets der Ausstattungsstandard und die Planungsvorgaben des 2002 fertiggestellten Erweiterungsbaus der KfW in der Palmengartenstraße (Neubau Ostarkarde, Monitoring mit dem Förderkennzeichen 0335007F [13]) als Referenz herangezogen werden. Insbesondere war als Planungsvorgabe zu beachten, dass trotz eines möglichst geringen Kühlenergiebedarfs für die Bürobereiche das Behaglichkeitsfeld der damals geltenden DIN 1946 [18] (obere Grenzlinie) nur für max. 60 h/a überschritten werden sollte.

Das Bauen im Bestand schränkte dabei die Freiheit bei der Erarbeitung des Konzepts ein. Beispielsweise waren Fenstergrößen und Fassadenorientierungen durch den vorhandenen Rohbau bereits fest vorgegeben; statische Gegebenheiten (im vorliegenden Fall beispielsweise die Betonrippendecken) erschwerten oder verhinderten bestimmte Maßnahmen wie das Führen von Lüftungsleitungen oder das Freilegen der Betondecke.

Durch eine sorgfältige, ganzheitliche Planung sollte im Rahmen der Sanierung eine energetisch herausragende Lösung umgesetzt werden, die gleichzeitig einen hohen Nutzungskomfort gewährleistet und hohen gestalterischen Ansprüchen genügt. Dafür wurde durch die intensive Zusammenarbeit der Planungsbeteiligten bereits in der Konzeptphase ein wichtiger Grundstein gelegt.

Die wichtigsten Eckpfeiler des Energiekonzeptes sind:

- Stark verbesserter Wärmeschutz
- Innovatives Fassadenkonzept mit neuartigem Sonnenschutz und aerodynamisch optimiertem Zuluftelement
- Nachtauskühlung und Belüftung über eine energieeffiziente Abluftanlage mit optimiertem Regelungskonzept
- Optimierte Tageslichtnutzung und energieeffizientes Kunstlichtkonzept
- Hinsichtlich Nutzungskomfort und Energiebedarf optimierte Regelungs- und Steuerungsalgorithmen
- Wärme- und Kälteerzeugung über Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
- Wassersparendes Sanitärkonzept mit Grauwassernutzung, Vakuumtechnik und Regenwassernutzung

Zu den Aufgaben der Energieplaner gehörten insbesondere die Fassadenberatung und Mitarbeit bei der Entwicklung des Sonnenschutzes und der Zuluftelemente sowie die Entwicklung von Ranking-Methoden zur multikriteriellen Bewertung von Varianten des Lüftungskonzepts, des Raum- und Fassadenkonzepts, des Wasserkonzepts und der Wärme- und Kälteerzeugung. Außerdem wurden diverse Simulationsberechnungen durchgeführt, Mehr-/Minderkosten gegenüber einer konventionellen Planung und die Wirtschaftlichkeit verschiedener Kälte- und Wärmeversorgungskonzepte berechnet. Die einzelnen Aspekte des Energiekonzeptes werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

2.2. Gebäudehülle

Bei der Sanierung der Bauteile wurde aus energetischer Sicht vor allem der Dämmstandard der opaken Außenbauteile sowie der Fenster erhöht (Tabelle 5). Auf der Vorentwurfsplanung basierend wurde in der ersten Konzeptstudie aus ökonomischer und ökologischer Sicht für die Außenwände eine Dämmstoffdicke von 14 cm (bei einer Wärmeleitfähigkeit von $0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$) empfohlen. Die Tabelle zeigt, dass die Dämmstoffstärke letztendlich auf 12 cm festgelegt wurde.

Auf die Dichtigkeit der Gebäudehülle wurde großer Wert gelegt, die Firma ebök wurde mit der Durchführung eines Blower-Door-Tests beauftragt. Die Messung wurde aufgrund der Größe des Gebäudes nacheinander für jeweils zwei der vier Türme vorgenommen. Die Abdichtung gegenüber den angrenzenden Gebäudeteilen konnte jedoch z.T. nur provisorisch ausgeführt werden, wodurch sich zusätzliche Undichtheiten ergaben. Insgesamt wurde ein nur mäßiger n_{50} -Wert von $2,1 \text{ h}^{-1}$ gemessen, so dass Nachbesserungen bezüglich der Gebäudedichtheit nötig waren und auch durchgeführt wurden. Angestrebt wurde ein Wert von mindestens $1,0 \text{ h}^{-1}$. Ein erneuter Blower-Door-Test zur Erfolgsüberprüfung der Maßnahmen wurde jedoch nicht mehr durchgeführt.

Bauteil	Aufbau	U-Wert [$\text{W/m}^2\text{K}$]
Aussenwand	35 cm Beton, 12 cm Mineralwolle, ca. 2 cm Luftschicht, Einscheibensicherheitsglas	0,29
Fenster	Sonnenschutzglas, τ_{vis} 70 %, g-Wert 40 %	1,40
Dach	20 cm Beton, 18/20 cm Dämmung	0,21
Bodenplatte	Estrich, 4 cm Trittschalldämmung, 30 cm Beton	0,73

Tabelle 5: U-Werte der Bauteile nach der Sanierung

2.2.1. Fassade

In der ersten Ausarbeitung wurde als Fassadenkonzept die Kombination von außenliegendem Sonnenschutz ($F_C < 0,25$ bei Tageslichtlenkung), Verglasung mit g-Werten unter 0,40 und - falls erforderlich - von unten nach oben verfahrbarem innenliegenden Blendschutz vorgeschlagen. Die Variante mit einem bedruckten, außenliegenden „Glasschild“ wurde vorbehaltlich noch zu ermittelnder bauphysikalischer und lichttechnischer Eigenschaften als geeignet bewertet.

Bei einer vorab beauftragten Fassadenstudie wurden durch eine Fassadenfirma verschiedene Fassaden- und Sonnenschutzkonzepte vorgeschlagen und nach technischen, formalen und wirtschaftlichen Kriterien untersucht. Der Bauherr entschied sich für Fensterbänder mit hinterlüfteter Glasbekleidung vor der Stahl-Betonbrüstung und einen innovativen Sonnenschutz durch bewegliche Glasschilder.

Parallel hierzu wurden von den Energieplanern unterschiedliche Fensterflügelarten nach Kriterien wie Bedienungskomfort, thermischer Komfort im Sommer und Winter, Lüftungseffizienz, Dichtheit, Tageslichtnutzung, Kosten, Ästhetik (Innen- und Außeneindruck) und Sicherheit zusammen mit dem Blendschutz untersucht und bewertet und in einem weiteren Schritt mit den Planungsbeteiligten selektiert.

Glasschild In ergebnisorientierter integraler Zusammenarbeit des Projektteams entstand eine richtungsweisende Lösung für das Sonnenschutzelement: In Anlehnung an die früheren Klappfenster wurde ein Sonnenschutzschild entwickelt, das im offenen Zustand vertikal vor die Brüstung des jeweils darüberliegenden Geschosses gefahren wird. Zum Schutz vor Sonne kann es nach individuellem Beschattungswunsch des Nutzers gesenkt und zusätzlich im herabgefahrenen Zustand ausgeklappt werden (siehe auch Kapitel 2.7.1). Die unterschiedlichen Positionen führen zu einem ästhetisch ansprechenden Spiel in der Fassade.

Im Rahmen der Fassadenplanung waren mögliche Varianten der Kinematik der vor der Fassade verfahrbaren Glasschilder von ihrer Ausgangsstellung (vor der hinterlüfteten Bekleidung) bis in die Stellung der Vollbeschattung entwickelt und zur Entscheidung vorgelegt worden. Bei der Realisation des Sonnenschutzes war es wichtig, der Anforderung einer zuverlässigen Vollbeschattung in Richtung der Sonnenwanderung bei gleichzeitiger Transparenz im Sichtwinkel sowie den formalen Ansprüchen gerecht zu werden. Dies ist durch ein Streckmetall mit entsprechender Formgebung gewährleistet, welches zwischen die zwei Glasscheiben eines Sandwich-Elementes eingelassen wurde (Abbildung 9).

Dieses Glasschild ist eine Produktneuentwicklung. Für Entwicklung und Know-how war die Firma INGLAS aus Friedrichshafen verantwortlich, die Produktion in Serienfertigung wurde von der Firma BGT aus Bretten übernommen.



Abbildung 9: Das Sandwich-Sonnenschutzelement (Glasschild) mit eingelegtem Streckmetall in der Nahaufnahme

2.3. Heizen

Das Haupthaus wird aus einem Kraft-Wärme-Kälte-Verbund mit Heizenergie versorgt (siehe auch Kapitel 2.6), die Heizwärmeübergabe in den Büroräumen erfolgt über Plattenheizkörper vor der Brüstung. Die Wandelhalle im Erdgeschoss ist in allen vier Bürotürmen mit einer Fußbodenheizung versehen. Im großen Sitzungssaal im Bauteil C gibt es einen Klimaboden, mit dem sowohl geheizt als auch gekühlt werden kann. Außerdem verfügt dieser Saal über statische Heizkörper. In verschiedenen RLT-Anlagen

kann die Zuluft erwärmt werden, um den thermischen Komfort zu gewährleisten bzw. um die Temperatur der Zuluft nach der Entfeuchtung wieder auf das entsprechende Temperaturniveau anzuheben (Tabelle 6).

	Leistung [kW]	Durchfluss [m ³ /h]
RLT-Anlage A01 Umkleide	29	1,25
RLT-Anlage A02 Tresor	12	0,52
RLT-Anlage A03 Halle EG	163	7,00
RLT-Anlage A09 Catering	21	0,90
RLT-Anlage C02 innl. Räume	24	1,03
RLT-Anlage C05 Küche	131	5,63
RLT-Anlage C07 Teeküche	36	1,55
RLT-Anlage C09 Besprechung	14	0,60
RLT-Anlage C08 Sitzungssaal	49	2,11
RLT-Anlage C08 Sitzungssaal	16	0,69
RLT-Anlage D01 Vorstand	118	5,07
RLT-Anlage D01 Vorstand	321	13,80
Fußbodenheizung Bauteil A	2*45	1,29
Fußbodenheizung Bauteil B/C	2*25	0,72
Fußbodenheizung Bauteil D	2*25	0,72
Statische Heizung	660	18,92
Warmwasserbereitung UG	33	0,95
Warmwasserbereitung Küche 11. OG C	67	2,88
RLT-Anlagen Bauteil C	248	7,11
Klimaboden Bauteil C	25	0,72
Heizkessel 1+2	1575	45,15

Tabelle 6: Die Anlagenkomponenten der Wärmeversorgung mit der jeweiligen Anschlussleistung und Durchflussmenge gemäß Planung

In der Abbildung 10 ist schematisch der Bereich Wärme des Kraft-Wärme-Kälteverbundes mit der Verteilung im Haupthaus und den installierten Wärmezählern dargestellt.

2.3.1. Fußbodenheizung

Im Erdgeschoss (Wandelhalle und Foyer) verfügt das Gebäude über eine Fußbodenheizung, die in 3 Heizkreise aufgeteilt ist (siehe Tab. 7).

Heizkreis	Fläche	Heizleistung
Bauteil A	660 m ²	2*45 kW
Bauteil B+C	950 m ²	2*25 kW
Bauteil D	215 m ²	2*25 kW

Tabelle 7: Die Aufteilung der Fußbodenheizung in drei Heizkreise mit versorgter Fläche und Anschlussleistung

2.3.2. Warmwasser

Die Warmwasserbereitung erfolgt in den Putzräumen, WCs und Teeküchen dezentral mit elektrischen Untertischdurchlauferhitzern. Diese primärenergetisch ungünstigere Warmwasserbereitstellung wurde aufgrund der geringen Zapfmengen und der bei zentraler Warmwasserbereitung relativ hohen Zirkulationsverluste als unkritisch bewertet und bewusst in Kauf genommen.

Außerdem gibt es zwei größere Warmwasserbereiter, die an die zentrale Wärmeversorgung angeschlossen sind. Der eine befindet sich im Bauteil C zur Warmwasserbereitung für die Küche (Speicherladesystem, Fabrikat: Cetetherm, D67-1000-E), der andere im Untergeschoss für die Duschen in den Sozialräumen.

2.4. Lüften

In der Konzeptphase wurden durch die Energieplaner verschiedene Lüftungsvarianten erarbeitet und bewertet. Es wurden als mögliche Varianten dezentrale Lüftungsgeräte in der Fassade, eine reine Fensterlüftung (wie im Neubau Ostarkade [13] realisiert), eine Zu- und Abluftanlage sowie eine zentrale Abluftanlage untersucht. Der Vorteil einer Zu- und Abluftanlage hätte darin bestanden, dass eine Wärmerückgewinnung möglich gewesen wäre. Allerdings hätten sich bei einem Hochhaus bei doppelter Verrohrung auch deutliche Mehrkosten ergeben. Zudem waren aufgrund der zahlreichen Unterzüge und der niedrigen Geschosshöhen die Platzverhältnisse beengt. Dennoch wurde die Variante einer Zu-/Abluftanlage mit und ohne Wärmerückgewinnung nicht von vorneherein von der Prüfung ausgeschlossen.

Folgende Vorteile einer mechanischen zentralen Abluftanlage führten die Energieplaner gegenüber der reinen Fensterlüftung an:

- Bei Fensterlüftung auftretende Zugerscheinungen werden verhindert, da sich durch den Coanda-Effekt die Luft zunächst erwärmt, bevor sie auf den Nutzer trifft. Dadurch wird eine Verbesserung des Komforts erzielt.
- Bessere Luftqualität durch permanente Frischluftzufuhr und durch bessere Frischluftversorgung tieferer Räume sowie von Kombibüros. Frischluft wird auch für windabgewandte Büros bereitgestellt.
- Besserer akustischer Komfort aufgrund der Schalldämpfungseigenschaften der Überströmelemente
- Verbesserter Wetterschutz
- Verringerter Wärmebedarf und weniger trockene Luft im Winter durch gesteuerte Luftmengen
- Geringerer Kühlenergiebedarf durch Nachtlüftung und durch gesteuerte Luftmengen

Zur Entscheidungsfindung wurde von den Energieplanern eine Bewertungsmatrix vorgeschlagen und mit dem Bauherrn sowie weiteren Planungsbeteiligten abgestimmt. In dieser Matrix wurden Aspekte wie Komfort, Platzbedarf und Kosten gewichtet und für die verschiedenen Lüftungsvarianten Punkte zwischen 1 (ungünstig) und 5 (hervorragend) vergeben.

Die zentrale Abluftanlage schnitt bei diesem Ranking am besten ab, was mit dazu beitrug, dass die Entscheidung am Ende zugunsten dieser Lösung fiel.

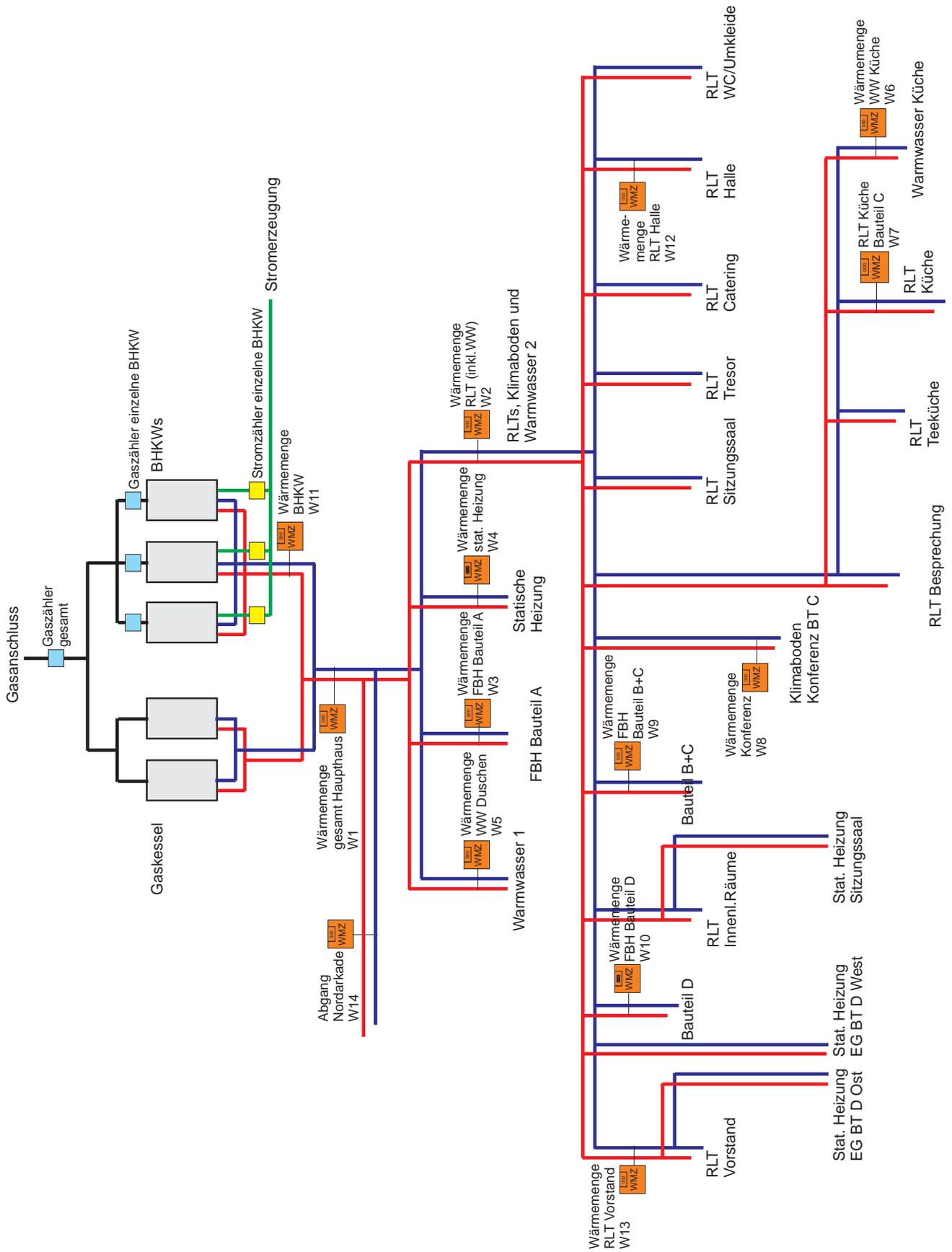


Abbildung 10: Gesamtschema der Wärmeerzeugung und -verteilung mit Abnehmern sowie Gas-, Strom- und Wärmemengenzählern

2.4.1. Zentrale Abluftanlage

Die zentrale Abluftanlage, bestehend aus effizienten Hochleistungs-Axialventilatoren, setzt das Gebäude unter einen definierten Unterdruck. Dabei ist pro Büroturm ein Ventilator auf dem Dach installiert und über einen senkrechten Kanal im Erschließungskern geschossweise an die einzelnen Büros angebunden (Abbildung 11). Die Nachströmung der Außenluft erfolgt dann über regelbare Fassadenelemente. Dadurch kann ein niedriger Energiebedarf für den Lufttransport, speziell für den Fall der Nachtauskühlung, ermöglicht werden (Volumetrische Kennwerte von 0,06 bis 0,08 Wh/m³).

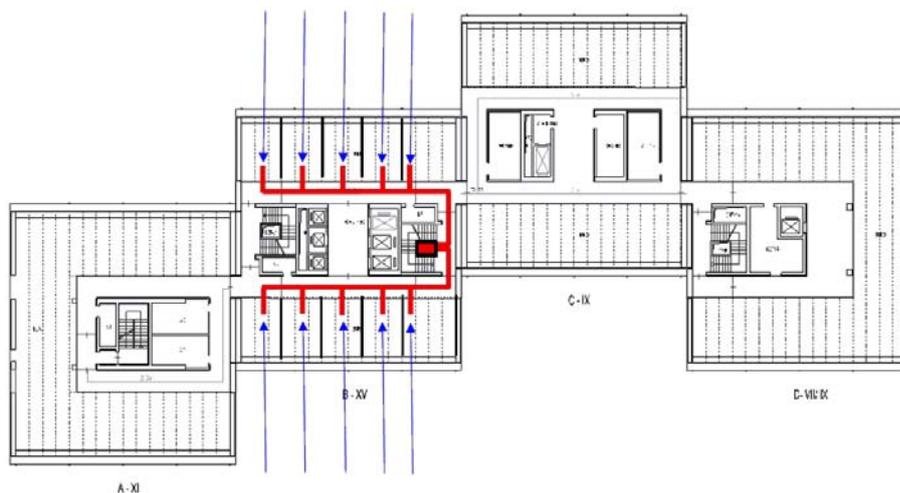


Abbildung 11: Schema der zentralen Abluft im Grundriss, exemplarisch in Bauteil B, Quelle: ip5

Für die Umsetzung der zentralen Abluftanlage wurden im weiteren Verlauf drei Varianten zur Lufteinbringung ins Büro und zwei Varianten für die Überströmung aus dem Büro heraus entworfen und untersucht.

Bei der realisierten Lösung befinden sich die Nachströmelemente oberhalb der Fenster und unterhalb der abgehängten Decke. Die Luft strömt über eine umlaufende Schattenfuge in den Zwischenraum zwischen Rippendecke und abgehängter Decke und gelangt von dort in einen Lüftungskanal (Abbildung 12). Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Größe der Abluftanlagen. Die Abstufung ist analog zur Größe des jeweiligen Büroturms zu sehen, in Bauteil D werden nur die Büros vom 1. bis 5. Obergeschoss über die Anlage belüftet.

Bezeichnung	Volumenstrom [m ³ /h]
Bauteil A	21.780
Bauteil B	26.730
Bauteil C	16.380
Bauteil D	12.600

Tabelle 8: Die zentralen Abluftanlagen für die Regelgeschosse des jeweiligen Bauteils mit Angabe des Auslegungsvolumenstroms

Zur Verringerung von Lüftungswärmeverlusten im Winter und zur Vermeidung von Überhitzung im Sommer soll die Abluft büroseitig außentemperatur- und präsenzabhängig geregelt werden. Bei sehr niedrigen bzw. hohen Temperaturen soll der Luftwechsel gleitend auf das hygienisch notwendige Mini-

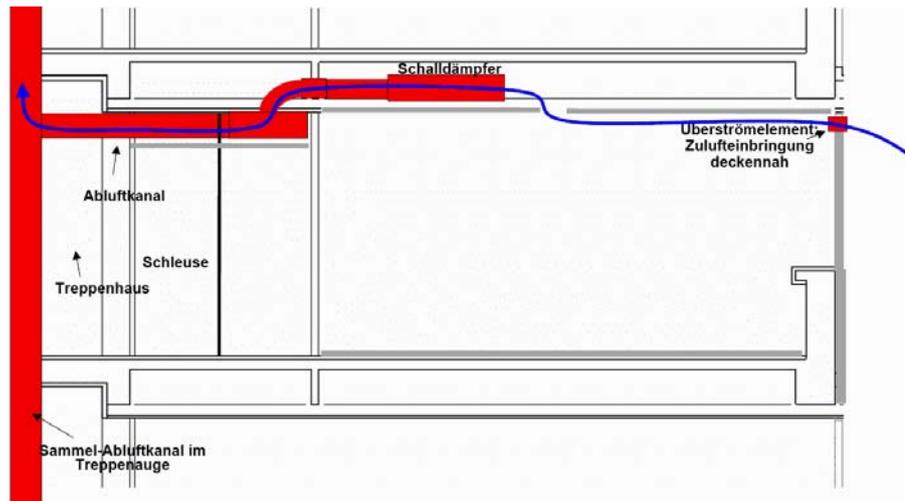


Abbildung 12: Schema der zentralen Abluft im Schnitt eines Büroraumes, Absaugung über Schattenfuge der abgehängten Decke, Quelle: ip5

mum abgesenkt werden.

Die Nachströmelemente (Abbildung 13) über den Fenstern sind so konstruiert, dass sie lediglich ganz geöffnet bzw. ganz geschlossen werden können. Eine direkte Regelung des Luftwechsels ist somit nicht möglich. Unterschiedliche Luftwechsel sollen gemäß Konzept erzeugt werden, indem die Öffnungsdauer der Nachströmöffnung pro Stunde variiert. Eine halbe Stunde Öffnungsdauer pro Stunde würde also über die Zeit gemittelt die Hälfte des Auslegungsluftwechsels bedeuten.

Zur Aufnahme von Bautoleranzen, die durch Baugrundsenkungen des Bestandsgebäudes im Laufe der Jahre entstanden, wurde in vielen Büros ein Versprung in der abgehängten Decke nötig, der je nach Lage des Büros in die ein oder andere Richtung und unterschiedlich groß ausfiel. Zwei Varianten des Versprungs waren möglich: fassadennah und flurnah. Zum Einfluss des Versprungs in Fassadennähe wurden Prüfungen (Strömungsmessungen mit Tracergas) im Labor unternommen. Dabei wurden ein Volumenstrom von $80 \text{ m}^3/\text{h}$, ein Temperaturunterschied von 10 K und eine Druckdifferenz von 12 Pa gewählt. Bei einem Deckenversprung nach unten war deutlich die abfallende Kaltluft zu erkennen, während die einströmende Außenluft ohne oder bei „negativem“ Versprung an der Decke haften blieb und sich weiter in den Raum hineinbewegte.

Es bestand also die Gefahr, dass aus gestalterischen Gründen die Nutzbarkeit der Abluftanlage eingeschränkt würde. Tatsächlich entschieden sich Architekten und Bauherr für die fassadennahe Stufe, was im Betrieb letztendlich zu Problemen führte. Die Erfahrungen mit dem Abluftkonzept werden in Kapitel 4.3 beschrieben.

2.4.2. Nachtlüftung und -kühlung

Zwar hatte man sich im Laufe des Planungsprozesses gegen freiliegende Decken entschieden, dennoch konnte durch thermisch-dynamische Simulationen nachgewiesen werden, dass die Betondecke durch die in den Zwischenraum einströmende Nachtluft immer noch als thermische Speichermasse aktiviert werden kann. Da diese Nachtlüftung deutlich zur Verringerung der Kühllast während des Tages beitragen kann, wurde eine entsprechende Regelstrategie in die Gebäudeleittechnik implementiert.

Die Nachtlüftung im einzelnen Büro wird über das Öffnen des Nachströmelements aktiviert, wenn die Außentemperatur mindestens 1 K unter der jeweiligen Raumlufttemperatur liegt. Bei einer Anforderung

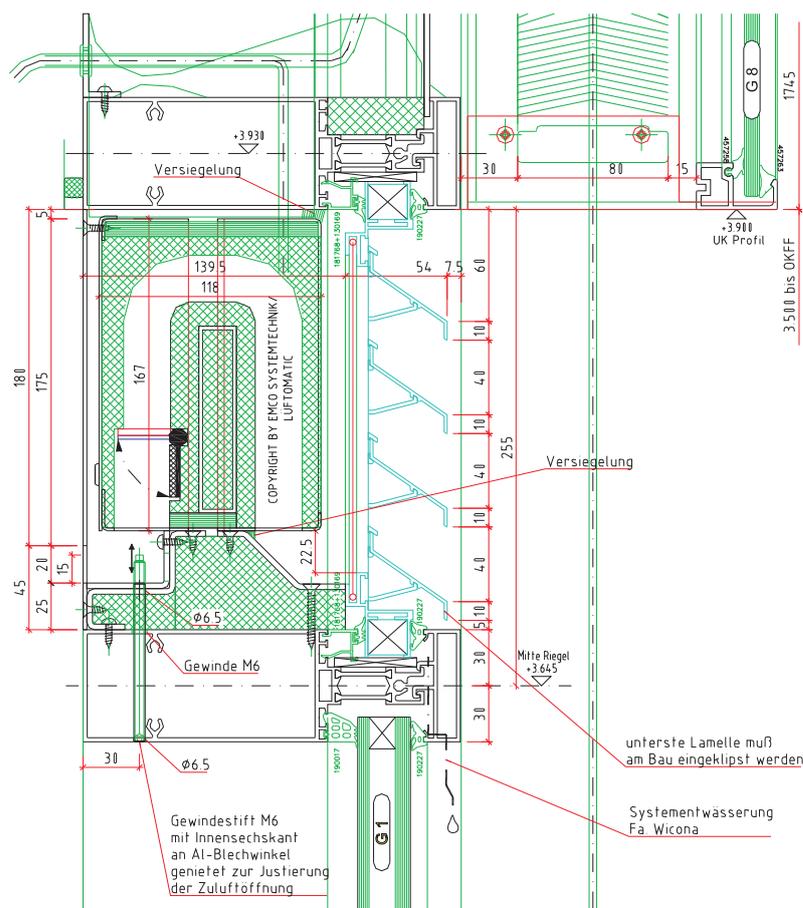


Abbildung 13: Das Überströmelement mit Verschlussklappe im Detail, Quelle: EMCO Systemtechnik, RKW Architekten

der Nachtlüftung von mindestens 20 Büros wird auch der zentrale Abluftventilator eingeschaltet. Diese untere Grenze ist gesetzt, weil der Ventilator nur auf ca. 10 % seines Nennvolumenstroms heruntergeregelt werden kann. Dieses Szenario gilt für alle Regelbüros in den gesamten Bauteilen A bis C und für die Regelbüros im Geschoss 1 bis 5 des Bauteils D.

Der Vorstandsbereich im Bauteil D (ab 6. Geschoss) verfügt nicht über eine zentrale Abluftanlage, sondern über eine Vollklimaanlage. Auch hier sollte eine Nachtlüftung realisiert werden, allerdings erst, wenn die Außenlufttemperatur mindestens 5 K unter der Temperatur im Vorstandsbereich liegt. Da die Zu-/Abluft-Anlage durch höhere Strömungswiderstände für die Luftbewegung auch einen höheren elektrischen Energiebedarf aufweist, wurde diese Grenze so gewählt, dass diesem erhöhten Aufwand durch die größere Kühlleistung der eingebrachten Außenluft auch ein erhöhter Nutzen gegenübersteht.

2.4.3. Zu- und Abluftanlagen

Teilbereiche des Gebäudes wie die Halle und der Sitzungssaal im Erdgeschoss, die Küche, der Cateringbereich, der Tresorraum, die Heizzentrale und Besprechungsräume sind mit Zu-/Abluftanlagen ausgestattet. Insgesamt befinden sich im Gebäude 29 Lüftungsanlagen, die von kleinen Abluftanlagen bis hin zu großen Zu- und Abluftanlagen mit Luftkonditionierung reichen. Die wichtigsten Anlagen sind in Tabelle 9 aufgelistet. Der Stromverbrauch der großen Anlagen wird im Rahmen des Monitorings erfasst, kleinere werden exemplarisch gemessen (siehe Kapitel 4.3).

Bezeichnung	Zu	Ab	Volumenstrom [m ³ /h]	VE	NE	LK	Bef	WRG	AK
Halle EG	•	•	16.500	•		•	•	•	
Vorstand	•	•	24.010	•	•	•	•	•	•
Küche	•	•	10.975/12.000	•		•			
Gr. Sitzungssaal	•	•	4.000	•	•	•	•		
Heizzentrale	•	•	3.000						
Catering EG	•	•	2.400	•					
WC/Umkleide	•		2.400	•					
WCs BT A 1		•	2.880						
WCs BT A 2		•	4.140						
WCs BT B		•	540						
WCs BT C		•	2.940						
WCs BT D		•	2.520						

Tabelle 9: Lüftungsanlagen im Gebäude, Vorerhitzer (VE), Nacherhitzer (NE), Luftkühler (LK), Befeuchtung (Bef), Wärmerückgewinnung (WRG), Indirekte adiabate Kühlung (AK)

Als Besonderheit ist zu erwähnen, dass die Anlage RLT-D-01 mit einer indirekten adiabaten Kühlung ausgestattet ist (Abbildung 14). Bei diesem Prinzip wird die Abluft durch eine Sprühbefeuchtung gekühlt. Über den nachgeschalteten Wärmetauscher kann so die Zuluft über die kalte Abluft vorgekühlt werden. Bei Bedarf kann die Zuluft über das Kühlregister weiter heruntergekühlt werden.

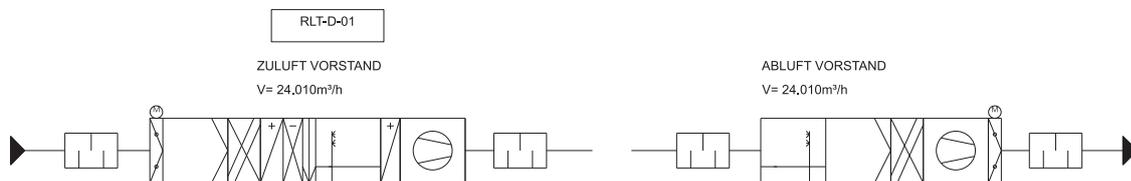


Abbildung 14: RLT-Anlage für den Vorstandsbereich mit indirekter adiabater Kühlung

2.5. Kühlen

Vor der Sanierung des Gebäudes konnten lediglich Vorstandsbereich, Konferenz- und Serverräume aktiv gekühlt werden. Die Standardbüros wurden nicht gekühlt, die Lüftung erfolgte ausschließlich über die Fenster. Die Kälteenergie wurde bereits damals von der Kältezentrale der Nordarkade bereitgestellt.

2.5.1. Vorentwurfsplanung

In der ersten Konzepterarbeitung wurden von den Energieplanern verschiedene Empfehlungen gegeben. Als Grundvoraussetzung für einen niedrigen Kühlenergiebedarf wurde die Realisierung niedriger interner Lasten beschrieben. Außerdem wurde eine weitgehende Ankopplung der thermischen Gebäudemasse an die Raumluft empfohlen. In diesem Falle ließe sich im Standardbüro allein durch Nachtlüftung mit der zentralen Abluftanlage ein befriedigender sommerlicher Komfort erzielen (< 60 h/a über Behaglichkeitsanforderung DIN 1946 [18]). Eine ggf. gewünschte zusätzliche aktive Kühlung sollte über Kühlsegel oder Kühldecken erfolgen. Die Simulationen ergaben, dass zur vollständigen Einhaltung der DIN 1946 ein kältetechnisch aktivierter Anteil von mindestens 35 % der Deckenfläche erforderlich wäre.

Berechnungen für den thermischen Komfort im Bestandsgebäude ergaben, dass das Behaglichkeitsfeld der DIN 1946 aufgrund des relativ hohen g-Wertes der Verglasung von ca. 63 %, der abgehängten Decken und des Fehlens von dezidierten passiven oder aktiven Maßnahmen zur Kühlung in den Standardbüros häufig (an weit über 300 h/a) überschritten wurde.

Eine von den Energieplanern im Sommer 2001 durchgeführte Messkampagne im Bestandsgebäude zeigte z. T. bereits bei niedrigen Außenlufttemperaturen (zwischen 16°C und 24°C) Raumlufttemperaturen von mehr als 26°C sowie an sehr warmen, sonnigen Tagen Raumlufttemperaturen im Bereich von 30°C . Andererseits zeigten die Messungen auch das Potenzial der Kühlung mit Außenluft auf. Dies wird durch das auffällige (richtige) Lüftungsverhalten der Nutzer deutlich. In Abbildung 15 ist neben den gemessenen Werten das gleitende Tagesmittel über 24 h dargestellt. Dieser Wert ist auch ein Maß für das nächtliche Potenzial zur Auskühlung der Räume. Die Grafik zeigt allerdings auch, dass einige Nächte mit Minimumtemperaturen von über 20°C im Erfassungszeitraum auftraten, in denen das Kühlpotenzial deutlich reduziert ist.

Das Kühlkonzept wurde anhand thermisch-dynamischer Simulationsrechnungen mit angekoppelten Luftströmungsmodellen unter Verwendung der Simulationssoftware TRNSYS [19] validiert.

Im weiteren Verlauf der Planung wurden folgende Eckdaten für einen Büroraum von $18,75\text{ m}^2$ ermittelt:

- Die internen Wärmelasten durch Personen ($2 \cdot 75\text{ W}$) und Computer ($2 \cdot 50\text{ W} + 2 \cdot 30\text{ W}$) liegen bei $16,5\text{ W/m}^2$. Unterhalb von 250 W/m^2 Globalstrahlung (horizontal) liefert das Kunstlicht zusätzlich 14 W/m^2 . Diese Wärmelasten sind durch den Einsatz von TFT-Monitoren und einer Kunstlichtregelung bereits weitgehend minimiert.
- Die solaren Lasten werden - unter Beibehaltung der Fassadenstruktur - durch den Einsatz von Sonnenschutzglas, einen außenliegenden Sonnenschutz sowie mit einer Sonnenschutz-Steuerung per Gebäudeautomation reduziert.
- Ein zentraler druckdifferenz geregelter Abluftventilator steuert die Nachtlüftung. Zuluftelemente in der Fassade liefern pro Raum je nach Raumgeometrie und Anzahl der Klappen zwischen 40 und $80\text{ m}^3/\text{h}$ Zuluft bei einer Druckdifferenz von 12 Pa von Raum gegen Außenluft. Die Lüftungsklappen werden hydraulisch so justiert, dass ein windabgewandtes Büro bei $c_p = -0,6$ und Wind von 8 m/s tagsüber noch ca. 50 % des Soll-Volumenstroms erhält.

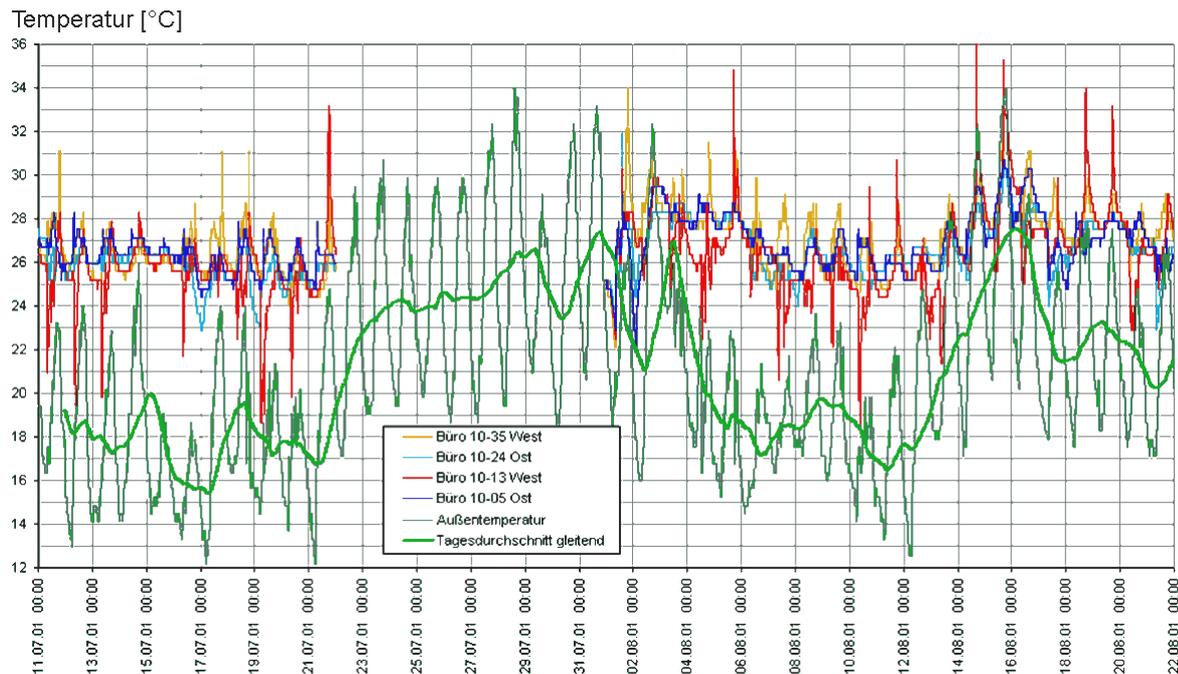


Abbildung 15: Komfortmessungen im Juli und August 2001, Übersicht der Lufttemperaturen über den gesamten Erfassungszeitraum, Quelle: ip5, Projektskizze

Die Anordnung der Serverräume wurde analog zum Neubau Ostarkade als an der Fassade liegend empfohlen, um im Winter und den Übergangszeiten eine energieeffiziente Außenluftkühlung zu ermöglichen. Außerdem rieten die Energieplaner dazu, die Kälteversorgung des Haupthauses aus der bestehenden Kältezentrale der Nordarkade zu realisieren, die Entscheidung für oder gegen adiabate Zuluftkühlung in den Lüftungsanlagen sollte erst im Kontext mit dem zu diesem Zeitpunkt noch nicht entwickeltem Wasserkonzept getroffen werden.

2.5.2. Umsetzung

Die Kälteerzeugung durch eine Kompressionskältemaschine und zwei Absorptionskältemaschinen, welche im Sommer die Abwärme der BHKW nutzen, wurde zunächst nur durch einen Ausbau der Rückkühlleistung etwas verändert. Im Rahmen der Infrastrukturmaßnahmen (siehe Kapitel 2.6) sind jedoch weitere Kälteerzeuger zum Verbund dazugekommen.

Die Kälteenergie aus dem Verbund erreicht das Haupthaus über eine große Zuleitung. Dieser Hauptstrang gliedert sich dann in zwei Stränge, von denen der eine die Kühldecken, der andere im Wesentlichen die Kühlregister in den Lüftungsanlagen versorgt. Die Anlagen sind in Tabelle 10 und in Abbildung 16 als Schema zusammen mit den Kältezählern dargestellt.

Die Standardbüros verfügen allesamt über Kühldecken. Diese werden im Sommer bei Überschreiten der Solltemperatur einzeln pro Büro über die Gebäudeleittechnik aktiviert. Zur Minimierung des Energieaufwandes für diese aktive Klimatisierung ist eine Nachtlüftung realisiert, die in den kühleren Nacht- und Morgenstunden die Wärme aus dem Gebäude abführen soll (siehe Kapitel 2.4.2).

In einem Standardbüro mit 3 Achsen sind $8,36 \text{ m}^2$ Kühldecke (46 % der Grundfläche) installiert. Im Zwei-Achser sind es $5,57 \text{ m}^2$ (46 % der Grundfläche). Die Kühlleistung der Kühldecke beträgt 80 W/m^2 bei einer Vorlauftemperatur von 18 °C und einer operativen Temperatur von 26 °C im Raum bzw. 100 W/m^2 bei einer Temperaturdifferenz von 10 K.

	Leistung [kW]	Durchfluss [m ³ /h]
RLT-Anlage A03 Halle EG	136	19,5
WRG-Anlage A03 Halle EG	92	15,8
RLT-Anlage A09 Catering	8	1,15
RLT-Anlage C05 Küche	79	11,3
RLT-Anlage C08 Sitzungssaal	32	4,6
RLT-Anlage D01 Vorstand	196	26,1
WRG-Anlage D01 Vorstand	136	23,4
WT Kühldecken	440	63,07
Umluftkühlgeräte Bauteil B	12	5,59
Umluftkühlgeräte Bauteil C	52	8,29

Tabelle 10: Anlagenkomponenten für die Kühlung mit Anschlussleistung und Durchflussmenge gemäß Planung

Zur Minimierung der Kühllasten während des Tages wird der über die Abluftanlage erzeugte Luftwechsel bei steigenden Außenlufttemperaturen sukzessive bis auf das hygienisch notwendige Minimum gesenkt. Analog dazu wird bei kalten Außenlufttemperaturen der Luftwechsel ebenfalls verringert, um Lüftungswärmeverluste zu minimieren. Lediglich im Bereich von 15°C bis 21°C Außentemperatur soll der maximale Luftwechsel gefahren werden. Diese Funktionalität wird in der Einzelraumregelung der Gebäudeleittechnik hinterlegt und über die Änderung der Öffnungsintervalle der Überströmöffnungen realisiert.

Eine Minimierung der externen Einstrahlung wird durch das automatische Absenken des Sonnenschutzes angestrebt. Dazu wird an der Wetterstation getrennt nach den vier Fassadenrichtungen die Einstrahlung gemessen und bei Überschreiten des Grenzwertes von 350 W/m² der Fahrbefehl an den Sonnenschutz gegeben. Liegt der jeweilige Wert 15 Minuten lang unter 250 W/m², wird der Sonnenschutz wieder automatisch nach oben gefahren, sofern der Nutzer die Regelung nicht übersteuert hat.

Der Einsatz von adiabater Kühlung soll den Primärenergiebedarf für das Gewerk Kälte deutlich senken. Hierzu wurden vom Energieplaner Berechnungen durchgeführt, die in Abbildung 17 dargestellt sind. In der Umsetzung wurde aufgrund der Größe der möglichen Energieeinsparung lediglich die Anlage Vorstand mit einer solchen Kühlfunktion ausgestattet.

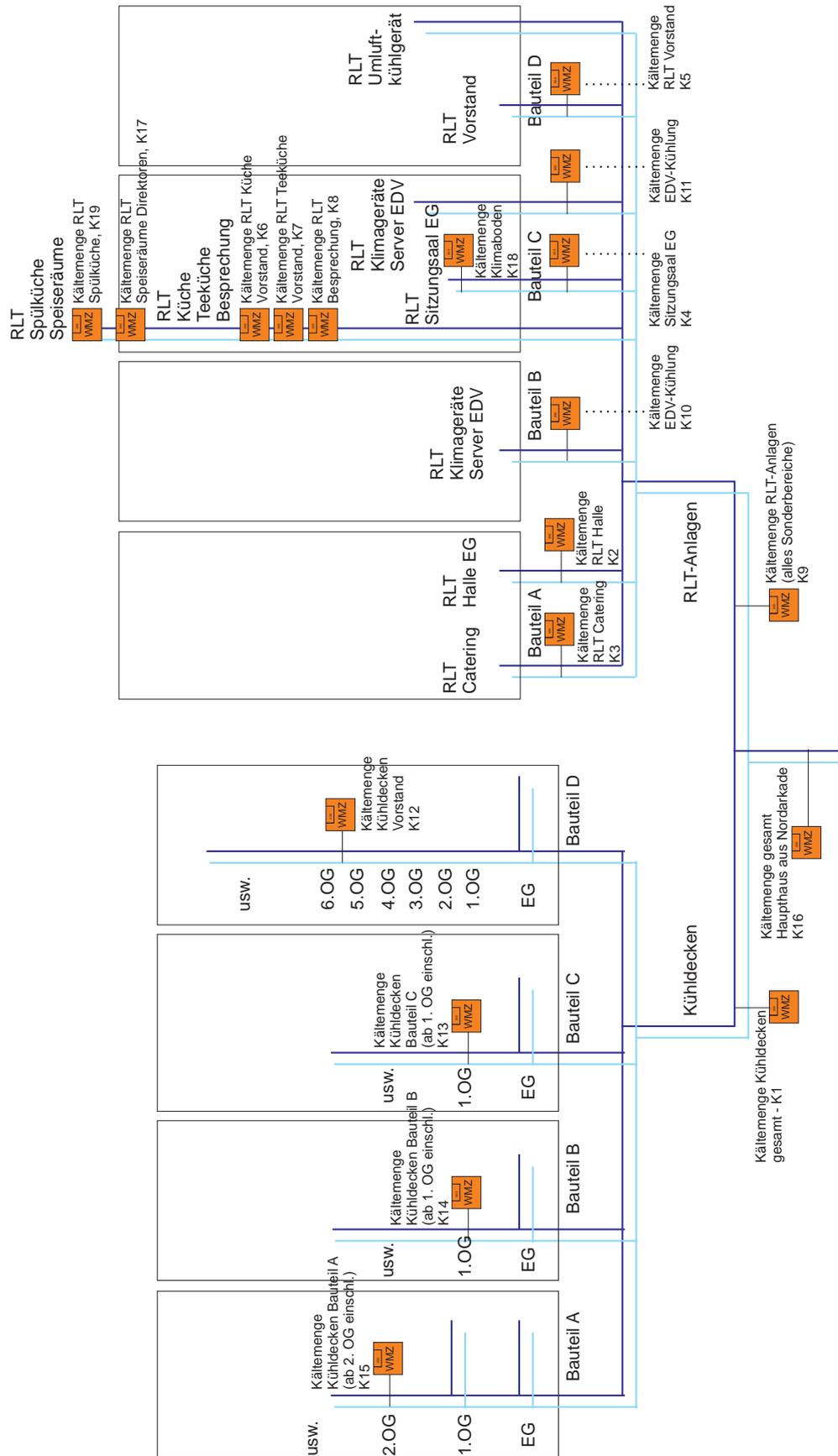


Abbildung 16: Schema der Kälteverteilung mit Abnehmern und Kältemengenzählern

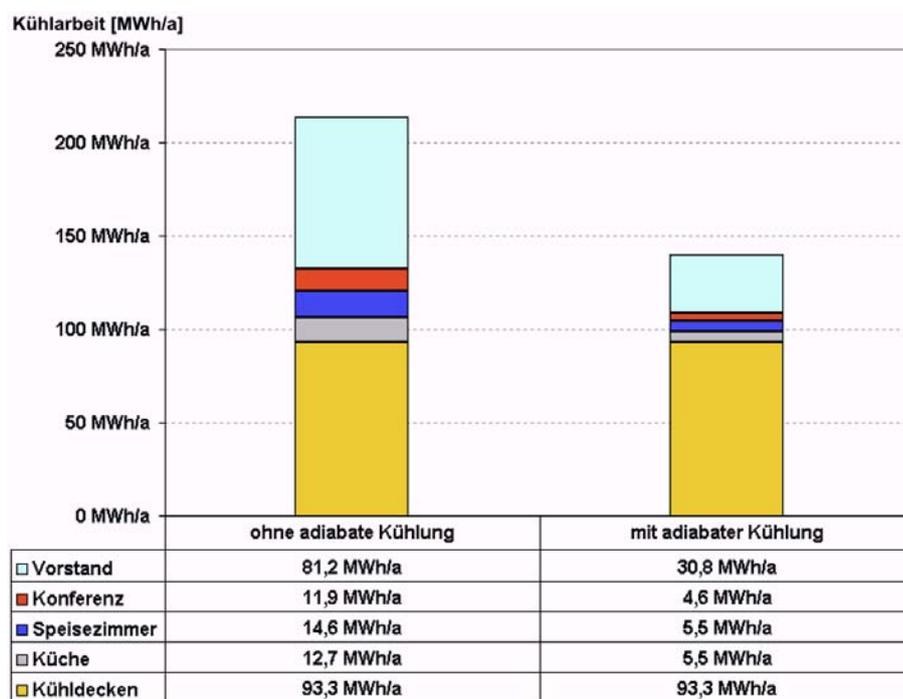


Abbildung 17: Kältebedarf (Nutzenergie) mit und ohne indirekte(r) adiabate(r) Kühlung, Quelle: ip5

2.6. Infrastrukturmaßnahmen

Während der Projektlaufzeit fanden parallel auch die sogenannten Infrastrukturmaßnahmen statt. Im Rahmen dieses Maßnahmenpaketes führte die KfW in ihrer Frankfurter Liegenschaft einen Großteil der Kälte- und Wärmeerzeuger zu einem Verbund zusammen, um die einzelnen Anlagen bedarfsabhängig immer optimal zu betreiben und so eine möglichst hohe Effizienz im Hinblick auf den Primärenergieeinsatz und die CO₂-Bilanz zu erreichen. Heute sind Nord-, Süd- und Ostarkade sowie das Haupthaus miteinander verbunden. Auch der Neubau Westarkade wird Teil des Verbundes. Allerdings sah man sich dabei mit unterschiedlichen hydraulischen Problemen konfrontiert, die auch 2009 immer noch eine Rolle spielten.

Im Rahmen der Planung dieser Maßnahmen wurden beispielsweise im Bereich der Kälteerzeugung Antriebs- und Kälteleistung der Aggregate über einen Zeitraum von 48 Stunden im Intervall von 5 Minuten gemessen. Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse und gibt die ermittelten Leistungszahlen mit an. Die Leistungszahl (EER = energy efficiency ratio) gilt als Kennzahl für die Effizienz von Kälteerzeugern. Sie ist definiert als der Quotient aus Kälteerzeugungsleistung und Antriebsleistung (thermisch oder elektrisch). Die erzielbare Leistungsziffer hängt auch vom Temperaturniveau der erzeugten Kälte und der Temperatur des Kühlwerks ab.

In der Kältezentrale der KfW, die sich in der Nordarkade befindet, waren schon vor der Sanierung mehrere Kälteerzeuger im Einsatz. In der Grundlast wurden zwei Absorptionskältemaschinen (Abbildung 18) betrieben, die ihre thermische Antriebsenergie vornehmlich von den Blockheizkraftwerken bezogen.

Kälteerzeuger	Leistungs- zahl	Temperaturen Kälte	Temperaturen Kühlturm	Primärenergie- Faktor
Turbo-KKM KA 01	5,75	7,8 / 11,5 °C	22,3 / 25,9 °C	2,05
Kolben-KKM KA 05	4,01	8,1 / 13,2 °C	25,0 / 31,3 °C	1,43
Kolben-KKM KA 06	4,12	8,7 / 13,0 °C	25,0 / 31,3 °C	1,47
AKM KA 10	0,73	6,9 / 10,0 °C	23,0 / 29,9 °C	
AKM KA 11	0,52	6,9 / 9,0 °C	23,0 / 29,9 °C	

Tabelle 11: Leistungszahl der Kälteerzeuger (KKM = Kompressionskältemaschine, AKM = Absorptionskältemaschine)

Im Zuge der Erweiterung wurden weitere Kältemaschinen hinzugefügt. Heute gibt es in der Kältezentrale vier Absorptionskältemaschinen, von denen zwei Niedertemperaturabsorber mit 80 bzw. 140 kW thermischer Leistung und zwei Hochtemperaturabsorber mit jeweils 200 kW thermischer Leistung sind. Drei Kompressionskältemaschinen (Abbildung 19) stehen in der Kältezentrale der Nordarkade und decken die Lastspitzen des Kältebedarfs. Zwei davon sind Schraubenverdichter (TRANE Typ DGHA 107R) mit jeweils einer thermischen Leistung von 390 kW, die dritte Maschine ist ein Turboverdichter mit 980 kW_{therm}. Dieser wurde 1998 auf ein neues Kältemittel umgestellt. Der Turboverdichter konnte im Jahr 2000 aufgrund der fehlenden Rückkühllleistung nicht betrieben werden.

Außerdem ist die Kompressionskältemaschine (Twin-Schraubenverdichter, 246 kW_{therm}) in der Ostarkade noch an den Kälteverbund angeschlossen sowie ein weiterer Schraubenverdichter im Dachgeschoss der Nordarkade mit 43 kW Leistung. Im SolarBau-Monitoring der Ostarkade war festgestellt worden, dass die dortige Kältemaschine für die benötigte Kälteleistung überdimensioniert war. Sie kann nun im Kälteverbund effizienter betrieben werden.

So kommt die Kälte für das Haupthaus heute theoretisch aus einem Verbund dieser Niedertemperatur-



Abbildung 18: Die bestehende Absorptionskältemaschine

und Hochtemperaturabsorptionskältemaschinen und den Kompressionskältemaschinen (Turbo/Kolben). Der Anteil der Absorptionskältemaschinen, welche ihre Antriebsenergie aus dem Wärmeverbund erhalten, ist ein entscheidender Faktor für die Primärenergiebilanz bei der Kälteerzeugung. Die HT-Absorber waren während der Monitoring-Phase in Betrieb, die zwei Niedertemperatur-Absorber jedoch standen während des gesamten Zeitraumes still.

An der Wärmeversorgung der Liegenschaft durch BHKW wurde festgehalten. Die zwei alten Gaskessel (Tabelle 12) wurden durch neue Brennwertkessel ersetzt, so dass sich in dem Wärmeverbund heute zwei Gasbrennwertkessel und drei Gas-BHKW befinden. Die Heizzentrale befindet sich im Untergeschoss des Haupthauses. Die Brennwertkessel haben jeweils eine Leistung von $P_n = 1575 \text{ kW}$ und von $Q_n = 1721 \text{ kW}$.

Um eine möglichst hohe Stromerzeugung zu erzielen und somit den resultierenden Primärenergiefaktor für die Wärmeerzeugung zu optimieren, ist ein großer Anteil der BHKW an der Gesamtwärmeerzeugung anzustreben. Der produzierte Strom wird im Gebäude selbst verwendet und nur bei Überschuss ins Netz eingespeist. Während der Projektlaufzeit hatten die Zähler keine Einspeisung ins öffentliche Netz registriert.



Abbildung 19: Die bestehende Kompressionskältemaschine

Maschine	Größe	Baujahr	Bemerkung
BHKW	3*440 kW (3*321 KW elektr.)	1997	guter Zustand
Gaskessel	2*1860 KW	unbekannt	evtl. Ersatz durch Brennwertkessel, je nach Gesamtwärmebedarf

Tabelle 12: Die Wärmeerzeuger im Kraft-Wärme-Kälte-Verbund bei der Bestandsaufnahme vor der durchgeführten Sanierung

2.7. Beleuchten

Zur Einsparung von elektrischer Energie für die künstliche Beleuchtung sollten Fassade und Raumgeometrie so gestaltet sein, dass sich das zur Verfügung stehende Tageslicht so gut wie möglich ausnutzen lässt. Das ist dann der Fall, wenn der Nutzer über das gesamte Jahr möglichst selten das Kunstlicht benötigt und somit die Tageslichtautonomie des Raumes möglichst hoch ist. Der verbleibende Kunstlichtbedarf sollte mittels effizienter Leuchtmittel und intelligenter Regelung möglichst stromsparend gedeckt werden.

2.7.1. Tageslicht

In der Planung wurden drei Varianten anhand von Tageslichtsimulationen mit RADIANCE [20] berechnet und visualisiert. Die erste Variante mit Putzbalkonen (Abbildung 20) ähnelt der Situation im Bestand, nur wurden die Balkone nach oben versetzt, um den sichtbaren Anteil des Himmels und somit die Tageslichtautonomie zu erhöhen. Die Putzbalkone nehmen ein Lamellensystem auf, das über die gesamte Geschosshöhe verfahren werden kann.

Als weitere Variante wurde die Entfernung der Putzbalkone und ein konventioneller außenliegender, fassadennaher Behang mit einer Tageslichtumlenkung im oberen Bereich untersucht.

Bei der realisierten Variante (Abbildung 21) wurde ebenfalls eine Entfernung der Putzbalkone vorgenommen und damit eine deutliche Verbesserung der Tageslichtsituation erreicht. Hier wurde das bereits in Kapitel 2.2.1 beschriebene bewegliche Glaselement in der Fassadenebene montiert.

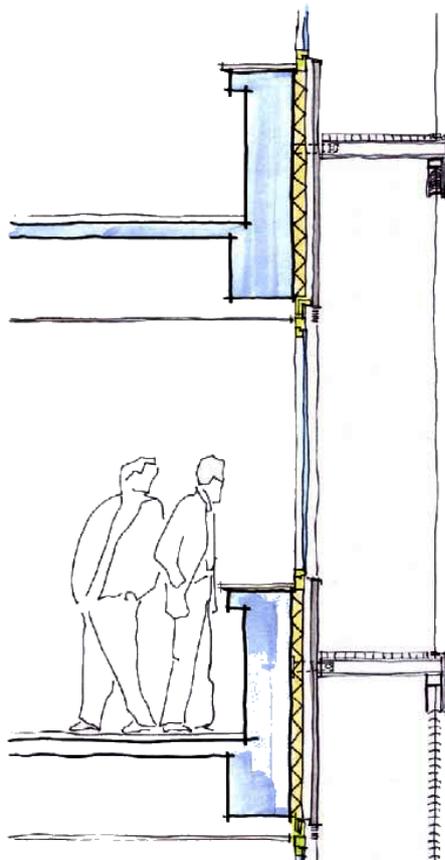


Abbildung 20: Variante 1 der Fassaden- und Sonnenschutzgestaltung mit neuer, leicht nach oben versetzter Anordnung der Putzbalkone, Quelle: RKW Architekten

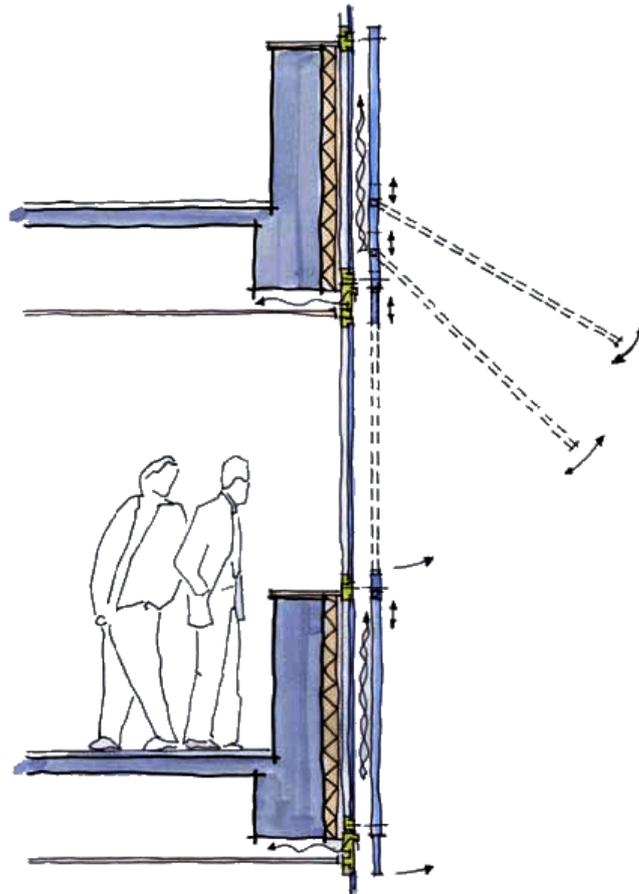


Abbildung 21: Variante 2 der Fassaden- und Sonnenschutzgestaltung mit beweglichem Glaselement, Quelle: RKW Architekten

2.7.2. Kunstlicht Büros

Wie im Neubau der Ostarkade (ebenfalls ein EnOB-Monitoring-Projekt) wurde im Haupthaus eine tageslicht- und präsenzabhängige Kunstlichtregelung zur Minimierung des Kunstlichtstrombedarfs installiert. Abhängig vom Tageslichtangebot, das über einen Helligkeitssensor über der Tischfläche gemessen wird, stellen die Leuchten das zusätzliche Kunstlicht bereit, um ein vom Nutzer vorgewähltes Beleuchtungsniveau zu erreichen. Falls der Nutzer versäumt, das Licht in seinem Büro auszuschalten, übernimmt dies die Gebäudeleittechnik 15 Minuten nach Verlassen des Raumes. Ein automatisches Wiedereinschalten des Kunstlichts ist nicht implementiert worden, der Nutzer muss bei Bedarf das Licht selbst wieder einschalten.

In den Büros ist pro Achse eine doppellängige Langfeldpendelleuchte (Modell „ScoreLine“ von Zumtobel, Design von Architekt Alexander Theiss) installiert. In einer Leuchte befinden sich jeweils zwei Leuchtmittel T5 mit 16 mm Durchmesser, die zusammen eine installierte Leistung von 49 Watt aufweisen. Das Vorschaltgerät liegt bei 3 Watt, so dass sich pro Leuchte 52 Watt maximale Stromaufnahme und pro Büroachse (1,25 m) 104 Watt ergeben. Die maximale spezifische Leistung beträgt somit 16 W/m^2 , wobei theoretisch auf dem Arbeitsplatz eine Beleuchtungsstärke bis 1200 lx möglich ist, momentan aber eine Einstellbarkeit durch den Nutzer zwischen 300 und 750 lx implementiert wurde.

Adaptive Kunstlichtregelung Eine Besonderheit stellt die adaptive tageslichtabhängige Kunstlichtregelung dar. Diese berücksichtigt, dass ein Mensch einen Raum mit Fenster bei absolut gleich bleibender Beleuchtungsstärke subjektiv dunkler empfindet, wenn die Beleuchtungsstärke außen zunimmt. Die Ergänzung des Tageslichts zu einem gewünschten Beleuchtungsniveau auf der Arbeitsoberfläche erfolgt nach Abbildung 22: bis zu einer bestimmten Außenbeleuchtungsstärke X wird auf dem Arbeitsplatz auf ein konstantes Niveau geregelt, nimmt die Beleuchtungsstärke außen weiter zu, wird gleitend der Sollwert mit angehoben oder anders gesagt, das Kunstlicht wird weniger zurückgedimmt. Wird außen eine Beleuchtungsstärke Y erreicht, wird der Sollwert nicht mehr weiter angehoben. Und reicht schließlich das Tageslicht aus (Punkt Z), um den Sollwert zu erreichen, wird mit einer Verzögerung von 15 Minuten das Kunstlicht abgeschaltet. In Kapitel 4.5.2 wird die Überprüfung der Kunstlichtregelung beschrieben.

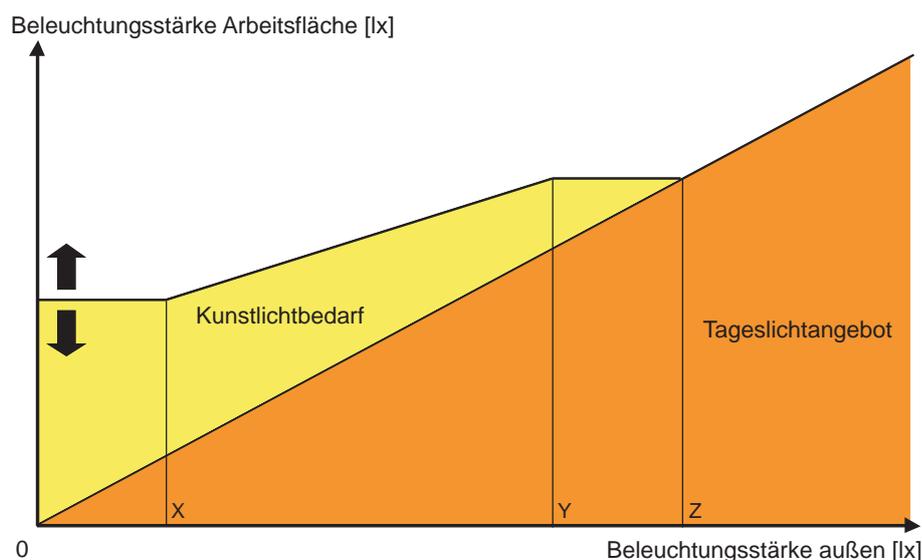


Abbildung 22: Adaptive tageslichtabhängige Kunstlichtregelung mit gleitender Anhebung des Beleuchtungsniveaus bei zunehmender Außenbeleuchtungsstärke

2.7.3. Kunstlicht Flure

In den Fluren kommt keine präsenzabhängige Regelung zum Einsatz, sondern die Beleuchtung wird während der Nutzungszeit automatisch über ein Zeitschema geregelt. Außerhalb der Nutzungszeit kann die Beleuchtung bei Bedarf per Tastendruck eingeschaltet werden. Die Flurbeleuchtung bleibt dann für 1 Stunde eingeschaltet und schaltet dann automatisch wieder ab. Im Treppenhaus schaltet die Beleuchtung nach 15 Minuten automatisch ab, in den WCs nach 20 Minuten. Die Regelung in den Fluren ist dabei so eingestellt, dass nur nach Betätigung des Tasters das Beleuchtungsniveau für 5 Minuten auf 100% eingestellt ist und danach auf 50 % gedimmt wird.

In den meisten Fluren beträgt die installierte Leistung 6 W/m^2 . In den Fluren in Bauteil B gibt es zusätzlich zu den Decken-Einbauleuchten noch Lichtleisten, die als Downlights die Wände im Streiflicht beleuchten. Diese Leisten sind aus einzelnen HID-Lampen (high intensity discharge lamp = Hochdruckentladungslampe) à 20 Watt zusammengesetzt. Insgesamt beläuft sich deren Anzahl im Gebäude auf 780 Stück.

2.8. Wasser

Neben der Einsparung an Energie spielt für den Bauherrn auch der schonende Umgang mit der Ressource Wasser eine wichtige Rolle. So war bereits für den Neubau der Ostarkade 2002 eine Verwertung des anfallenden Regenwassers geplant, welche jedoch aufgrund der geringen anfallenden Mengen zunächst nicht umgesetzt wurde. Mit der Sanierung des Haupthauses wurde die vorgesehene Regenwassernutzung nun realisiert. Das Regenwasser vom Dach der Ostarkade sowie vom Dach des Haupthauses wird dazu in Zisternen gesammelt und für die Rückkühlwerke der Technikzentrale und zur Außenbewässerung wiederverwendet. Der Vorteil hierbei ist, dass das Regenwasser nicht enthärtet werden muss.

Außerdem wurde für die Wiederverwertung von wenig verschmutztem Wasser ein Grauwasserkonzept erarbeitet. Eine Grauwasseranlage (Abbildung 23) bereitet das im Gebäude anfallende Abwasser aus den Handwaschbecken und den Urinalen auf, das dann in den Toilettenspülungen wieder verwendet wird.



Abbildung 23: Die Fermenterbehälter der Grauwasseraufbereitungsanlage

2.8.1. Vakuumtoiletten

Wie bereits im Gebäude Ostarkade realisiert, kamen auch bei der Sanierung des Haupthauses Vakuumtoiletten zum Einsatz. Der Wasserverbrauch für die Toilettenspülungen wird durch den Einsatz von Vakuumtoiletten um ca. 90% reduziert.

Im Unterschied zum System in der Ostarkade wird hier von der Toilette direkt in das im Unterdruck befindliche Netz im Gebäude abgesaugt. In der Ostarkade wurde die Toilette erst über einen Vorratsbehälter durch ein weiteres Ventil in das Verteilnetz entleert. Aus Platzmangel war dies im Haupthaus nicht möglich. Die direkte Absaugung führte allerdings zunächst zu einer größeren Geräusentwicklung.

Sowohl durch Untersuchungen der ausführenden Firma als auch durch Messungen des fbta wurden Schallpegel von ca. 100 dB ermittelt (siehe Kapitel 4.9.2). Da das Geräusch auch von Personen als

unangenehm empfunden wurde, wurden noch vor Bezug des Gebäudes die Toiletten mit zusätzlichen Schalldämpfern ausgestattet. Die dazu speziell entwickelte Technologie wurde von der ausführenden Firma als Patent angemeldet. Eine Art Topf gibt der Luft die Gelegenheit sich auszudehnen und so ihre Geschwindigkeit zu verringern (Abbildung 24). Dadurch verringert sich auch der Geräuschpegel. Dem Bauherrn wurden die Ergebnisse dieser Maßnahmen vorgeführt und er zeigte sich mit dem Ergebnis zufrieden. Messungen bestätigten eine Absenkung der Schallpegel auf ca. 80 dB.

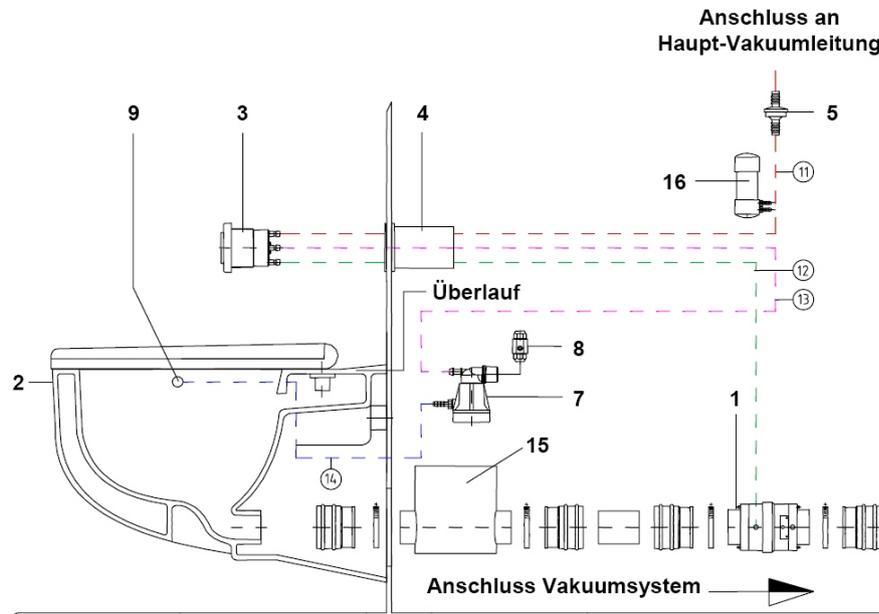


Abbildung 24: Schema Vakuumtoilette, Quelle: Roediger. Das Absaugventil (1) trennt das unter atmosphärischem Druck stehende Toilettenbecken (2) vom Vakuumrohrsystem. Zwischen Toilettenbecken (2) und Ventil (1) ist noch ein Schalldämpfer (15) eingebaut.

3. Monitoring

3.1. Ziele des Monitorings

Hauptziel des Monitorings ist zunächst der Nachweis, dass die geplanten und im Förderprogramm geforderten Einsparungen an Primärenergie durch die Sanierung tatsächlich erzielt wurden. Dazu werden alle für die primärenergetische Bewertung relevanten Energieströme erfasst. Der elektrische Energieverbrauch wird in die Sektoren Beleuchtung, Lüftung, Kälte/Klimatisierung, diverse Technik (z.B. Hilfsaggregate), zentrale Dienste und nutzerbezogener Verbrauch aufgeteilt, um die verschiedenen Anteile der jeweiligen Sektoren untersuchen zu können. Ziel ist es, möglichst viele Größen zentral für alle vier Bauteile zu erfassen und dezentrale Messgrößen exemplarisch in einzelnen Räumen aufzunehmen. Aufgrund der zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel konnten bestimmte Bereiche lediglich exemplarisch gemessen und auf das gesamte Gebäude hochgerechnet werden. Die Messdatenerfassung erfolgt wie im SolarBau-Projekt Ostarkade über die Gebäudeleittechnik (GLT) des Gebäudes.

Da das Gebäude mit einer komplexen Einzelraumregelung ausgestattet ist, sollen insbesondere die Regelung von Beleuchtung, Sonnen-/Blendschutz, Lüftung und ggf. Kühlung überprüft werden. Durch temporäre Messungen in verschiedenen Räumen bzw. an den zentralen Abluftanlagen der Gebäude können Regelungsstrategien verbessert bzw. an die tatsächlichen Anforderungen (Klima, Gebäude, Nutzer) angepasst werden. Damit kann die Nutzerakzeptanz entscheidend verbessert werden. Insbesondere soll messtechnisch nachgewiesen werden, ob sich der thermische und visuelle Komfort gegenüber dem Zustand im Bestandsgebäude deutlich verändert hat.

Über exemplarische mobile Messungen soll der thermische und der visuelle Komfort in einzelnen Büroräumen (mit unterschiedlicher Orientierung) zu unterschiedlichen Jahreszeiten überprüft werden. Diese Ergebnisse sollten ursprünglich mit Nutzerbefragungen verglichen werden, deren Durchführung der Bauherr jedoch nicht ermöglichen konnte.

Durch die ausführlich vorliegenden Ergebnisse aus dem SolarBau-Projekt Ostarkade besteht in den verschiedenen Disziplinen die Möglichkeit, Erfahrungen zu vergleichen und eventuelle Unterschiede aufzuzeigen.

3.2. Historie

Durch die Insolvenz des Generalunternehmers WalterBau AG Anfang 2005 hatte sich das gesamte Sanierungsprojekt deutlich verzögert. Noch Ende November 2004 war die Fertigstellung der Messtechnik für Mitte 2005 angesetzt. Somit hätte einem zweijährigen Monitoring bis Mitte 2007 und einem Abschluss des Projektes bis Ende 2007 nichts im Wege gestanden.

Das Ausscheiden des Generalunternehmers machte jedoch eine Neuausschreibung für die Umsetzung der Messtechnik nötig. Die Zeit bis zur Neuausschreibung wurde zur Konkretisierung des Messkonzeptes genutzt. Schemaskizzen wurden als Diskussionsgrundlage weiter ausgearbeitet. Im Herbst 2005 wurde von der Elektrofirma nach der Direktvergabe an einen Unterauftragnehmer eine neue Kostenplanung vorgelegt. Die Gesamtkosten lagen nun um fast 30 Prozent höher und waren so nicht mehr komplett über das Budget für die Begleitforschung zu realisieren.

Das Messkonzept musste in Teilen reduziert werden. Eine sinnvolle Reduktion bis auf Höhe des vorhandenen Budgets war aber auf Basis der vorliegenden Kostenplanung nicht möglich. Glücklicherweise erklärte sich der Bauherr aufgrund der prekären Situation bereit, ungefähr zwei Drittel der notwendigen Mehrkosten selbst zu übernehmen, das weitere Drittel wurde aus dem Budget des Projektes bereitgestellt. So konnte Ende 2005 die Begleitforschung im Sinne der EnOB-Vorgaben gesichert werden.

Im August 2006 wurde mit dem Bezug des Gebäudes begonnen. Im Februar 2007 konnten die ersten Messdaten über die automatische Messdatenerfassung aufgezeichnet werden. Allerdings bestanden auch noch Anfang 2008 Probleme mit der Messdatenerfassung, die hauptsächlich darin begründet lagen, dass bei den Wärme- und Kältezählern die Summen von Unterzählern z.T. große Abweichungen zu den Hauptzählern aufwiesen.

Diesem Bericht liegen Datenauswertungen bis zum 1. Juli 2009 zugrunde, es wird aber im Wesentlichen Bezug auf die beiden Messperioden 2007 und 2008 (jeweils das Kalenderjahr) genommen. Werden Daten aus dem Jahr 2009 verwendet, wird explizit darauf hingewiesen.

3.3. Messkonzept

Für die Bildung der Energiekennwerte wurde eine Erfassung der Hauptenergieströme für Heizen, Lüften und Kühlen umgesetzt. Es wurden wesentliche Großverbraucher bezüglich ihres Strom-, Kälte- und/oder Wärmeverbrauchs erfasst. Außerdem wurden zur Bewertung des Nutzerkomforts und des Nutzerverhaltens sechs Büroräume exemplarisch genauer betrachtet. Im Folgenden werden die Besonderheiten der einzelnen Gewerke beschrieben.

3.3.1. Erfassung Heizen

Im untersuchten Gebäude wurden Wärmemengenzähler des Fabrikats Techem eingebaut. Für kleinere Durchflussmengen wurden Kompaktzähler, für größere Splitzähler eingesetzt. Bei den Kompaktzählern sind die Temperatursensoren in den Volumenstromzähler integriert, der in den Vorlauf eingebaut wird, so dass nur noch im Rücklauf eine Tauchhülse mit Temperatursensor eingebaut wird. Bei den Splitzählern sind Durchflussmengenähler, Temperatursensor im Vorlauf und im Rücklauf separat eingebaut.

Da aus Platzmangel die erforderlichen Beruhigungsstrecken nicht vorhanden waren, konnte an den Gasbrenntwertkesseln direkt die Wärmemenge nicht erfasst werden. Über die Differenz aus den BHKW, der Gesamtwärmemenge und dem Abgang in die Nordarkade kann der Beitrag der Gaskessel dennoch ermittelt werden (Abbildung 10 Kapitel 2.3). Da jedoch bis 2009 der Abgang zur Nordarkade nicht wie ursprünglich vereinbart elektronisch angebunden war, konnte diese Differenzbildung nur monatlich auf Basis vor Ort abgelesener Werte erfolgen.

Wärmemengenzähler befinden sich außerdem an den großen Heizkreisen für die statische Heizung, für die Lüftungsanlagen und die Fußbodenheizungen. Zwei weitere Zähler erfassen die Energie für die zentrale Warmwasserbereitstellung. Da der Großteil des Warmwassers dezentral über elektrische Durchlauferhitzer erzeugt wird, wurden hier vier WCs exemplarisch mit manuell abzulesenden Stromzählern gemessen.

Bereits zu Beginn des Monitorings wurde festgestellt, dass manche Zähler nur eine Auflösung von 10 kWh aufwiesen. Die Planer teilten auf Rückfrage hin mit, dass die Auflösung der eingebauten Wärmemengenzähler in der Heizung und Kälteanlage abhängig von der jeweils fabrikseitig zugeordneten Durchflussmenge festgelegt wurde und nicht geändert werden kann. Laut Hersteller Techem könne die Veränderung der Auflösung nur durch den kompletten Austausch der Wärmemengenzähler erreicht werden. Die neuen Wärmemengenzähler wären dann eine Sonderanfertigung. Aus diesem Grund war bei einigen wenigen Zählern eine sinnvolle stündliche Auflösung der Leistung nicht möglich. Für Monats- und Jahreswerte ergaben sich aber keine Probleme.

Bei zukünftigen Monitoring-Konzepten sollte für jeden Wärmemengenzähler anhand von zu erwartenden Wärmeleistungen und der jeweilig angestrebten Auswertung schriftlich die minimale Auflösung

festgelegt werden. Insbesondere wenn stündliche Lastgänge ausgewertet werden sollen, ist eine hohe Auflösung zwingend erforderlich.

3.3.2. Erfassung Lüften

An großen Lüftungsanlagen wurden entweder getrennt nach Ab- und Zuluft oder zusammengefasst für alle Ventilatoren Stromzähler installiert. Zwei WC-Abluftanlagen wurden exemplarisch mit Stromzählern ausgestattet.

Im Bauteil B wurde an sechs Positionen über die Höhe des Büroturms die Druckdifferenz (Innen gegen Außen) gemessen, um zusammen mit dem Stromverbrauch des zentralen Abluftventilators und der Temperatur der Abluft Erkenntnisse über die Funktion des Abluftkonzeptes zu erhalten. Dabei wurden fünf Sensoren auf der Ostseite, der meist windabgewandten Seite, und als Referenz einer auf der Westseite installiert.

Für die Differenzdruckmessung wurde ein Sensor mit 0 bis 300 Pa Messbereich eingesetzt. Übertragen wurden Werte von 0 – 100%, d.h. Wert 0 entspricht 0 Pa und Wert 100 entspricht 300 Pa. Die Genauigkeit ist mit einer Toleranz von maximal 1% vom Meßbereichsendwert angegeben, was einer Toleranz von 3 Pa entspricht. Im Betrieb stellte sich heraus, dass die Sensoren meistens 0 anzeigten. Zunächst wurde untersucht, ob ein Anschlussfehler vorlag. Nachdem sichergestellt war, dass dies nicht der Fall war, wurden zwei Sensoren ausgebaut und beim fhta getestet. Es konnte festgestellt werden, dass auch bei niedrigen Druckdifferenzen eine sich ändernde Messspannung ausgegeben wird. Ergebnisse zur Funktion der zentralen Abluftanlage und den Druckmessungen finden sich in Kapitel 4.3.1.

Es hat sich hier und auch beim vorangegangenen Projekt gezeigt, dass die Differenzdruckmessung solcher kleiner Druckunterschiede, wie sie bei natürlichen oder zentralen Abluftkonzepten entstehen, eine diffizile Angelegenheit ist und genaueste Planung und Auswahl sowie Positionierung der Sensoren voraussetzt. Im vorliegenden Fall kann im Nachhinein festgestellt werden, dass die Auswahl von Druckdifferenzsensoren, die zwischen Unter- und Überdruck unterscheiden können, vorteilhafter gewesen wäre.

3.3.3. Erfassung Kühlen

Die Kälte wird wie bereits in Kapitel 2.5 beschrieben nicht im Gebäude selbst erzeugt, sondern gelangt über eine Zuleitung aus der Kältezentrale der Nordarkade ins Haupthaus. An dieser Gesamtzuleitung wurde ein Wärmemengenzähler installiert. Danach teilt sich die Kälteversorgung in die zwei Kreise „Kühldecken“ und „RLT-Anlagen“ auf, an denen jeweils ein weiterer Zähler installiert wurde (siehe auch Abbildung 16 Kapitel 2.5.2).

In den Kühldeckenkreisläufen der Bauteile A, B und C wurden oberhalb der Sondernutzungsbereiche (Halle EG, 1.OG) Zähler eingebaut, so dass ausschließlich die Büroflächen erfasst werden konnten. In Gebäude D wurde der Zähler so positioniert, dass nur der Vorstandsbereich erfasst wird. Hinter dem Abgang „RLT-Anlagen“ wurden vom Begleitforschungsteam geplante Unterzähler durch weitere vom Bauherrn gewünschte und selbst finanzierte Zähler ergänzt, so dass insgesamt zwölf einzelne Verbraucher erfasst wurden.

3.3.4. Erfassung Beleuchten

Bei einem so komplexen Gebäude war es aufgrund des begrenzten Budgets für das Monitoring nicht möglich, alle Kunstlichtbereiche über Zähler zu erfassen. Deshalb wurden auf insgesamt sechs Etagen der vier Bauteile die Stromverbrauchswerte getrennt nach Bürobeleuchtung und Flurbeleuchtung aufgezogen. Fünf Etagen enthalten eine Standardbüroanwendung, eine Etage im Vorstandsbereich in Bauteil D weist eine andere Raumnutzung und Ausstattung auf (Abbildung 25).

Außerdem wurden weitere Beleuchtungsstromkreise mit einer erwarteten hohen Leistungsaufnahme (drei Bereiche der Halle im EG, der große Sitzungssaal und die Speiseräume) mit Stromzählern versehen. Diese sind z.T. LON-fähig [14] und auf die Gebäudeleittechnik aufgeschaltet. Hier sind Stundenbewertungen möglich. Zum Teil wurden aber nur einfache Zähler in die jeweiligen Verteilerschränke eingebaut, die monatlich manuell ausgelesen wurden.

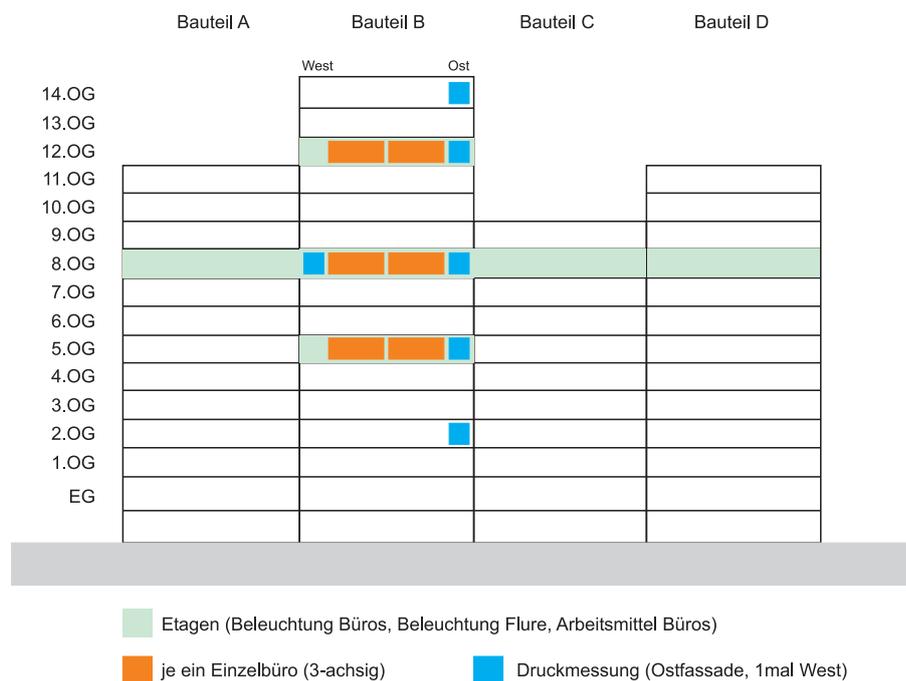


Abbildung 25: Erfasster Kunstlichtstromverbrauch in sechs exemplarischen Etagen, erfasste Raumparameter in sechs beispielhaften Büroräumen und die Lage der Druckmessensoren

3.3.5. Gesamtstromverbrauch und sonstige Stromverbraucher

Der Gesamtstromverbrauch des Gebäudes wird über einen Zähler erfasst. Neben Stromverbrauchswerten für die Beleuchtung und die Lüftung wurden weitere Großverbraucher im Gebäude über fest installierte Zähler erfasst. Die Zahl fest installierter Zähler erhöhte sich aufgrund der Tatsache, dass mobile Strommessungen wegen hoher Sicherheitsanforderungen und damit einhergehenden Isolierungen in den Unterverteilungen nicht möglich waren und deshalb weitere Zähler auch an kleineren Verbrauchern platziert wurden.

Da man bereits bei der Ostarkade festgestellt hatte, dass der Stromverbrauch der Küche nicht unerheblich ist, wurde auch hier im Haupthaus der Stromverbrauch der beiden Küchen erfasst. Bezüglich der Haustechnik wurden vier dezentrale Klimageräte exemplarisch und die Grauwasseranlage sowie Regenwasseraufbereitung messtechnisch erfasst.

3.3.6. Erfassung Raumparameter

In den sechs Drei-Achser-Büros des Bauteils B wurden exemplarisch Sensoren zur Überprüfung des Raumkomforts und der Funktion der Einzelraumregelung installiert. So konnten Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchte, CO₂-Konzentration, Fenster- und Sonnenschutzstellung, Zustand der Nachströmöffnung in der Fassade und der Lüftungsklappe und die Anwesenheit von Personen aufgezeichnet werden (Abbildung 26).

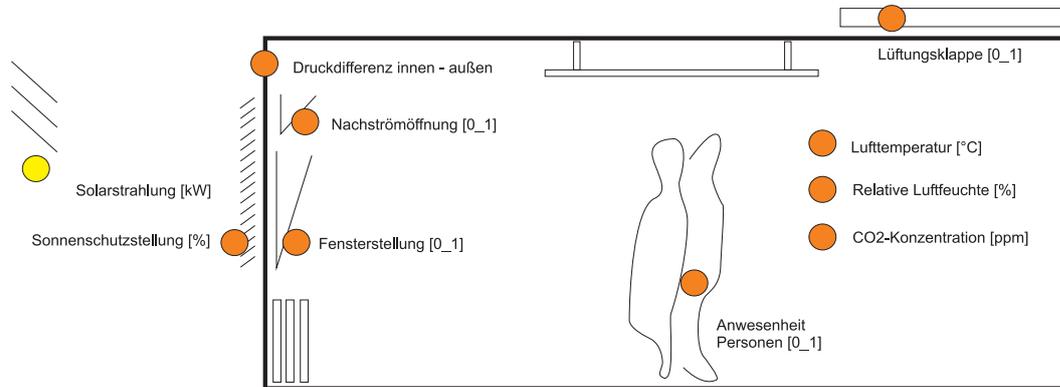


Abbildung 26: Datenpunkte im Büro zur Erfassung der Einzelraumregelung und des Nutzerkomforts

Dabei lagen Informationen über die Fensterstellung, die Sonnenschutzposition, über die beiden Lüftungsöffnungen und die Präsenz von Personen standardmäßig auf dem BUS-System an, da sie wesentlich für die Funktionen der automatischen Einzelraumregelung waren. Im Rahmen des Monitorings mussten diese Datenpunkte lediglich weiter bis zum Erfassungsrechner geleitet werden. Auch die Raumlufttemperatur lag auf dem BUS vor, der Sensor befindet sich jedoch im Bedienelement an der Tür und weist lediglich eine Auflösung von 0,4 K auf. Deshalb wurde je ein weiterer, besser auflösender Temperatursensor im Büro möglichst nahe dem Arbeitsplatz installiert. Dieser zusätzliche Temperatursensor ist ein PT 1000 mit einer Meßgenauigkeit von 0,04 K und wurde an einem analogen Eingangsmodul mit einer Auflösung von 0,01 K angeschlossen. Die Übertragung des Temperaturwertes erfolgt mit einer Genauigkeit von 2 Stellen hinter dem Komma.

Je näher diese Sensoren am Sitzplatz des Nutzers installiert werden können, desto repräsentativer sind die Messergebnisse. Sie konnten jedoch nicht auf dem Tisch positioniert werden, sondern wurden auf Wunsch des Bauherrn auf der Wand hinter dem Nutzer über dem Sideboard in 1,40 m Höhe montiert. Damit nicht die Wärmeabstrahlung des CO₂-Sensors die anderen beiden Sensoren beeinflusst, wurde jeder in einem separaten Gehäuse angeordnet (Abbildung 27).

Abbildung 27: Die Sensoren im Büroraum für Feuchte, Temperatur und CO₂

Messgröße	Messgerät	Messbereich	Messgenauigkeit
Raumtemperatur Bedienelement	PT 100	0-40 °C	+/- 0,1 K
Raumtemperatur Monitoring	PT 1000	0-40 °C	+/- 0,04 K
Rel. Luftfeuchtigkeit	Hygrometer	0-100 %	+/- 2 %
CO ₂ -Konzentration	CO ₂ -Sensor	300-3.500 ppm	+/- 3 %
Druckdifferenz (innen-außen)	Drucksensor	0-200 Pa	+/- 1 Pa
Globalstrahlung horizontal	Pyranometer	0-1.300 W/m ²	+/- 2,5 %
Solarstrahlungsangebot Fassade	Solarzelle geeicht	1-1.000 W/m ²	+/- 2 %
Stromverbrauch	Stromzähler	kumulierend	+/- 0,5 %
Wärmemenge/Kältemenge	Wärmemengenzähler	kumulierend	+/- 0,5 %

Tabelle 13: Die verwendeten Messgeräte und ihre Messgenauigkeit

3.3.7. Erfassung Klimadaten

Die Klimadaten wurden über eine Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes gemessen. Es wurden die Außentemperatur, die relative Luftfeuchte, die Solarstrahlung in Richtung der vier Fassadenorientierungen, die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung aufgezeichnet. Bei der Windrichtung ist 0 die Windrichtung Süd nach Nord, bei der Übertragung des Wertes 270 ist die Windrichtung Ost nach West. Die Globalstrahlung stand über die Wetterstation der benachbarten Ostarkade zur Verfügung. Genauso konnte deren Außenlufttemperatursensor genutzt werden, wenn der auf dem Haupthaus ausfiel. Die Wetterstation ist mit vier senkrecht stehenden, in jede Fassadenrichtung weisenden Sensoren ausgestattet, welche die Solarstrahlung im Bereich von 0 bis 1.000 W/m² erfassen. Für die Bewertung der Beleuchtungsstärke wird die Solarstrahlung mit 110 multipliziert, um die Beleuchtungsstärke in lux zu

erhalten. In der Literatur werden je nach Verteilung des Spektralbereiches 90 bis 130 lx pro W/m² angegeben, so dass dies eine gute Näherung darstellt.

3.3.8. Datenanbindung

Das Gebäude verfügt über eine sehr umfangreiche Gebäudeleittechnik. Diese ist in zwei miteinander kommunizierende Systeme aufgeteilt, die Einzelraum- und Elektroregelung sowie die Regelung der Primäranlagen. Jedes der beiden Systeme verfügt über mehrere OPC-Server [15]. Geschossseitig handelt es sich um ein LON-Bus-System [14], die Sammelleitung wird mit einem Ethernet realisiert, so dass eine ausreichend hohe Bandbreite gegeben ist, die das kontinuierliche Auslesen zahlreicher Datenpunkte (standardmäßig 10 Minuten-Intervalle) ermöglichte.

Die Messdatenerfassung setzt auf dieser Gebäudeleittechnik auf. Alle für das Monitoring zusätzlich erforderlichen Sensoren und Zähler wurden auf den LON-Bus aufgeschaltet und sind über insgesamt neun OPC-Server auslesbar.

Der OPC-Server wurde so programmiert, dass möglichst zum 10-Minuten-Intervall immer die aktuellen Werte aus dem Feld dort vorliegen. Bei den Temperatursensoren in den Büros wurde beispielsweise für die Übertragung eine „MinSendTime“ von 15 Sekunden und eine „MaxSendTime“ von 300 Sekunden eingerichtet. Dies bedeutet: Falls sich der Temperaturwert ändert, wird der Wert alle 15 Sekunden übertragen. Findet keine Änderung statt, wird der Wert spätestens nach 5 Minuten auf dem OPC Server aktualisiert.

Zur Auslesung wurde zunächst der OPC-Client Visual OPCTest von Terravic eingesetzt. Hier trat jedoch das Problem auf, dass bei bestimmten Datenpunkten sich ändernde Werte nicht registriert und aufgezeichnet wurden.

Anfang August 2007 wurde ein neuer OPC-Client (Rensen OPC Office Link) gekauft und seitdem verwendet. Die Erfahrungen mit dieser Software sind bisher als gut zu beurteilen. Die Daten wurden jede Nacht automatisch vom Client in eine Datei exportiert, die dann am fbta in Karlsruhe in eine vereinheitlichte Datenbank eingelesen wurden. Die Datenbankstruktur wurde im Laufe der letzten Jahre weiterentwickelt und so flexibel gestaltet, dass Daten aus beliebigen Monitoring-Projekten darin gespeichert werden können.

Stundenauswertungen waren allerdings insgesamt nur sehr aufwändig möglich, da die Datenerfassung teilweise instabil war und für einige Stunden ausfiel. Ob dies nun auf die Anbindung an den LON-Bus, eine Überlastung des Bus-Systems oder auf die Abfrage-Mechanismen des von uns eingesetzten OPC-Clients zurückzuführen ist, konnte nicht endgültig geklärt werden.

Die Datenauswertung erfolgte über ein eigens entwickeltes Visualisierungswerkzeug, das speziell auf die Bedürfnisse im Bereich des Gebäude-Monitorings und der Betriebsoptimierung zugeschnitten wurde [21]. Außerdem können über dieses Werkzeug die Daten beliebig exportiert werden, um sie mit anderen Werkzeugen (z.B. spezieller Statistik-Software) auszuwerten.

Abbildung 28 zeigt die Struktur der Datenerfassung. Kapitel 5.1 geht genauer auf das entwickelte Visualisierungswerkzeug ein.

3.3.9. Fehlerhaft eingebaute Wärmehähler

Da einige Zähler auch im zweiten Jahr des Monitorings und nach mehrmaliger Prüfung durch die für das Gewerk zuständige Firma immer noch keine Werte anzeigten, wurden alle Zähler durch das fbta geprüft. Dabei wurden vier nicht korrekt montierte Kältemengenzähler entdeckt. Hier hatte die Firma

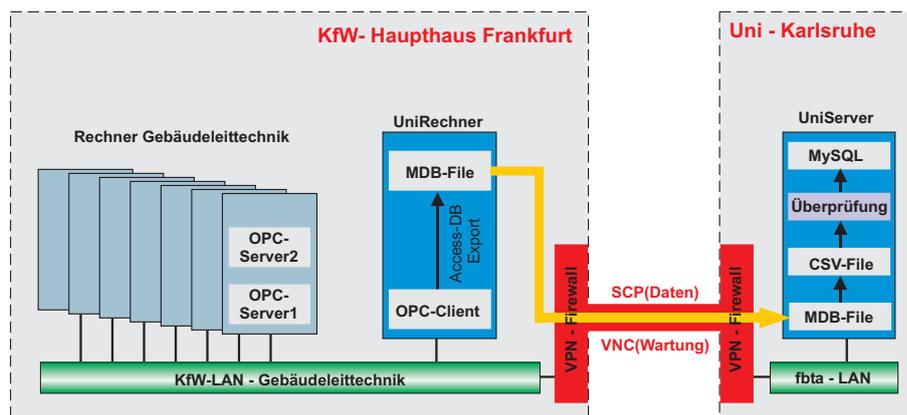


Abbildung 28: Schema der Datenübertragung von den OPC-Servern und -Clients vor Ort über das Internet in Datenbank am fbta in Karlsruhe

keine speziellen Kältemengenzähler, sondern Wärmemengenzähler verwendet. Diese müssen bei der Erfassung von Heizenergie in den Rücklauf eingebaut werden.

Da für die Berechnung der Energie eine feste Formel hinterlegt ist, die davon ausgeht, dass der Wert der Temperatur im Rücklauf kleiner ist als der im Vorlauf, hätte der Wärmemengenzähler für die Kälteerfassung entgegen der Beschreibung im Datenblatt im Vorlauf eingebaut werden müssen. Im festgestellten Zustand war die Rücklauftemperatur höher als die Vorlauftemperatur, was der Wärmemengenzähler auf seinem Display durch die Fehlermeldung „F-3“ anzeigte.

Da die Rechenwerke laut techem nicht umprogrammiert werden konnten, wurde für diese Zähler von der KfW im August 2008 eine Mängelanzeige angemeldet. Im November 2008 wurden die Zähler ausgetauscht.

Abbildung 29 zeigt den nicht korrekt eingebauten Wärmemengenzähler K08 zur Erfassung der Kälteenergie für die Kühlung der Zuluft in der RLT Besprechungsräume.

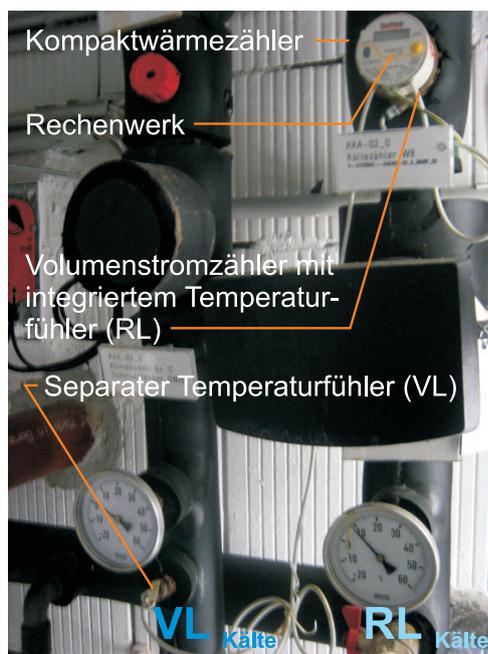


Abbildung 29: Nicht korrekt eingebauter Kompaktwärmezähler am Beispiel des Zählers K08 - Kältemenge RLT Besprechungsräume

3.4. Mobile Messungen

Ergänzend zu den fest installierten Messpunkten, die über die Gebäudeleittechnik regelmäßig aufgezeichnet wurden, führte das fbta verschiedene mobile Messungen im Gebäude durch. Diese betrafen in der Hauptsache Untersuchungen zum Raumklima, zu Schall und Raumakustik, zu Betriebszeiten der Beleuchtung und zum Stromverbrauch von großen und kleinen Stromverbrauchern.

3.4.1. Raumklimaanalysator

Mit Hilfe von Raumklimamessgeräten wurden über kurze Zeiträume das thermische Verhalten des Gebäudes und der daraus resultierende thermische Komfort in ausgewählten Räumen genauer untersucht. Zum Einsatz kam der Raumklimaanalysator der Firma innova (Abbildung 30). Über Sensoren zur Messung der Luftgeschwindigkeit, der Luftfeuchte, der Lufttemperatur, der operativen Temperatur und der Strahlungsasymmetrie können die Behaglichkeits-Indizes PPD und PMV-Wert nach Fanger [2] [3] ermittelt werden.

Das Gerät verfügt über einen internen Speicher, der für Langzeitmessungen genutzt und nach erfolgter Messung per PC ausgelesen wird. Die Daten können in Textdateien exportiert und dann weiterverarbeitet werden. Ergebnisse finden sich in Kapitel 4.8.1.



Abbildung 30: Der Raumklimaanalysator für temporäre Messungen des Nutzerkomforts

3.4.2. Nachhallzeit- und Schallpegelmessgerät

Die Schallmessungen wurden mit dem Schallmessgerät KS-610 der Firma Klimatherm durchgeführt. Mit diesem kann der Schalldruckpegel nach bestimmten Frequenzbewertungen kontinuierlich aufgezeichnet oder als Mittelwert erfasst werden. Außerdem kann die Nachhallzeit bestimmt werden. Das Gerät verfügt

nur über einen kleinen Hauptspeicher, in dem Messdaten gespeichert werden können. Das Gerät lässt sich aber über eine RS-232 Digital-Schnittstelle mit dem Computer verbinden und mittels der mitgelieferten Software auslesen. Die exportierten Textdateien können leicht mit dem Computer weiterverarbeitet werden (Abbildung 31).

3.4.3. Netzanalysegerät

Für mobile Messungen der Leistungsaufnahme bzw. des Stromverbrauchs standen uns mit den C.A.8332 von Chauvin Arnoux zwei hochwertige Netzanalysegeräte zur Verfügung (Abbildung 31). Das Gerät kann Phasenspannungen bis 480 V und Stromstärken bis 3000 A messen und verfügt über einen großen Speicher. Messdaten können in Intervallen von 1 Sekunde bis 15 Minuten aufgezeichnet und über eine Software auf den Computer überspielt werden. Somit kann das Gerät über mehrere Wochen Daten aufzeichnen, sofern es über das Netzteil versorgt wird. Mit diesem Gerät wurden die Zuordnungen bestimmter Stromzähler überprüft.

3.4.4. Luxmeter

Für die Messungen der Tageslichtquotienten sowie der Beleuchtungsstärken in den Fluren und an den Arbeitsplätzen kamen Präzisions-Digitalluxmeter der Firma mx electronic zum Einsatz. Die Geräte entsprechen der Klasse B nach DIN 5032, Teil 7 [9]. Bei Messungen über einen längeren Zeitraum wurden die Daten über einen 8-Kanal-Datenlogger der Firma ahlborn aufgezeichnet.

3.4.5. Mobile Datenlogger

Für zusätzliche Aufzeichnungen der Raumtemperatur kamen „HoBo“-Datenlogger der Firma Onset Computer zum Einsatz. Da sie neben Temperatur und relativer Luftfeuchte auch die Beleuchtungsstärke aufzeichnen können, wurden sie in diesem Projekt außerdem dazu eingesetzt, die Betriebszeiten bestimmter Beleuchtungen zu ermitteln. Die Logger (Abbildung 31) sind mit Maßen von 6 x 4 x 1.5 cm äußerst klein und können zuverlässig mit Klebestreifen am Einsatzort befestigt werden.

Der Datenlogger wird mit einer Knopfzelle betrieben und hat einen Speicher von 8 kByte, mit dem z.B. ein Kanal im 3-Minuten-Rhythmus über 16 Tage aufgezeichnet werden kann (ca. 8.000 Werte). Mit der entsprechenden Software und einem Datenkabel können die Logger ausgelesen werden. Die Software ermöglicht einen Export direkt ins Excel-Format.



Abbildung 31: Das Schallmessgerät KS-610 (links) wird über die serielle Schnittstelle mit einem Laptop verbunden und ausgelesen. Der „HoBo“-Datenlogger (mitte) mit 4 Messkriterien und seinen kleinen Abmessungen ist äußerst vielseitig einsetzbar. Das Netzanalysegerät C.A.8332 der Firma Chauvin Arnoux (rechts)

3.4.6. Steckdosenmessgeräte

Neben den Messungen bestimmter Stromkreise über fest installierte und an die GLT angebundene Stromzähler wurden verschiedenste elektrische Verbraucher (Arbeitsmittel) auch über einfache Steckdosenmessgeräte aufgezeichnet (Abbildung 32). Verwendet wurde hier das Produkt Energy Check 3000 von Voltcraft, das neben der Wirkleistung in W und der Arbeit in kWh außerdem die maximale und minimale Leistung sowie die Aufzeichnungsdauer anzeigt. Die ausreichende Genauigkeit dieser einfachen Geräte wurde mit den hochwertigen Leistungsmessgeräten bestätigt.



Abbildung 32: Steckdosenmessgerät EnergyCheck 3000

Für Lastprofilanalysen von steckdosengebundenen Stromverbrauchern wurde in diesem Projekt erstmals das Steckdosenmessgerät EM 1000-EM von ELV eingesetzt. Dieses ermittelt den Verbrauch alle 5 Minuten und sendet den erfassten Wert per Funk zu einem Datenlogger. Dieser ist batteriebetrieben, deshalb netzunabhängig und kann Daten von bis zu 10 Messgeräten empfangen. Dazu gehören auch spezielle Hutschienenzähler, die allerdings hier nicht zum Einsatz kamen. Über die USB-Schnittstelle und eine mitgelieferte Software wird der Datenlogger am PC ausgelesen.

3.4.7. Infrarotkameras

Für die Thermografieaufnahmen kamen zwei verschiedene Infrarotkameras des Herstellers FLIR zum Einsatz. Das deutlich komfortablere Modell der P-Serie zeichnet sich durch eine höhere Auflösung (640x480 Pixel) und Autofokus aus. Beim kleineren Modell ThermaCAM E45 sind die Photos nur 320 mal 240 Pixel groß und das Bild muss per Kontrolle auf dem kleinen Bildschirm manuell scharf gestellt werden. Ergebnisse der Thermografieuntersuchungen sind in Kapitel 4.2.1 nachzulesen.

4. Ergebnisse des Monitorings

4.1. Energiebilanzen

Sowohl bei der Antragstellung zum Förderprogramm, im Planungsverlauf als auch bei der Bewertung der im Monitoring gemessenen Werte spielen Primärenergiekennwerte eine wichtige Rolle. Das ist sinnvoll, da sie sehr gut den tatsächlichen Ressourcenverbrauch am Anfang der Prozesskette der Energieumwandlung darstellen. Allerdings sollte die Energieeffizienz entlang dieser gesamten Kette von Bedeutung sein, weshalb im Förderprogramm auch zusätzliche Bedingungen an den Endenergiebedarf gestellt wurden. So werden in diesem Bericht außerdem Endenergie und - wo möglich - Nutzenergie in die Betrachtung miteinbezogen.

Im Rahmen der Baugenehmigung wurde für das Gebäude ein Wärmeschutznachweis und Energiebedarfsausweis nach der damals gültigen EnEV 2002 erstellt. Aus diesem ENEV-Nachweis liegen die Energiekennzahlen für den Wärmebedarf und Bauteilwerte vor. Im gesamten Planungsprozess wurde aber bereits über den Wärmebedarf hinausgehend die Gesamtenergiebilanz inklusive Lüften, Kühlen und Beleuchten betrachtet und optimiert. Diese wurde in Anlehnung an die SolarBau-Systematik (und damit auch an die mittlerweile gültige DIN V 18599 [11]) errechnet und für verschiedene Planungsstände nachgeführt.

Aus den Arbeiten der EnOB-Begleitforschung und durch die von der KfW beauftragte Erstellung eines Energieausweises nach EnEV 2007 liegen außerdem zwei Berechnungen nach DIN 18599 vor.

4.1.1. Bedarf nach EnEV 2002

Aus dem EnEV-Nachweis vom 20.11.2002 gehen folgende Angaben hervor:

V_e	beheiztes Gebäudevolumen	98.655,55 m ³
A	Summe der Hüllflächen	18.803,21 m ²
A/V_e	Verhältnis A/V_e	0,19 m ⁻¹
QP'	Primärenergiebedarf (Heizen+WW)	6,57 kWh/m ³ a
HT'	Spez. Transmissionswärmebedarf	0,59 W/m ² K
A_N	Nutzfläche	in EnEV 02 nicht ermittelt, da Bürogebäude

Tabelle 14: Kennzahlen gemäß EnEV-Nachweis vom 20.11.2002

Bei der Berechnung wurde von einem Anteil der BHKW von 80 % und der Brennwärtekessel von 20 % an der Wärmebereitstellung ausgegangen. Die Anlagenaufwandszahl p_e wurde zu 0,7 ermittelt. Der absolute Heizwärmebedarf Q_H wurde zu 926 MWh/a, der Primärenergiebedarf zu 648,2 MWh/a errechnet. Bezieht man diese nachträglich auf die in diesem Bericht verwendete Energiebezugsfläche von 21.875 m², ergibt sich ein spezifischer Heizwärmebedarf von 42,3 kWh/m²a, primärenergetisch sind das 29,6 kWh/m²a.

Die U-Werte der einzelnen Bauteile sind in Tabelle 15 aufgelistet.

4.1.2. Bedarf nach Systematik der Energieplaner

Die Energieplaner errechneten zur kontinuierlichen Bewertung des Energiekonzeptes den Primärenergiebedarf für die Bereiche Heizung/Warmwasser, Lüftung/Klimatisierung, Beleuchtung und diverse Technik

Fassade massiv WDVS	0,27 W/m ² K
Leichtfassade	0,28 W/m ² K
Außenwand massiv Untergeschoss	0,437 W/m ² K
Schaumglasdach	0,21 W/m ² K
Leichtdach	0,21 W/m ² K
Bodenplatte	0,72 W/m ² K
Wände gg. Erdreich	0,57 W/m ² K
Fenster (U-Wert)	1,40 W/m ² K

Tabelle 15: U-Werte der einzelnen Bauteile nach der Sanierung gemäß EnEV 2002

und führten diesen permanent nach entsprechend der Änderungen, die sich an der technischen Ausstattung während des fortschreitenden Planungsverlaufes ergaben. Später wurde in der Betrachtung der Bereich „Lüftung/Klimatisierung“ in „Lüftung“ und „Kühlung“ unterteilt und auch „Heizung“ und „Warmwasser“ wurden getrennt dargestellt. Diese Berechnung basierte auf einer eigens entwickelten, mit dynamischer Gebäudesimulation und Lichtsimulation gekoppelten Methodik, die jedoch der Herangehensweise der DIN V 18599 ähnlich ist.

Basierend auf der anfänglichen Vorplanung hatte der erste errechnete Primärenergiekennwert bei 98 kWh/m²a (83 kWh/m²a Endenergie) gelegen. Im Dezember 2002 wurde dieser auf 109 korrigiert, zur Zeit des Projektantrags lag die Prognose bei 117 kWh/m²a. Gegenüber dem Verbrauch im Bestand hätte dies eine Reduktion um 52 % bedeutet (Abbildung 33), der zu erreichende Wert sollte gemäß Förderkriterien mindestens 50 % unter dem des Bestandsgebäudes und damit bei maximal 122,5 kWh/m²a liegen.

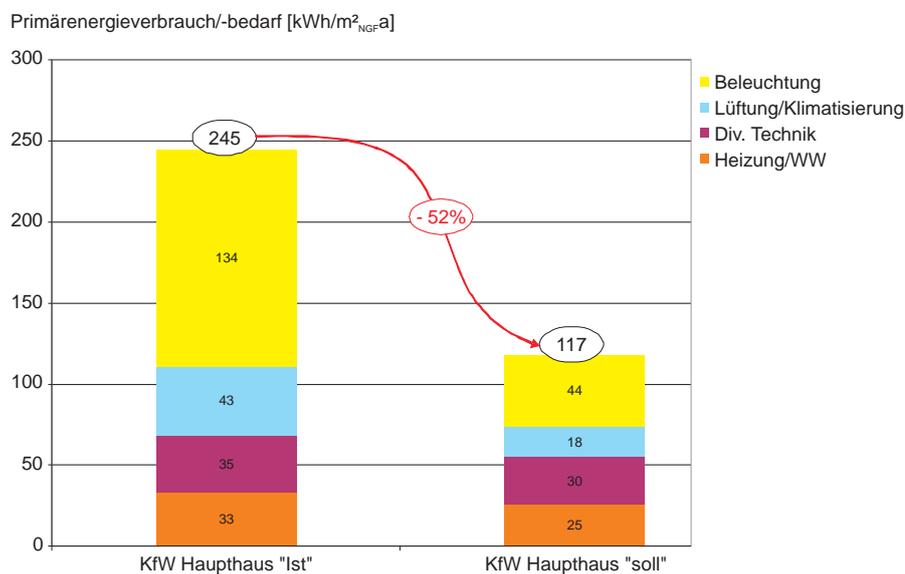


Abbildung 33: Primärenergiekennzahlen vor und nach der Sanierung, Stand aus Projektantrag

In Abbildung 34 ist die Nachführung der primärenergetischen Zielwerte für spätere Planungszeitpunkte dargestellt. Die Zahlen vom März 2003 entsprechen jenen im Förderantrag. Die letzte Prognose hatte im August 2006 bei 153 kWh/m²a gelegen. Zur jeweiligen Veränderung der Zahlen haben einerseits Veränderungen in der Planung, andererseits die immer genauere Kenntnis von Parametern mit zunehmendem Planungsfortschritt geführt. Die Änderungen in den einzelnen Gewerken ergaben sich wie folgt:

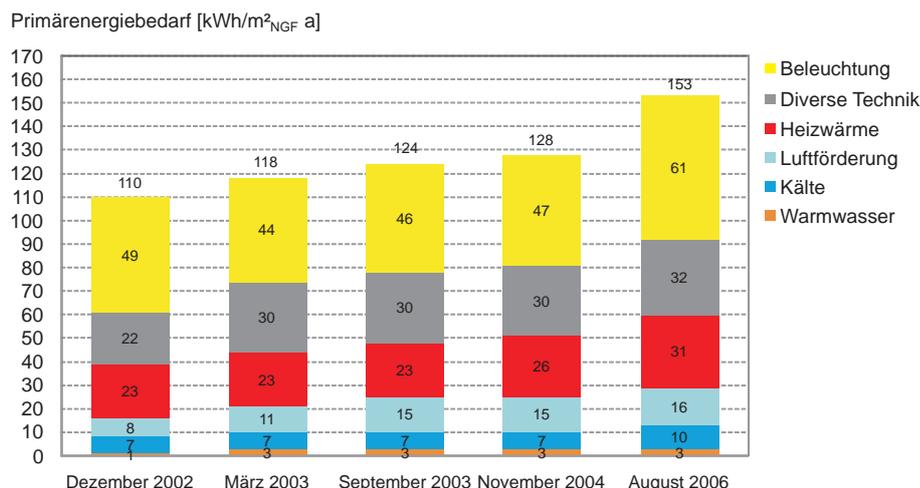


Abbildung 34: Die Nachführung der Primärenergiebilanz im fortschreitenden Planungsverlauf, Quelle: ip5

- **Heizen:** Zum Anstieg bei der Heizwärme vom September 2003 auf November 2004 führte die Anpassung der Heizsolltemperatur im Raum um zwei Kelvin auf 22 °C. Das Monitoring der Ostarkade im Rahmen von SolarBau hatte gezeigt, dass die in üblichen Berechnungsansätzen verwendeten Werten von 19 oder 20 °C als nicht realistisch einzuordnen sind. Das belegen auch Erfahrungen in weiteren EnOB-Demogebäuden.

In der Berechnung von 2006 lag der ermittelte Heizwärmebedarf nochmals höher. Ursache hierfür war eine auf Basis der Luftdichtigkeitsmessung vom Frühjahr 2006 vorgenommene Erhöhung der rechnerisch angesetzten Infiltrationsrate. Die Messung hatte eine größere Gesamtleckagerate gezeigt als erhofft. Neben einigen Leckagen in der Fassade, die möglicherweise in der weiteren Ausführung noch besser geschlossen werden konnten (ein erneuter Nachweis erfolgte nicht), fällt hier die Aufzugsschachtentlüftung mit einem Anteil von ca. 12 % am gemessenen Luftwechsel negativ auf (siehe hierzu auch Kapitel 4.2.1). Mögliche technische Lösungen für dieses Problem teilten die Energieplaner den beteiligten Fachplanern mit.

- **Warmwasser:** Die Warmwasserbereitung erfolgt gemäß Beschluss des Bauherrn dezentral mit elektrischen Durchlauferhitzern. Daraus ergab sich aufgrund des ungünstigeren Primärenergiefaktors eine deutliche Erhöhung des zugeordneten spezifischen Primärenergiebedarfs, der jedoch mit ca. 3 kWh/(m² NGF a) insgesamt nach wie vor eine untergeordnete Rolle spielte (Dezember 2002: 1 kWh/(m²a)).
- **Luftförderung:** Für die großen Lüftungsanlagen lagen für die Prognose im März 2003 mittlerweile Druckverlustberechnungen des Rohrnetzes und aktualisierte Luftmengen vor. Für interne Druckverluste und Ventilatorwirkungsgrade dieser Anlagen wurden in Absprache mit dem Fachplaner Schätzwerte angesetzt. Noch nicht genauer spezifizierte Anlagen wurden mittels eines einfachen Kennwertverfahrens erfasst (Volumetrischer Kennwert 0,60 Wh/m³ für Zu-/Abluftanlagen sowie 0,25 Wh/m³ für reine Abluftanlagen, jeweils zusätzlich mit einem Sicherheitszuschlag von 30 % für die teilweise beengte bauliche Situation). Die angesetzten Gleichzeitigkeitsfaktoren wurden später mit dem Bauherrn und den Fachplanern abgeglichen. Insgesamt ergab sich für diesen Sektor gegenüber Dezember 2002 ein um ca. 3 kWh/(m² NGF a) erhöhter spezifischer Primärenergiebedarf (gestiegen von 8 auf 11 kWh/m²a). Am 3.1.2005 wurden für die Lüftungsanlagen nochmals

genauere Prognosen des Primärenergiebedarfs durchgeführt. Die einzelnen Annahmen für die Anlagen sind in Tabelle 46 im Anhang aufgeführt. Insgesamt ergab sich so ein Jahresstrombedarf von ca. 120 MWh, bezogen auf die Energiebezugsfläche von 21.875 m² ein Wert von 5,47 kWh/m²a. Primärenergetisch bedeutete das einen Wert von 14,77 (mit Faktor 2,7) bzw. 16,41 kWh/m²a (mit Faktor 3,0).

- **Kühlen:** Eine Steigerung vom Jahr 2004 auf das Jahr 2006 um 2,5 kWh/m²a wurde durch zusätzliche Umluft- und Klimaschranke in verschiedenen Bereichen des Gebäudes verursacht.
- **Beleuchten:** Beim Kunstlicht führten detaillierte Angaben durch die Fachplaner im März 2003 zunächst zu einer Reduktion bei der Abschätzung des Bedarfs. Die Planung zusätzlicher Leuchten in den Fluren (Kunstbeleuchtung) sowie geringfügige Steigerungen der installierten Leistung im Foyer und der Halle führten im weiteren Verlauf jedoch wieder zum Anstieg des Energiebedarfs in diesem Sektor. Somit lag die Prognose im November 2004 bei 47,4 kWh/m²a.

Der Primärenergiebedarf des Kunstlichts war im weiteren Verlauf nochmals gestiegen auf rund 60,7 kWh/m²a mit Stand September 2006. Alleine der Einsatz von 780 HIT 20-Watt-Lampen zur Anstrahlung der aluminiumverkleideten Fahrstuhlkerne führte zu einer Erhöhung des Primärenergiebedarfs für Kunstlicht um ca. 8 kWh/m²a. Einen vergleichsweise großen Anteil hatte auch die Halogenbeleuchtung in der Halle. Eine weitere Mehrung um 3 kWh/m²a fiel im Vorstandsbereich und im erweiterten Speisebereich im 9. OG an. Mit ca. 1,6 kWh/m²a schlugen die beiden Logos an der Glaskrone der KfW trotz des Einsatzes energieeffizienter Leuchtmittel (Entladungslampen und LED-Technologie) zu Buche.

- **Diverse Technik:** Der Abschätzung vom Dezember 2002 lag eine Studie des IWU (Institut für Wohnen und Umwelt) zugrunde, die diesen Anteil mit 22 kWh/(m²_{NGFA}) ansetzt. In dieser Summe ist der Energiebedarf für Aufzugsanlagen mit 6,4 kWh/(m² NGF a) angesetzt. Die Abschätzung der Firma Hundt & Partner Ingenieurgesellschaft mbH für die geplante Aufzugsanlage lag 2004 jedoch bei ca. 14 kWh/(m²_{NGFA}), so dass der Wert für den Sektor „Diverse Technik“ um die daraus resultierende Differenz angehoben wurde (30 kWh/m²a im November 2004).

Die detaillierte Nachführung im Bereich der Gebäudeautomation ergab durch die konkrete Berücksichtigung von 7 PCs (4 PCs für 8 OPC Server, 1 PC für die Primäranlage, 1 PC als Messrechner der Uni Karlsruhe und 1 PC für das Jahresverschattungsdiagramm), 5 Switches, 1 Router und dem zusätzlichen Strombedarf der nachgerüsteten Umluftgeräte in der Technikzentrale eine weitere Zunahme von ca. 2,5 kWh/(m²a) ergeben.

Die ermittelten Kennzahlen aus dem Monitoring sollen einerseits mit denen aus der Antragsphase (Tabelle 16), andererseits mit dem letzten Stand von 2006 (Tabelle 17) verglichen werden. Da sowohl Wärme als auch Kälte nicht von einer einzigen Anlage erzeugt werden, sondern in einem Kraft-Wärme-Kälte-Verbund, sind die anzusetzenden Primärenergiefaktoren nicht als statisch anzusehen, sondern ändern sich dynamisch, abhängig davon, welche Erzeuger welchen Anteil im entsprechenden Zeitraum an der jeweiligen Erzeugung haben.

Für die Prognose des Primärenergiebedarfs wurden durch die Energieplaner die neuen mittleren Primärenergiefaktoren vorausgesagt (Tabelle 18). Die Faktoren enthalten die Stromgutschrift für BHKW bzw. den Einsatz der Abwärme zur Kälteerzeugung. Die Berechnung wurde allerdings mit dem Faktor für Strom von 3,0 (damalige Systematik SolarBau) durchgeführt. Heute wird in EnOB gemäß DIN V 18599 nur mit dem nicht erneuerbaren Anteil, also 2,7 gerechnet.

Heizwärme	23 kWh/m ² a
Warmwasser	3 kWh/m ² a
Luftförderung	11 kWh/m ² a
Kälte	7 kWh/m ² a
Kunstlicht	44 kWh/m ² a
Diverse Technik	30 kWh/m ² a
Gesamt	117 kWh/m ² a

Tabelle 16: Prognose des Primärenergiebedarfs vom März 2003

Heizwärme	31 kWh/m ² a
Warmwasser	3 kWh/m ² a
Luftförderung	16 kWh/m ² a
Kälte	10 kWh/m ² a
Kunstlicht	61 kWh/m ² a
Diverse Technik	32 kWh/m ² a
Gesamt	153 kWh/m ² a

Tabelle 17: Prognose des Primärenergiebedarfs vom August 2006

	vor der Sanierung	nach der Sanierung (konservativ)	nach der Sanierung (optimistisch)
Wärme	0,50	0,52	0,07
Kälte	0,50	0,50	0,30

Tabelle 18: Primärenergiekennzahlen für die kombinierte Energieerzeugung aus dem Kraft-Wärme-Kälte-Verbund vor der Sanierung und danach, gemäß ip5 vom 14.9.2006

4.1.3. Berechnungen nach DIN V 18599

Für das Gebäude wurden zwei Berechnungen nach DIN V 18599 vorgenommen. Die erste erfolgte im Jahr 2006 im Rahmen der EnOB-Begleitforschung mit angepassten Nutzerprofilen, um die Nutzung des Gebäudes möglichst realistisch abzubilden. Die Berechnung wurde mit dem IBP-Kernel in der ersten Version des vom IBP bereitgestellten Excel-Tools durchgeführt (Abbildung 35). Die Werte des geplanten Gebäudes und des Referenzgebäudes nach Norm werden um die Darstellung eines theoretischen Altbaus ergänzt. Dieses wurde mit Flächen und Zonen nach der Sanierung (also inklusive Aufstockung und Küche) sowie mit den Außenbauteilen und der Gebäudetechnik vor der Sanierung versehen, um für die Bewertung der Sanierungsmaßnahmen einen besseren Vergleichswert zu haben.

Die zweite Berechnung wurde von der Ingenieurpartnerschaft ip5 im Auftrag der KfW zur Erstellung des Energieausweises im November 2007 mit den vorgesehenen standardisierten Nutzungsprofilen durchgeführt. Dieser Energieausweis ist am Eingang des Gebäudes öffentlich ausgestellt und in Abbildung 36 dargestellt.

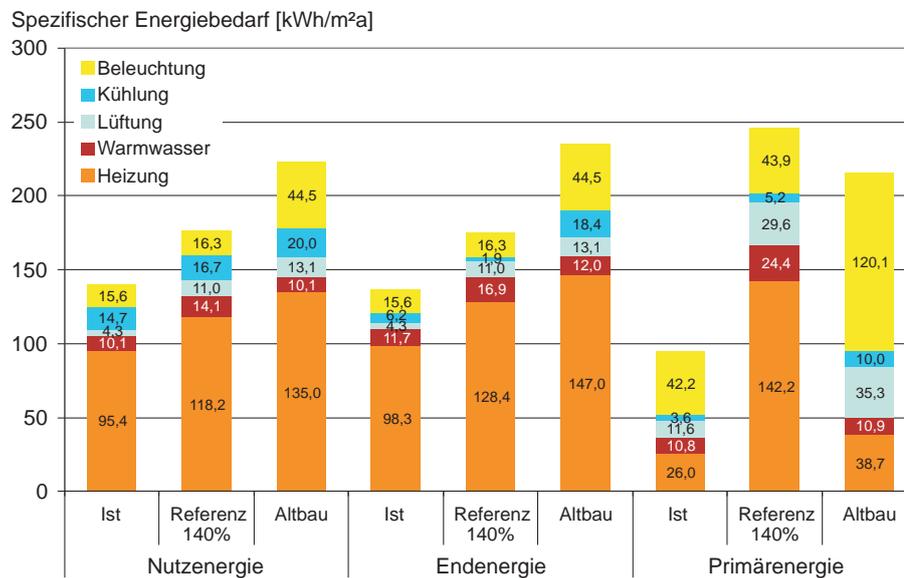


Abbildung 35: Berechnung nach DIN V 18599 des Gebäudes nach dem damals aktuellen Planungsstand („Ist“), des Referenzgebäudes als Neubau mit Zuschlag von 40 % für die Bestandssanierung („Referenz 140 %“) und des Bestandsgebäudes vor der Sanierungsmaßnahme jedoch mit Aufstockung des Bauteils D und Nutzungsänderung durch die Sanierung („Altbau“)

Die Zonierung ist in beiden Berechnungen gleich. Das Regelgeschoss ist geprägt von den zur West- und Ostfassade liegenden Büros, der zweizügigen Erschließung und den innenliegenden Erschließungs- oder Sanitärkernen (Abbildung 37). Im Erdgeschoss ist der Regel-Grundriss um das Eingangsfoyer und die Halle erweitert (Abbildung 38). Im 9. Obergeschoss ist die Küche mit den Speiseräumen untergebracht, so dass die Zonierung hier ebenfalls leicht vom Regelgeschoss abweicht (Abbildung 39).

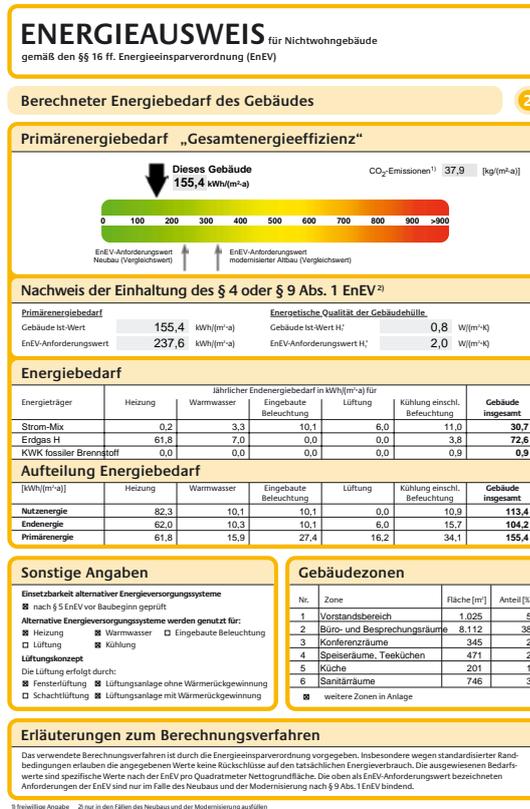


Abbildung 36: Energieausweis nach DIN V 18599, November 2007

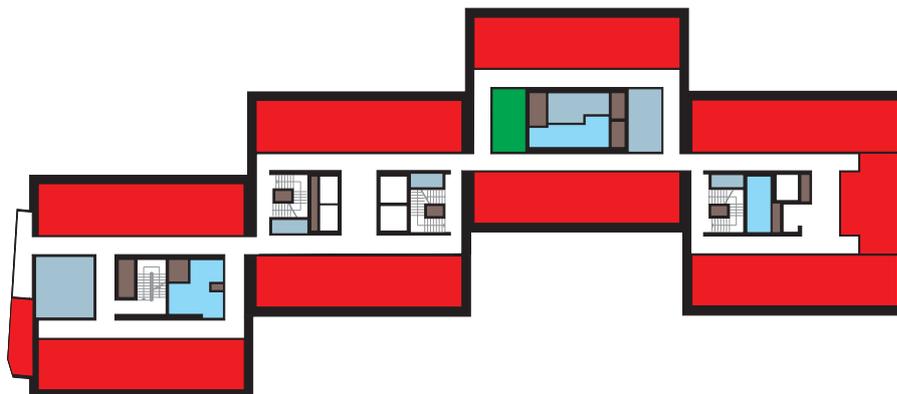


Abbildung 37: Zoneneinteilung nach DIN V 18599 der Geschosse 2, 4 und 5

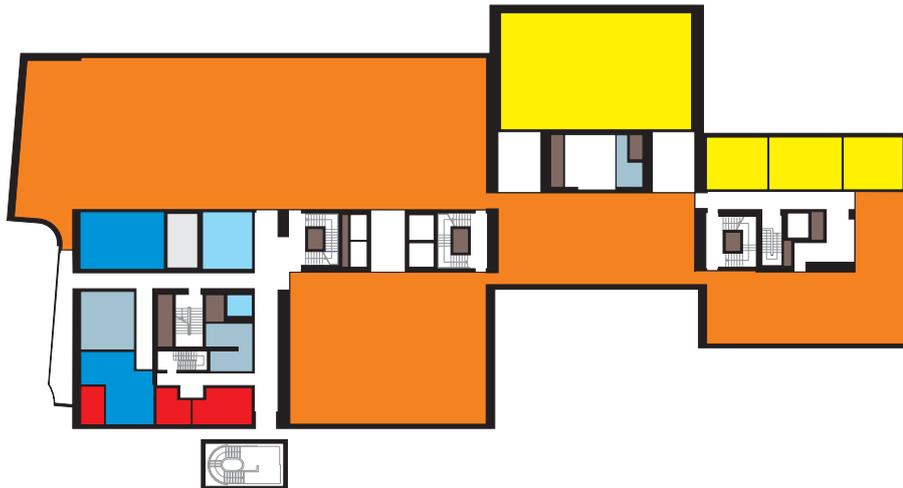


Abbildung 38: Zoneneinteilung nach DIN V 18599 im Erdgeschoss

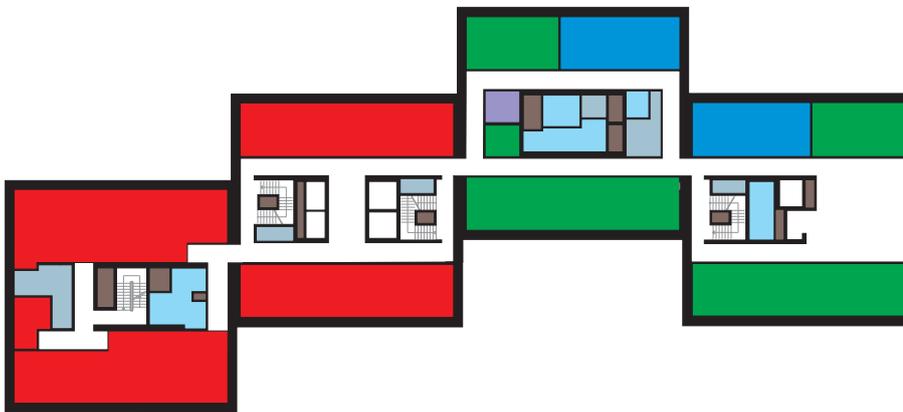


Abbildung 39: Zoneneinteilung nach DIN V 18599 im 9. Obergeschoss

- 02 - Büro
- 01 - Vorstand
- 04 - Konferenz, Sitzung
- 19 - Erschließung
- 19 - Halle EG
- 18 - Nebenräume
- 21 - Serverräume
- 16 - Sanitär
- 14 - Küche
- 12 - Speiseraum, Teeküche
- 20 - Technik UG / Lager, unbeheizt
- Technischächte

Abbildung 40: Legende der Zoneneinteilung nach DIN V 18599

Die Primärenergiebedarfsberechnung der Energieplaner (vgl. Kapitel 4.1.2) weicht in einigen Punkten von der Systematik der Berechnung nach DIN V 18599 ab. Diese werden im Folgenden erläutert:

- Nach der Systematik der Planer werden die Aufzugsschächte separat ohne Kunstlicht betrachtet, in der Berechnung nach DIN V 18599 wurden sie zur Erschließungszone hinzugerechnet. Im Gegensatz zur Berechnung nach DIN wurden für das Vorstandsbüro und die zugehörigen Sekretariate unterschiedliche Nutzungszeiten angesetzt. Außerdem setzen die Planer für Lobby und Erschließung der Vorstandsbereiche höhere installierte Leistungen an als in den normalen Erschließungen. In der Musterrechnung wurde nur eine Erschließungszone berücksichtigt.
- Für die Besprechungsräume im Erdgeschoss (neben dem großen Sitzungssaal gibt es noch drei kleinere Räume) und weitere auf den einzelnen Etagen wurde bei den Planern ein gesondertes Profil verwendet. In der Berechnung nach DIN wurden die drei im EG zum großen Sitzungssaal hinzugerechnet und die auf den Etagen als normale Büroräume betrachtet. Insgesamt machen diese Besprechungsräume ca. 10 Prozent der Gesamtbürofläche aus.
- Bei den Energieplanern wurden die Teeküchen separat von den Speiseräumen betrachtet. In der Berechnung nach DIN 18599 wurden Teeküchen und Speiseräume gemeinsam als Nutzungszone 12 betrachtet.

Abbildung 41 zeigt die für den Energieausweis ermittelten Werte als Nutz-, End- und Primärenergie.

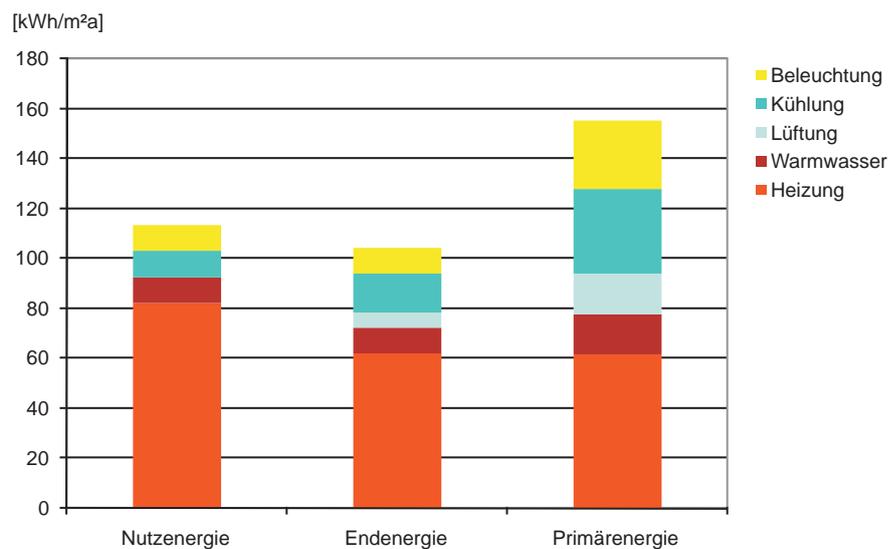


Abbildung 41: Kennzahlen nach Energieausweis von 2007 gemäß DIN V 18599 mit standardisierten Nutzungsprofilen

4.1.4. Vergleich von Messung mit Berechnungen

Ein wesentlicher Aspekt der wissenschaftlichen Begleitung war die messtechnische Ermittlung der Energiebilanzen. Abbildung 42 zeigt die erzielten Werte in den verschiedenen Gewerken gemäß DIN V 18599 für die Jahre 2007 und 2008 auf. Dabei wird in Nutz-, End- und Primärenergie unterschieden.

Der ermittelte Stromverbrauch (Primärenergie) für die Beleuchtung liegt zwar über dem errechneten Wert aus dem Energieausweis, aber mit dem nach DIN V 18599 ermittelten Wert mit angepasstem Nutzerprofil sowie mit der Prognose aus dem Förderantrag stimmt er sehr gut überein.

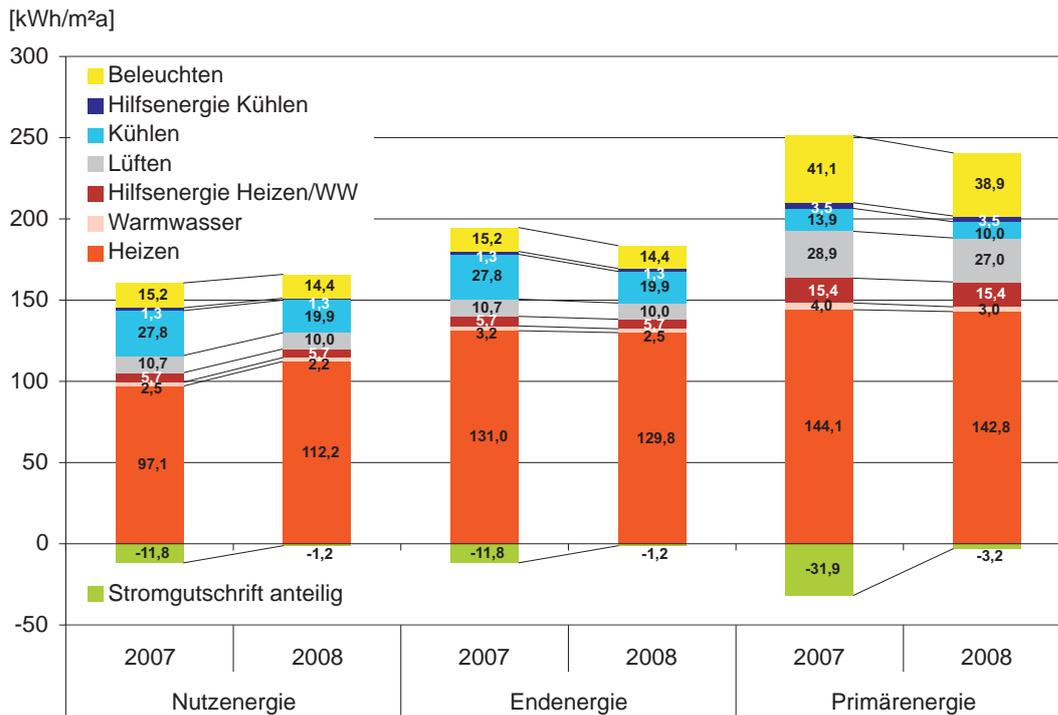


Abbildung 42: Kennzahlen für die Jahre 2007 und 2008 auf Basis der gemessenen Verbrauchswerte

Die Heizwärme auf der Seite der Nutzenergie hat bei allen Berechnungsverfahren und auch beim gemessenen Verbrauch den größten Anteil. Die Bedarfsberechnungen nach der Norm liegen im Bereich der gemessenen Werte, jedoch ist die Endenergie beim gemessenen Verbrauch höher. In Realität ist der Nutzungsgrad der Wärmeerzeugung also ungünstiger als in der Norm angenommen. Gegenüber den Bedarfsberechnungen der Energieplaner und somit auch den Werten aus dem Förderantrag liegt der Heizwärmeverbrauch in allen Bereichen drastisch höher. Gründe dafür werden in Kapitel 4.2 beschrieben.

Der gemessene Kälteverbrauch auf der Seite der Nutzenergie ist von 2007 auf 2008 um fast 30 Prozent gesenkt worden. Primärenergetisch beträgt der spezifische Kennwert für Kälte und Hilfsenergie Kühlen im Jahr 2008 zusammen 13,5 kWh/m²a. Damit liegt er ca. ein Drittel über dem Zielwert, den berechneten Wert aus dem Energieausweis unterschreitet er, während er den mit angepassten Nutzerprofilen berechneten Wert überschreitet.

Die drei Bedarfsberechnungen für den Energiebedarf der Luftförderung liegen nah beieinander, der ermittelte Verbrauchswert liegt jedoch um ca. 50 Prozent darüber.

Auffällig ist bei den Bedarfsberechnungen, dass sich von der Endenergie zur Primärenergie beim Heizen die Werte deutlich verringern, da der Primärenergiefaktor deutlich unter 1 liegen sollte. Das dies bei den ermittelten Verbrauchswerten nicht eintritt, liegt an den real festgestellten Primärenergiefaktoren. Im Jahr 2007 war der Anteil der BHKW an der Wärmeerzeugung aufgrund eines technischen Defekts sehr gering und damit auch die Primärenergiegutschrift für den eingespeisten Strom. Seit März 2008 bis zum Ende der Projektlaufzeit standen die BHKW wegen Umbaumaßnahmen und nicht verfügbarer Ersatzteile still, so dass bisher nicht von einem Regelbetrieb ausgegangen werden kann. Ähnlich verhält es sich bei der Kälteerzeugung, da zwei von vier Absorptionskältemaschinen stillstehen. Da keine Werte von den betriebenen Absorptionskältemaschinen verfügbar waren, konnte der Primärenergiefaktor nicht genau ermittelt werden und wurde mit dem Wert aus dem Bestand festgesetzt.

Rechnet man die im Jahr 2007 ermittelten Verbrauchswerte anhand der prognostizierten Primärenergie-

faktoren um, stellt sich die Primärenergiebilanz bereits besser dar (Abbildung 43). Dabei wurden die etwas vorsichtigeren Berechnungen von 2003 und die optimistischeren Prognosen von 2004 verwendet. Abbildung 44 stellt die ermittelte Jahresprimärenergiebilanz des Jahres 2007 den verschiedenen Bedarfsberechnungen gegenüber.

Gründe für Überschreitungen der Ziel-Kennwerte sowie Optimierungsmaßnahmen und erreichte Einsparungen werden in den folgenden Kapiteln ausführlich beschrieben.

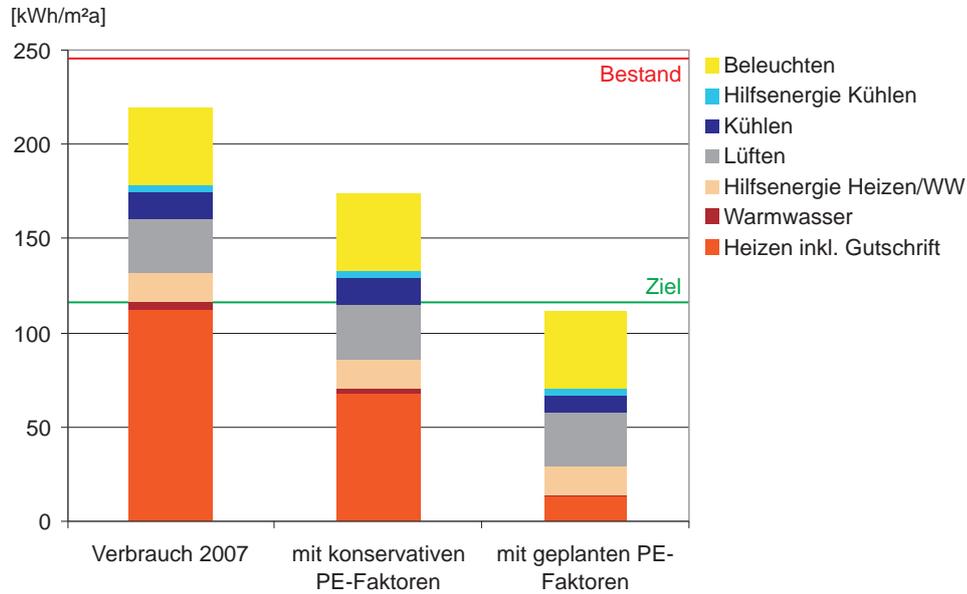


Abbildung 43: Vergleich der Bilanzen bei unterschiedlichen Primärenergiefaktoren

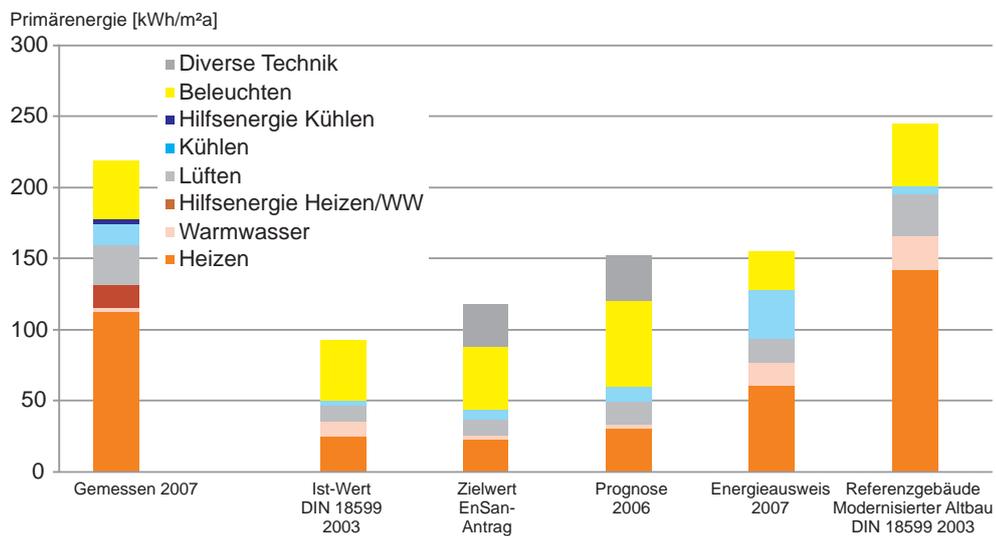


Abbildung 44: Vergleich des spezifischen Jahresprimärenergieverbrauchs im Jahr 2007 mit den verschiedenen berechneten Bedarfswerten

4.2. Heizen

Die gesamte in der Wärmezentrale des Haupthauses erzeugte Wärmemenge wird über einen Wärmemengenzähler erfasst, dahinter teilt sich die Verteilung in einen Strang für das Haupthaus und einen weiteren für die Nordarkade auf. Abbildung 45 stellt die monatlich in der Wärmezentrale erzeugten Wärmemengen sowie die Aufteilung auf die beiden Gebäude dar. Sowohl die gesamte Wärmemenge als auch der Verbrauch des Haupthauses unterliegen deutlich jahreszeitlichen Schwankungen. Der Verbrauch in der Nordarkade schwankt weniger, was auf die Verwendung der Wärme zum Betrieb der sich dort in der Technikzentrale befindenden Absorptionskältemaschinen zurückzuführen ist.

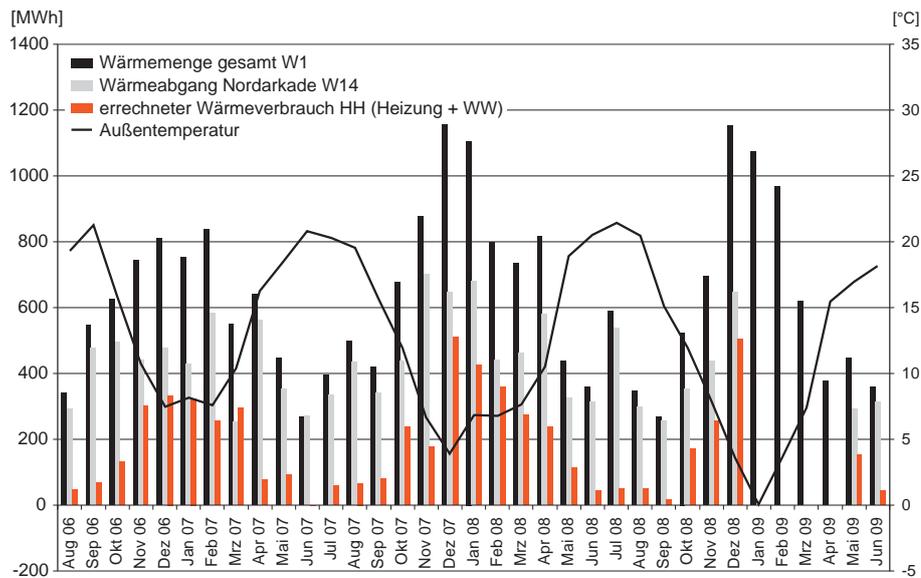


Abbildung 45: Monatswärmeverbräuche des Haupthauses (Heizen und Teil Warmwasser) sowie der Nordarkade mit der mittleren Monatstemperatur, in den Monaten Januar bis April 2009 war der Zähler W14 defekt

Der über die genannten Hauptzähler ermittelte Jahreswärmeverbrauch (Nutzenergie) des Haupthauses (Nutzenergie Heizen und Anteil für thermische, zentrale Warmwasserbereitung) für das Jahr 2007 ergab sich zu 2.172 MWh. Dies entspricht einem flächenspezifischen Verbrauch von 97 kWh/m²a. Für das Jahr 2008 wurde ein Gesamtverbrauch an Wärmeenergie von 2.497 MWh ermittelt. Wird dieser mit der über die Wetterstation selbst errechneten Gradtagszahl $G_{t15,20}$ auf das Jahr 2007 bereinigt, ergeben sich 2.103 MWh. Bei einer Bereinigung mit den vom BBR [1] bereitgestellten Klimafaktoren ergeben sich 2.258 MWh. Faktisch hat sich der Verbrauch vom Jahr 2007 auf das Jahr 2008 also nicht verändert.

Da auch die vom Verteiler abgehenden Heizkreise alle messtechnisch erfasst wurden, war ein Vergleich mit dem errechneten Gesamtverbrauch möglich. Der über die Unterzähler ermittelte Wärmeverbrauch für das Jahr 2007 lag mit 1.640 MWh 23 % unter diesem Wert.

Abbildung 46 zeigt den jeweiligen monatlichen Gesamtwärmeverbrauch und zum Vergleich die Summe der entsprechenden Unterzähler auf. Die graue Fläche stellt demzufolge den unbekanntem Anteil dar. Obwohl die Unterzähler die wesentlichen Verbraucher erfassen, liegt der unbekanntem Anteil insbesondere im März sehr hoch, zu diesem Zeitpunkt wurde von der Installationsfirma noch am Wärmeverteilnetz sowie an den Wärmemengenzählern gearbeitet. Die Plausibilität verbessert sich im April 2007, wobei auch im Juli und August 2007 die nachweisbaren Wärmemengen lediglich ca. 50 % der Gesamtwärmemenge ausmachen. Die Vermutung liegt nahe, dass ein oder mehrere Zähler sehr ungenau sind oder die Rechenwerke falsche Daten berechnen.

In einer Sitzung im Oktober 2007 wurde dieser Umstand dem Fachplaner mitgeteilt, der versicherte, die aktuellen Schemata zur Prüfung zur Verfügung zu stellen und diesen Sachverhalt selbst zu überprüfen. Eine durch das fbta durchgeführte Prüfung der Wärmemengenzähler im Sommer 2008 konnte diesbezüglich keine Mängel aufdecken.

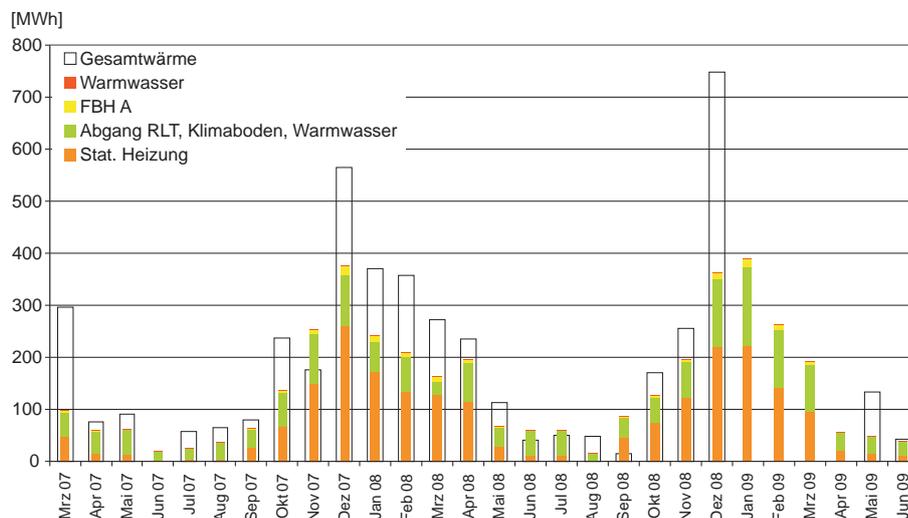


Abbildung 46: Wärmeverteilerebene 1; der Gesamtwärmestrang gliedert sich in vier Verteilstränge auf, die alleamt über Zähler erfasst werden

Im weiteren Verlauf dieses Berichtes werden die Werte der Hauptzähler zur Ermittlung von Kennzahlen herangezogen, weil diese im Allgemeinen weniger Abweichungen aufweisen als Zähler mit kleineren Durchflussmengen und geringeren Betriebszeiten. Zur Ermittlung des Jahresendenergieverbrauchs wurde der gesamte Gasverbrauch (Haupthaus und Nordarkade) mit dem Heizwert $10,5 \text{ kWh/m}^3$ bewertet und dem Haupthaus anteilig zugerechnet.

Der Jahresendenergieverbrauch für das Haupthaus im Jahr 2007 ergibt sich zu 2.911 MWh. Der reine Primärenergieverbrauch ohne Berücksichtigung der Stromgutschrift der BHKW wurde mit dem Faktor 1,1 ermittelt. Der absolute Primärenergieverbrauch für Wärme beträgt im ersten Jahr also 3202 MWh bzw. $146 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Abbildung 47). Die entsprechenden Zahlen für das Jahr 2008 sind in Abbildung 48 dargestellt.

Der zukünftige Primärenergiefaktor für die Wärme (nach durchgeführten Infrastrukturmaßnahmen), welcher die Stromgutschriften der BHKW bereits beinhaltet, wurde vom Energieplaner in einem Bericht mit 0,07 angegeben. Der Primärenergiefaktor im Bestandsgebäude wurde dort mit 0,497 angegeben.

Im Jahr 2007 erzeugten die 3 BHKW im Gesamtverbund 893 MWh Strom, anteilig für das Haupthaus sind das 288 MWh. Dies entspricht primärenergetisch (Faktor 2,7) einer Gutschrift von 777 MWh. Es bleibt also ein Primärenergieverbrauch für Wärme von 2.424 MWh. Das entspricht jedoch nur einem effektiven Primärenergiefaktor von 0,83. Im Jahr 2008 betrug die erzeugte Strommenge annähernd 0, womit der effektive Primärenergiefaktor quasi 1,1 entsprach.

Da der Heizwärmeverbrauch in erster Linie von der Außentemperatur abhängen sollte, wurde in Abbildung 49 die mittlere Wärmeleistung zur Versorgung der beiden Gebäude Nordarkade und Haupthaus in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur dargestellt. Als Bezugsfläche werden die beheizte NGF des Haupthauses mit 21.875 m^2 und die aus der BGF der Nordarkade (18.579 m^2) mit dem Faktor 0,8 ermittelte beheizte NGF von 14.863 m^2 verwendet. Man erkennt eine relativ breite Streuung. Die Aussagekraft dieser Darstellung relativiert sich, da die Wärme in der Nordarkade auch zur Kälteerzeugung genutzt wird und deshalb kein Schnittpunkt mit der X-Achse existiert. Eine getrennte Darstellung des

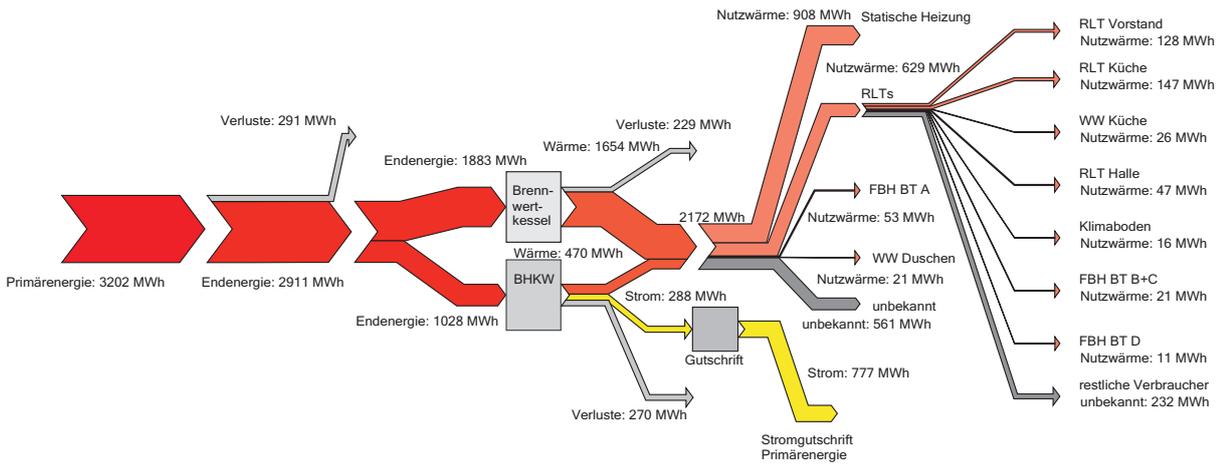


Abbildung 47: Verteilung der Jahreswärmeenergie 2007 als Sankey-Diagramm

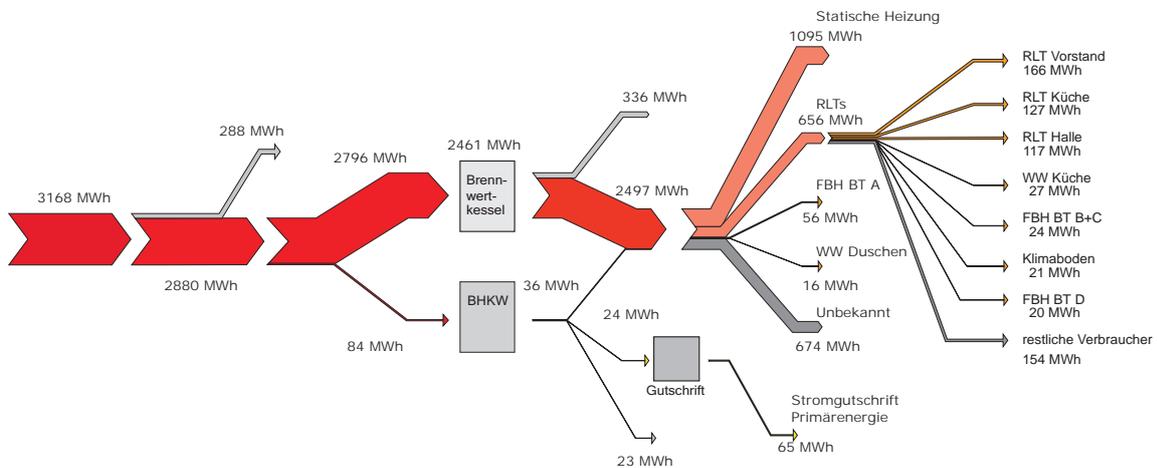


Abbildung 48: Verteilung der Jahreswärmeenergie 2008 als Sankey-Diagramm

Haupthauses war während der Projektlaufzeit nicht möglich, da der Zähler am Abgang zur Nordarkade erst ab Mai 2009 kontinuierlich über die Gebäudeleittechnik erfasst wurde. Bis dahin lagen nur monatlich durch das Facility Management abgelesene Werte vor.

Eine sinnvolle Heizkennlinie ließ sich daher lediglich für kontinuierlich gemessene Unterkreise wie den Heizkreis der Statischen Heizung ermitteln (siehe Kapitel 4.2.3).

In Abbildung 50 wurden die gemessenen Verbrauchswerte der Wärmemengenzähler in der ersten Verteilerebene (vgl. Abbildung 10 Kapitel 2.3) für die Jahre 2007 und 2008 gegenübergestellt. Betrachtet man die auf das Jahr 2007 klimabereinigten Werte, sieht man dass der Verbrauch leicht gesunken ist. Dabei hat sich der Wärmeverbrauch für die RLT Küche deutlich reduziert, der Verbrauch für den Heizkreis Statische Heizung ist leicht angestiegen.

Die Zähler in der zweiten Verteilerebene sind in 51 dargestellt. Hier fällt vor allem der im Jahr 2008 deutlich gestiegene Wärmeverbrauch für die RLT Halle auf. Ergebnisse zu den Nutzungszeiten der Halle und Mängeln im Betrieb der Lüftungsanlage finden sich in Kapitel 4.3.5.

In Tabelle 19 sind die über die Wärmemengenzähler gemessenen Jahreswärmeverbräuche eingetragen. Der Gesamtwärmeverbrauch für Haupthaus und Nordarkade (W01) und BHKW gesamt (W11) sind auf die Fläche von Nordarkade und Haupthaus gemeinsam bezogen. Für den Abgang Nordarkade (W14)

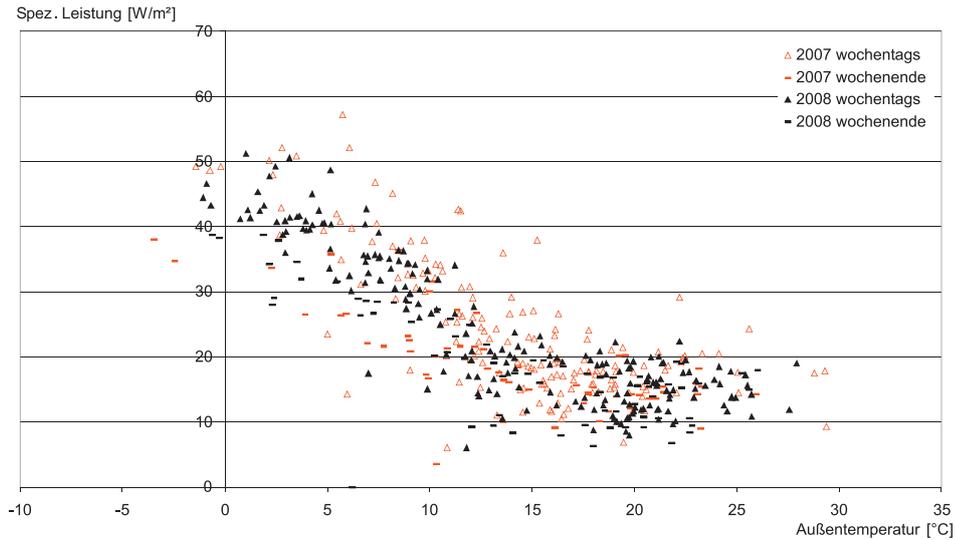


Abbildung 49: Die mittlere tägliche Gesamtwärmeleistung für Heizen, Kühlen (AKM in der Nordarkade) und Warmwasser über der Außentemperatur dargestellt

wurde nur die entsprechende Fläche als Energiebezugsfläche verwendet.

Die maximal über den Zähler registrierte Gesamtleistung der Heizzentrale betrug 2,8 MW. Übers Jahr gesehen liegt die Gesamtleistung während ca. 12% der Zeit über 1,5 MW. Die installierte Gesamtleistung der Heizzentrale liegt bei ca. 4,5 MW.

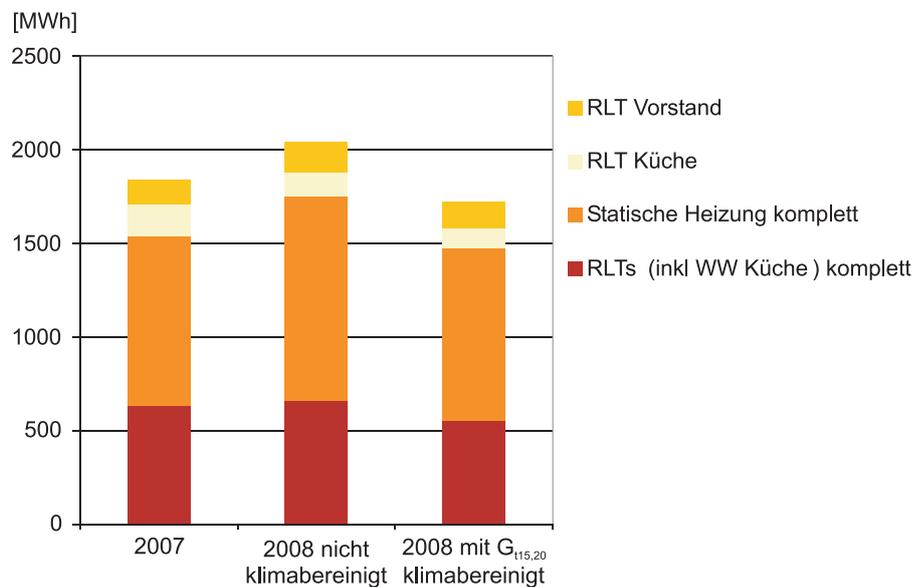


Abbildung 50: Vergleich von Jahresverbrauchswerten der Zähler in der Hauptebene, vgl. Abbildung 10 Kapitel 2.3

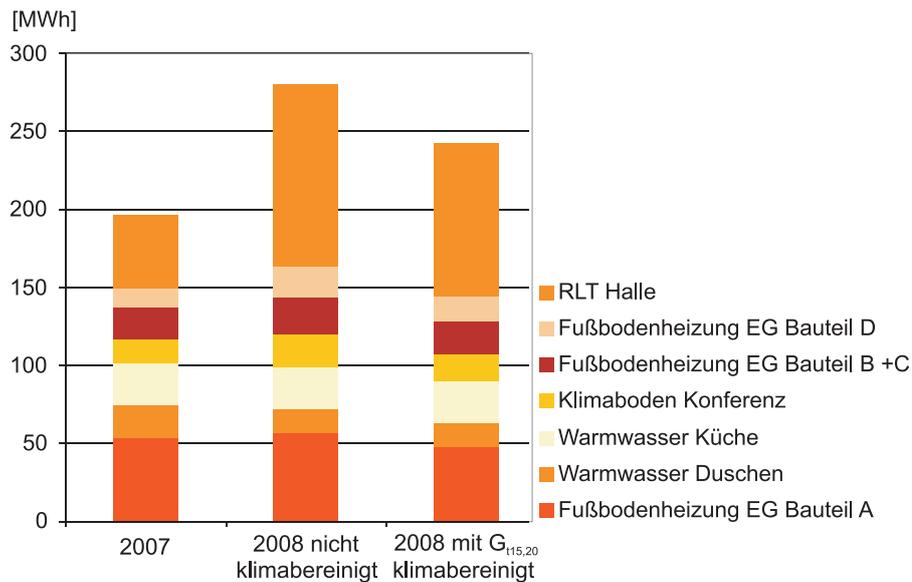


Abbildung 51: Vergleich von Jahresverbrauchswerten der Zähler in der Unterebene, vgl. Abbildung 10 Kapitel 2.3

ID	Bezeichnung	Jahresverbrauch 2007 [kWh]	Jahresverbrauch 2008 [kWh]	Spez. Verbrauch 2007 [kWh/m ² a]	Spez. Verbrauch 2008 [kWh/m ² a]	Bezugsfläche [m ²]
W01	Wärmeerzeuger gesamt	7.516.490	7.822.000	196,9	204,9	38.175
W02	RLTs gesamt	628.790	656.040	29,4	30,0	21.875
W03	FBH EG Bauteil A	53.440	56.148	2,5	2,6	21.875
W04	Statische Heizung gesamt	907.940	1.094.630	42,4	50,0	21.875
W05	WW Duschen	21.390	15.710	1,0	0,7	21.875
W06	WW Küche	26.370	26.800	1,2	1,2	21.875
W07	RLT Küche	173.164	126.843	8,1	5,8	21.875
W08	Klimaboden Konferenz	15.745	21093	0,7	1,0	21.875
W09	FBH EG Bauteil B+C	20.983	24.111	1,0	1,1	21.875
W10	FBH EG Bauteil D	11.114	19.894	0,5	0,9	21.875
W11	BHKW gesamt	1.666.770	133.730	42,9	3,4	38.875
W12	RLT Halle	47.450	116.730	2,2	5,3	21.875
W13	RLT Vorstand	128.300	166.160	6,0	7,6	21.875
W14	Abgang Nordarkade	5.344.410	5.325.040	318,9	317,8	16.758

Tabelle 19: Gemessene Jahresverbrauchswerte der Wärmeabnehmer, bezogen auf die beheizte NGF

4.2.1. Thermische Qualität der Gebäudehülle

Im Dezember 2006 wurden mit einer Infrarotkamera Aufnahmen der Fassade sowohl von außen als auch von innen angefertigt. Zum Einsatz kam eine Kamera der Firma Flir, die uns vom btga der Uni Wuppertal zur Verfügung gestellt wurde. Die Außenlufttemperatur lag während der Aufnahmen um den Gefrierpunkt.

Abbildung 52 zeigt die Sonnenschutz-Schilder, die komplett vor die Brüstung gefahren sind. An den Fenstern ist deutlich der Rahmen mit einer Oberflächentemperatur von ca. 9°C zu erkennen. Bei jedem zweiten Rahmen sieht man im oberen Bereich einen noch wärmeren horizontalen Streifen von ca. 11°C Oberflächentemperatur. Hier handelt es sich um die Nachströmöffnungen, die durch ihre direkte Verbindung zwischen innen und außen eine Wärmebrücke darstellen.

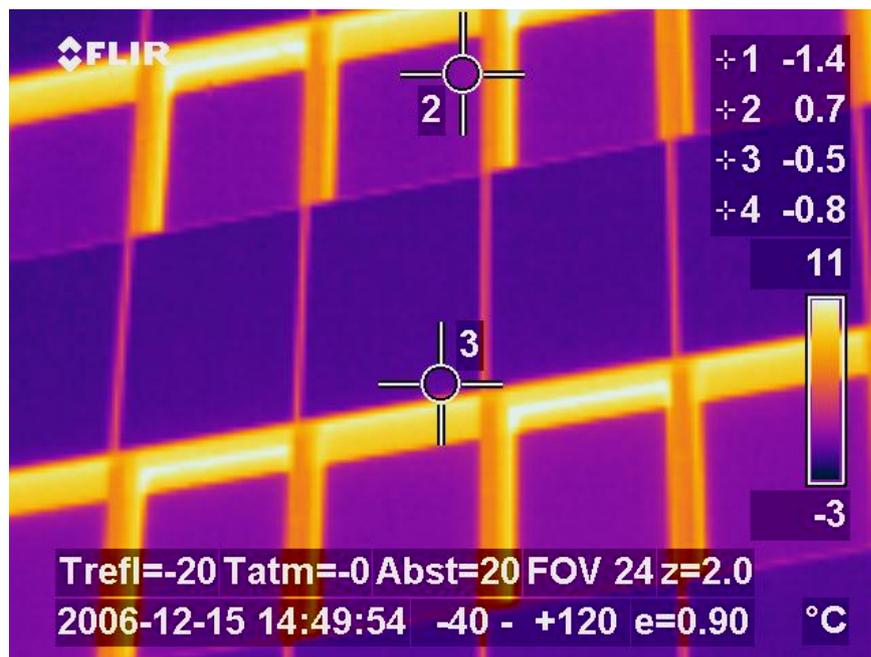


Abbildung 52: Infrarotbild zweier Fensterreihen an der Ostfassade von außen

Im Erdgeschoss wurde außerdem eine Nebentür zur Halle von außen fotografiert (Abbildung 53). Man erkennt deutlich Schwachstellen des Türrahmens im vertikalen (vermutlich an den Aufhängungen) und im horizontalen Bereich. Man sieht aber auch, dass sich in der reflektierenden Oberfläche die Wärmeabstrahlung der gegenüberliegenden Ostarkade spiegelt. Der helle Punkt links oberhalb der Tür ist eine Überwachungskamera, die im Betrieb deutlich wärmer als die Umgebung ist.

In der Abbildung 54 wurde ein Fenster mit Nachströmöffnung exemplarisch abgelichtet. Wiederum erkennt man deutlich die Nachströmöffnung als Schwachstelle des Fensters. Die Oberflächentemperatur liegt in diesem Bereich bei ca. 13°C. Zu erkennen ist außerdem, dass der Rahmen des Fensterflügels besser isoliert als der Anschlagrahmen. Bei der Fensterscheibe ist allerdings zu beachten, dass in ihr ein großer Teile der Wärmestrahlung aus dem Rauminneren reflektiert wird. Daher müssen deren Oberflächentemperaturen mit Vorsicht betrachtet werden.

Abbildung 55 zeigt schließlich eine Detailaufnahme der linken oberen Ecke des Fensters von innen. Deutlicher zu erkennen sind nun die Schlitzte zur Zuluft einströmung. Wieder fällt der deutliche farbliche Unterschied zwischen Rahmen des Fensterflügels und dem Anschlagrahmen auf. Der Temperaturunterschied beträgt ca. 2 K.



Abbildung 53: Infrarotbild der Fassade im Erdgeschoss von außen

Aufzugsschächte Eine erhebliche Undichtigkeit in der Gebäudehülle, die von Beginn an bekannt war und auch Gegenstand von Diskussionen in der Planungsphase, stellen die oben offenen Aufzugsschächte dar. Hier entstehen durch die Bewegung der Aufzüge und den natürlichen Auftrieb in den bis zu 60 m hohen Schächten ein nicht zu vernachlässigender Luftwechsel und somit Lüftungswärmeverluste.

Der Bauherr zog eine nachträgliche Schließung der Aufzugsschächte durch Jalousieklappen, die im Brandfall automatisch öffnen, in Betracht. Von den Energieplanern wurde eine überschlägige Berechnung durchgeführt, um die zu erwartende Energieeinsparung zu ermitteln. Wenn der mittlere Luftwechsel durch diese Maßnahme um 0,1 pro Stunde verringert wird, dann sinkt der spezifische Heizwärmebedarf um ca. 7 kWh/m²a. Von der KfW wurde anhand dieser und einer eigenen Berechnung die Amortisationszeit der Maßnahmen auf 7 Jahre berechnet, so dass im Herbst 2008 die Maßnahme durchgeführt wurde. Einzig beim Feuerwehraufzug durfte wegen Brandschutzauflagen diese Maßnahme nicht durchgeführt werden.

Die Lüftungswärmeverluste durch bestehende Undichtigkeiten in der Gebäudehülle wurden noch verstärkt durch Unregelmäßigkeiten beim Betrieb der zentralen Abluftanlage. Diese werden in Kapitel 4.2.3 und 4.3.1 genauer untersucht.

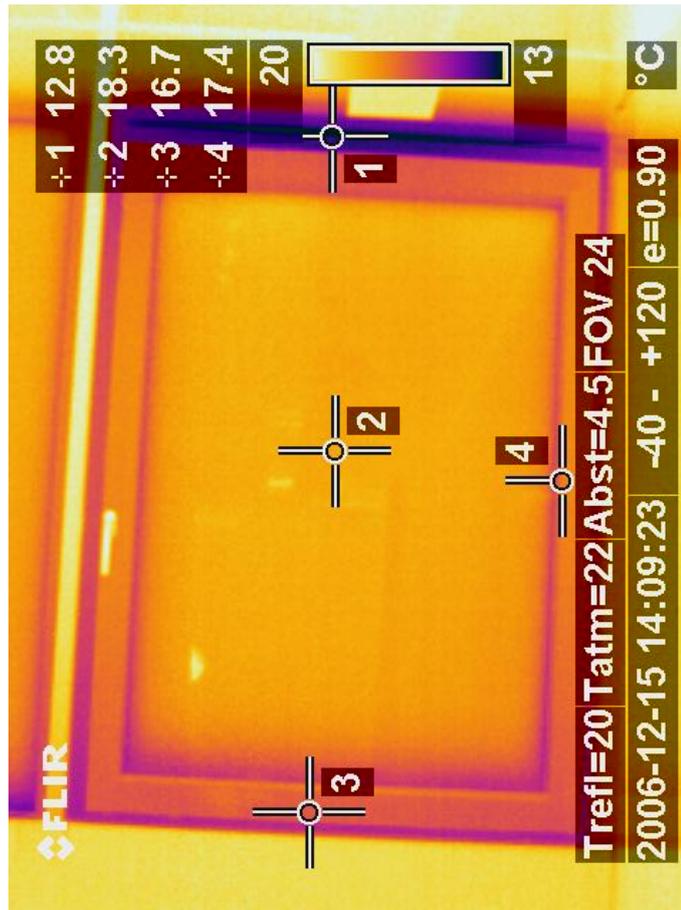


Abbildung 54: Infrarotbild eines Fensters mit Nachströmöffnung von innen

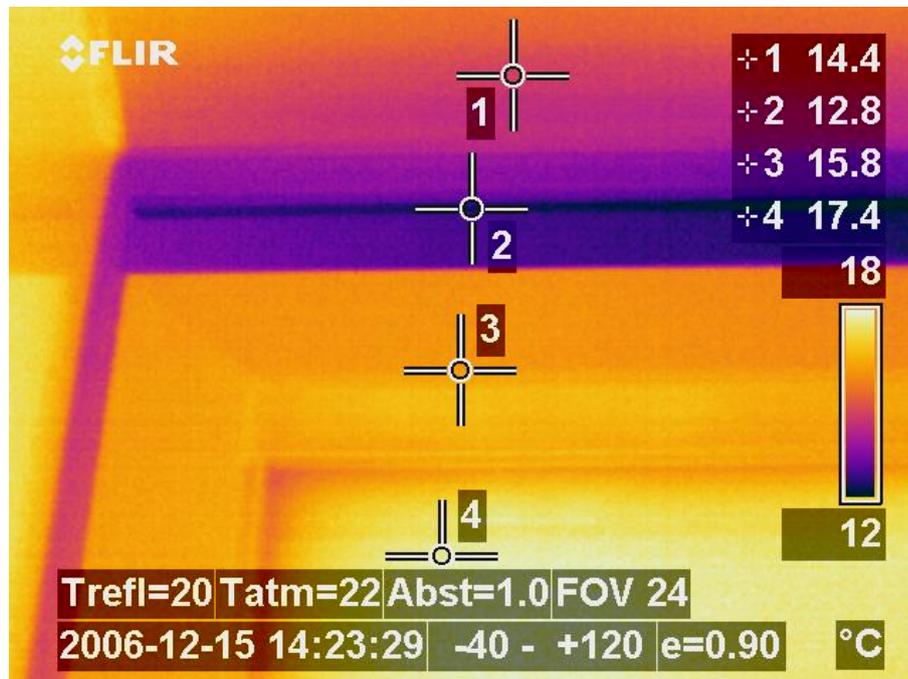


Abbildung 55: Nahaufnahme der Nachströmöffnung in der Fassade über dem Fenster

4.2.2. Brennwertkessel und BHKW

Für die Wärmeerzeugung werden, wie bereits beschrieben, zwei Brennwertkessel und drei BHKW eingesetzt. Wie die monatlichen Anteile der Wärmeerzeuger aussehen, zeigt Abbildung 56. Es wird ersichtlich, dass die BHKW einen fast vernachlässigbaren Anteil an der Wärmeerzeugung haben. In den Monaten Dezember 06, Januar 07 und Juni 07 sind sie aufgrund eines Defekts überhaupt nicht in Betrieb gewesen. Im Jahr 2008 standen die BHKW wegen der Umbaumaßnahmen der Nordarkade bzw. wegen Defekt beinahe komplett still, so dass eine Berechnung des Primärenergiefaktors für Wärme zwar möglich, aber nicht repräsentativ ist, weil der Zielzustand der Energieversorgung auf der Liegenschaft noch nicht erreicht wurde. Abbildung 57 zeigt die jährlichen Anteile, die deutlich hinter den Planwerten von 80 Prozent zurückbleiben.

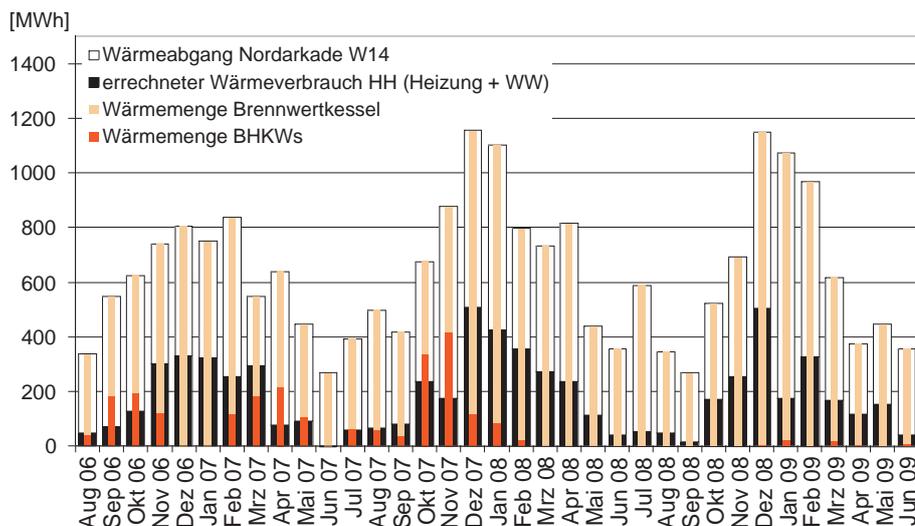


Abbildung 56: Monatsweise Anteile der BHKW und Brennwertkessel an der Wärmeerzeugung für Haupthaus und Wärmeverbund

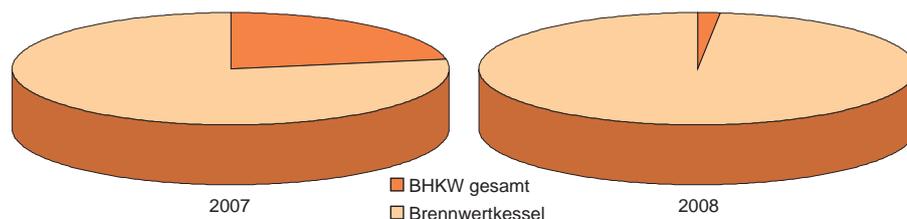


Abbildung 57: Jahresanteile der BHKW an der Gesamtwärmeerzeugung

Da nicht nur der gesamte Gasverbrauch am Zähler des Energieversorgers gemessen wird, sondern jedes BHKW mit einem separaten Gaszähler ausgestattet ist, konnte durch Differenzbildung die von den Brennwertkesseln monatlich verbrauchte Gasmenge bestimmt werden. Anhand des Heizwertes wurde die enthaltene Energiemenge errechnet und mit den tatsächlich erzeugten Wärmemengen ins Verhältnis gesetzt.

Abbildung 58 zeigt die daraus ermittelten monatlichen Nutzungsgrade der Brennwertkessel. Diese wurden anhand des Heizwertes berechnet, so dass theoretisch Nutzungsgrade über 100 % möglich sind. Der Wert im März 2007 ist jedoch ein Messfehler, ein Nutzungsgrad von über 110 % ist nicht möglich. Im Mittel lag der Nutzungsgrad bei 89 % und damit in einem guten Bereich.

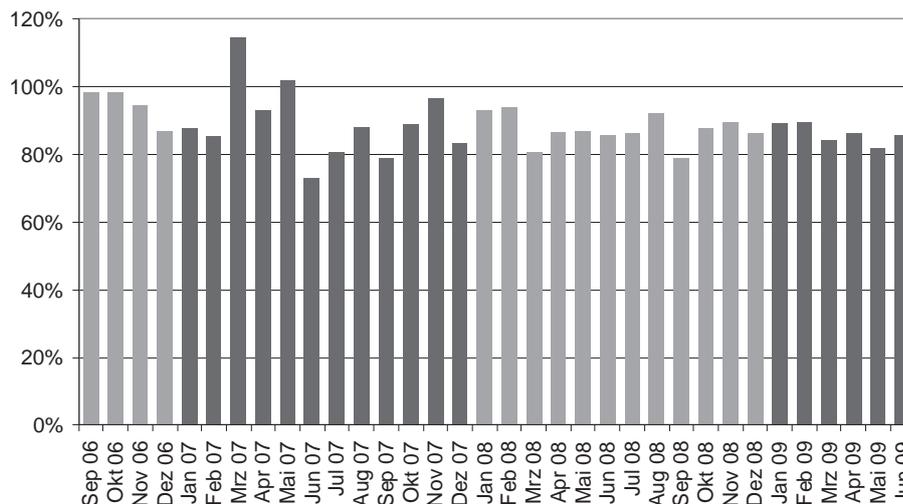


Abbildung 58: Monatlicher mittlerer Nutzungsgrad der Brennwertkessel auf Basis des Heizwertes

Die drei BHKW sind mit verschiedensten Zählleinrichtungen versehen. Diese werden jedoch nicht über die GLT kontinuierlich erfasst, sondern vor Ort abgelesen. In der Regel geschieht dies einmal im Monat durch das Facility Management. Der erzeugte Strom der BHKW wird im Gebäude selbst verbraucht und nur bei einem eventuellen Überschuss in das Netz des Energieversorgers eingespeist. Während der Projektlaufzeit wurden keine Einspeisungen ins Netz des EVU registriert.

Die Stromerzeugung wurde an jedem BHKW gemessen. Dabei wurden Wandlerzähler eingesetzt, deren angezeigte Werte also mit einem bestimmten Faktor multipliziert werden mussten, um den tatsächlichen Energieverbrauch zu erhalten. Laut Aussage der FM-Firma hatte der Zähler am BHKW 1 einen Faktor von 800 (Stromwandler 800/1), die Zähler von BHKW 2 und 3 jeweils einen Faktor von 120 (Stromwandler 600/5). Mit diesen Werten ergaben sich jedoch gänzlich unplausible Energiemengen, die über dem theoretischen Energieinhalt des im gleichen Zeitraum verbrauchten Erdgases lagen. Die erzeugten Strommengen ergaben nur dann Sinn, wenn auch Zähler 1 mit einem Wandlungsfaktor von 120 angenommen wurde. Da alle 3 BHKW die gleiche Leistung haben, ist es sehr wahrscheinlich, dass überall Zähler mit den gleichen Wandlungsfaktoren eingesetzt werden. Alle in der folgenden Betrachtung aufgeführten Zahlen wurden auf Basis dieser Annahme errechnet. Seit Herbst 2007 wurden die Werte bereits umgerechnet vom FM-Dienstleister übermittelt.

Über diese Zähler konnte der Anteil des jeweiligen Blockheizkraftwerkes an der Stromerzeugung ermittelt werden (Abbildung 59). Man erkennt, dass das BHKW 3 häufig die größten Anteile hatte, während eigentlich eine Gleichverteilung der Betriebszeiten anzustreben ist.

Es liegen ebenso die monatlich verbrauchten Gasmengen der BHKW vor, so dass anhand der erzeugten Wärmemenge der Nutzungsgrad der BHKW separat für den elektrischen und thermischen Anteil ermittelt werden konnte (Abbildung 60). Der Gesamtnutzungsgrad bewegt sich zwischen ca. 70 % und maximal 85 %.

Im Jahr 2007 lag die maximal erreichte thermische Leistung der drei BHKW bei 1.700 kW, im Jahr 2008 allerdings nur bei ca. 850 kW. Die installierte Leistung der BHKW liegt bei $3 \cdot 440 \text{ kW} = 1.320 \text{ kW}$. Die Anzahl der Stunden mit einer gemessenen Leistung über 1.320 kW im Jahr 2007 war allerdings sehr gering (7 h) und muss auf Messungenauigkeiten bzw. Messungen beim Anlaufen der BHKW zurückgeführt werden.

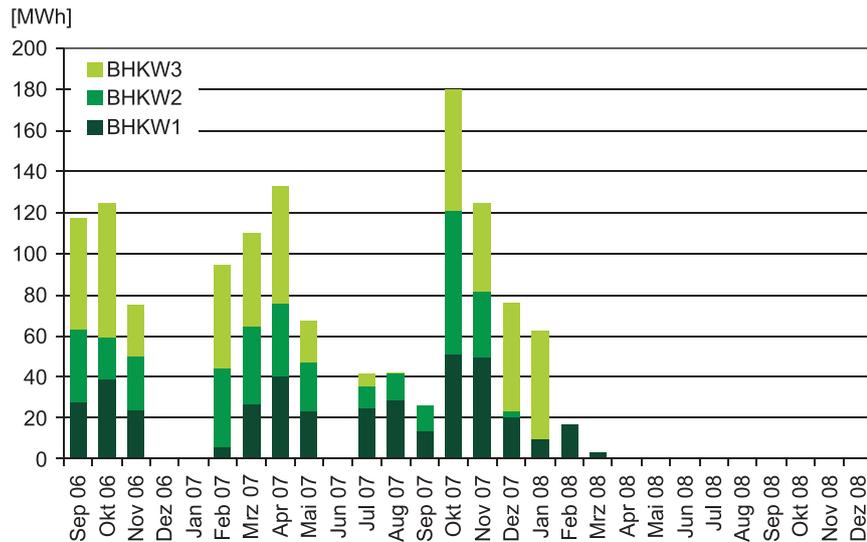


Abbildung 59: Die monatlich erzeugten Strommengen der drei Blockheizkraftwerke

Gut erkennen lassen sich durch Darstellung der Summenhäufigkeit der Leistung (Stundenmittel) in Abbildung 61 die Zeiten, in denen nur ein BHKW (bis ca. 440 kW), zwei BHKW (bis ca. 880 kW) oder alle drei BHKW gemeinsam (ab 880 kW) in Betrieb waren. Da die BHKW im Jahr 2008 kaum in Betrieb waren, wurde hier nur das Jahr 2007 dargestellt.

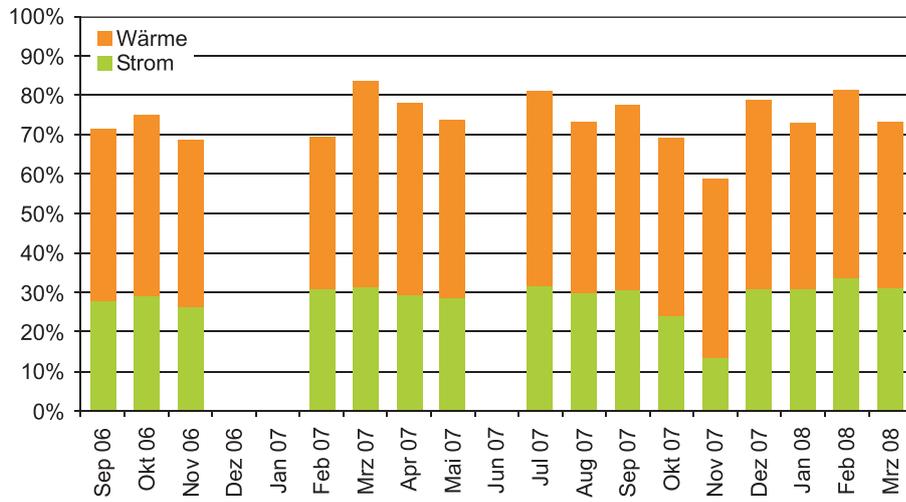


Abbildung 60: Monatlich ermittelter Nutzungsgrad der BHKW bis März 2008, Wert für Wärme auf Basis des Heizwertes berechnet

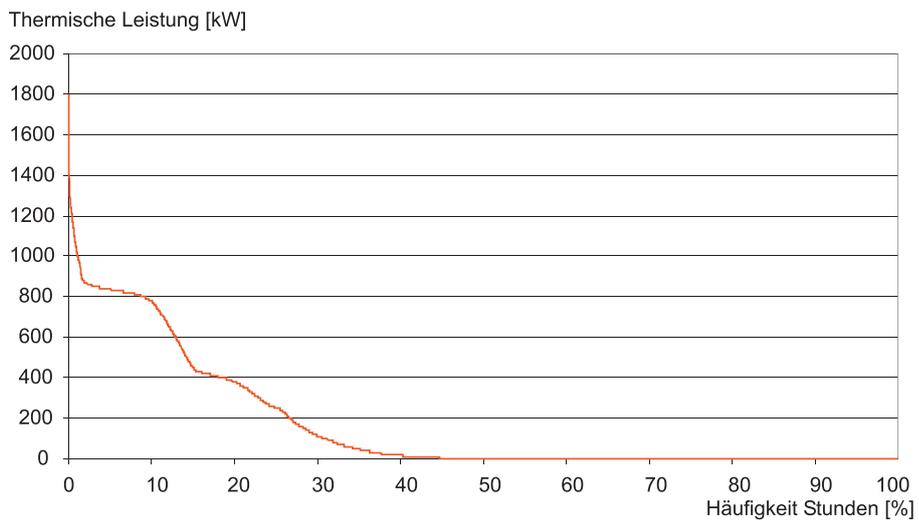


Abbildung 61: Summenhäufigkeit der Leistung der drei BHKW im Jahr 2007

4.2.3. Statische Heizung

Abbildung 62 stellt die über einen Tag gemittelte spezifische Heizleistung im Heizkreis der statischen Heizung dar. Bei einer mittleren Außentemperatur von 5°C liegt sie am Wochentag bei ca. 15 W/m^2 (bezogen auf die gesamte beheizte NGF des Gebäudes), am Wochenende bei 10 W/m^2 .

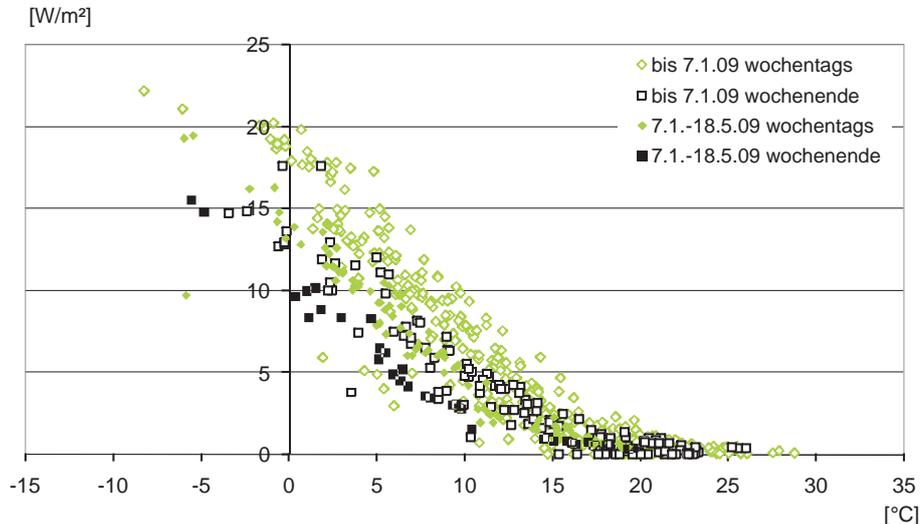


Abbildung 62: Tagesmittlere spezifische Heizlast im Heizkreis „Statische Heizung“ über der Außentemperatur, getrennt nach Wochentagen und Wochenende sowie Zeiträumen mit und ohne Betrieb der zentralen Abluftanlage

Ab einer Tagesmitteltemperatur von 22°C liegt die gemessene Heizleistung unter 1 W/m^2 . Das entspricht genau der Auslegungssolltemperatur für den Heizfall. Wenn man bedenkt, dass die Nutzer ihre Solltemperatur über das Bedienelement im Raum bis auf 25°C erhöhen können und es sich bei der dargestellten Außentemperatur um einen Tagesmittelwert handelt, passt das gut zusammen.

Im Rahmen des Monitorings konnte relativ schnell festgestellt werden, dass die Regelung der zentralen Abluftanlage nicht wie geplant funktionierte (siehe Kapitel 4.3.1). Der Einfluss der dadurch induzierten erhöhten Lüftungswärmeverluste zeigt sich bei Betrachtung des Zeitraums vom 7.1.09 bis 18.5.09 deutlich, in dem nämlich die zentralen Abluftanlagen aller Bauteile komplett abgeschaltet wurden. Der Wärmebedarf im Heizkreis für die statische Heizung verringerte sich in diesem Zeitraum um bis zu 25 Prozent.

Anhand der Grafik scheint es so, als würde sich das Verhalten der statischen Heizung oberhalb einer Außenlufttemperatur von 17°C ändern, die Steigung einer Regressionsgeraden durch die Punkteschar scheint flacher zu werden. Im Abschlussbericht zum EnOB-Projekt „ZUB Kassel“ [7] wurde auf Seite 91 eine Methode zur Ermittlung der Heizgrenztemperatur vorgestellt [8]. Da die Gesamtwärme hier nicht täglich erfasst werden konnte, wurde aber zumindest für die Büros (Abgang Statische Heizung) eine solche Ermittlung der Heizgrenze durchgeführt. Dazu wurde in Abbildung 63 die Wärmemenge klassiert über der Außentemperatur aufgetragen und diejenige Außentemperatur ermittelt, bei welcher die Differenz der Verbräuche jenseits der relativen Summenhäufigkeit von 95% maximal ist. Dies ist von 17°C auf 16°C der Fall, die Annahme der Heizgrenztemperatur 17°C aus der gemessenen Heizkurve (Abbildung 62) wird also bestätigt.

Während in Abbildung 62 die Wochenendabsenkung deutlich wird, kann man in Abbildung 64, welche die spezifische Heizleistung wochentags in Stundenaufösung darstellt, gut die zwei unterschiedlichen Punktescharen erkennen, die sich aus dem Tagbetrieb und der Nachtabsenkung ergeben. Die in den

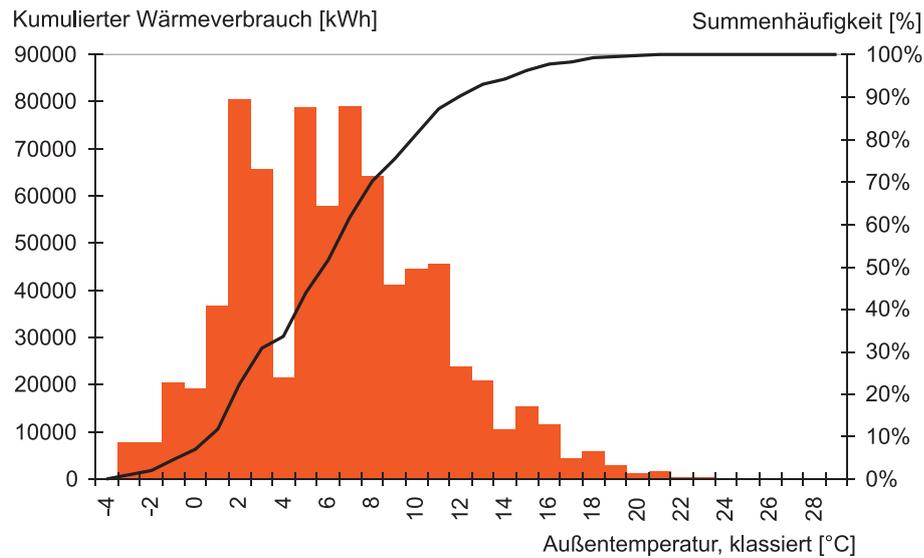


Abbildung 63: Ermittlung der Heizgrenze für den Heizkreis „Statische Heizung“

Jahren 2007 und 2008 maximal registrierte Leistungsaufnahme lag bei 600 kW. Die Anschlussleistung laut Auslegung beträgt 660 kW. Die Volllaststunden betragen somit im Jahr 2007 1.375 h nach geplanter Anschlussleistung bzw. 1.500 h anhand der gemessenen Maximalleistung.

Abbildung 65 stellt ein typisches Wochenprofil für den Winter und den Sommer dar. Im Winter ist deutlich der Absenkbetrieb in der Nacht und am Wochenende sowie die Wiederaufheizphase in den Morgenstunden erkennbar. Auch im Sommer werden an allen Tagen in den Morgenstunden bis mittags geringe Energiemengen für die Beheizung registriert.

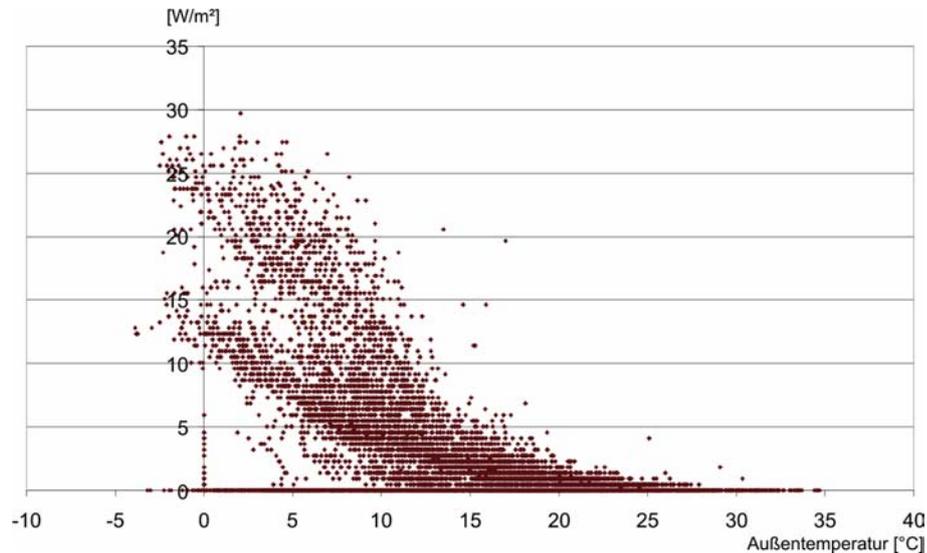


Abbildung 64: Spezifische Heizlast im Heizkreis „Statische Heizung“ in Stundenauflösung, wochentags

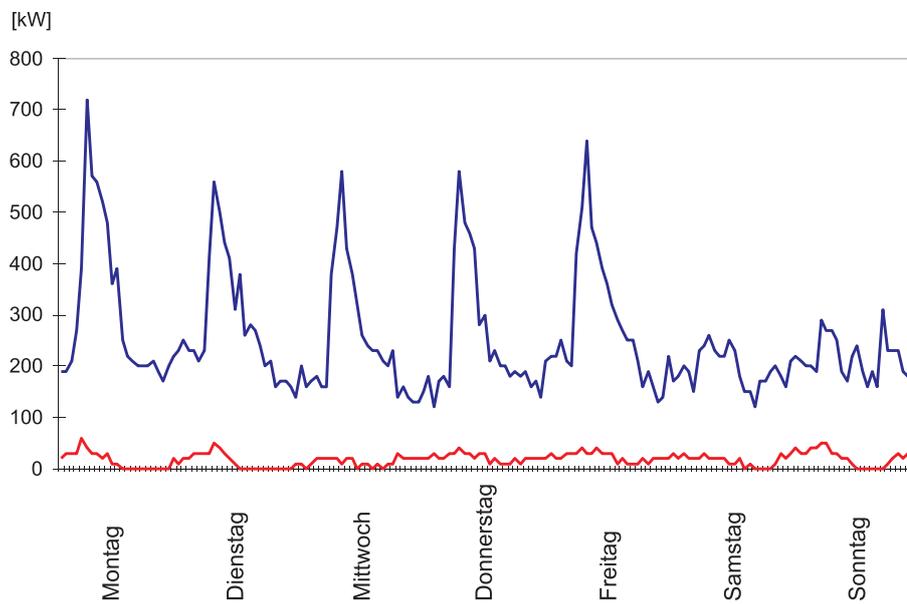


Abbildung 65: Exemplarisches Wochenprofil der Leistungsaufnahme im Heizkreis „Statische Heizung“ für den Winter (26.1.-1.2.09, blau) und den Sommer (14.7.-20.7.09, rot)

4.2.4. Fußbodenheizung

Die Fußbodenheizung im Erdgeschoss des Gebäudes ist in drei Heizkreise unterteilt. Bauteil A und D haben jeweils einen eigenen Heizkreis, Bauteil B und C sind zu einem zusammengefasst. Die Heizkreise für Bauteil B/C und D sind jeweils mit $2 \cdot 25$ kW Heizleistung ausgelegt, der für Bauteil A mit $2 \cdot 45$ kW. Daraus ergeben sich auch die höchsten Verbräuche für Bauteil A, obwohl die Fußbodenheizung im Bauteil B und C die größte Fläche hat. Dieser Umstand spiegelt sich auch in der spezifischen Heizleistung in Abhängigkeit von der mittleren Außentemperatur wider.

Während für Bauteil A (Abbildung 66) und D (Abbildung 68) bei einer mittleren Außentemperatur von 0°C die mittlere Heizlast pro Tag bei ca. 40 W/m^2 liegt, beträgt sie für den Heizkreis in Bauteil B/C (Abbildung 67) nur etwa 15 W/m^2 . Weiterhin fällt auf, dass in Bauteil A und D die Werte z.T. sehr weit streuen, in Bauteil B/C zeigen sie - insbesondere im Jahr 2009 - eine sehr stringente Abhängigkeit von der Außentemperatur.

Im Jahr 2007 war die Fußbodenheizung im Bauteil D gemäß der Zählerdaten nur sehr selten in Betrieb, die Verbräuche in diesem Heizkreis waren oft null. Es war zu diesem Zeitpunkt nicht klar, ob der Zähler defekt oder die Fußbodenheizung hier tatsächlich nicht in Betrieb war. Letzteres gilt nun als wahrscheinlich, weil im Jahr 2008 der Verbrauch deutlich anstieg, während das Regelverhalten in Abhängigkeit von der Außentemperatur keine Veränderung aufwies (siehe Abbildung 68).

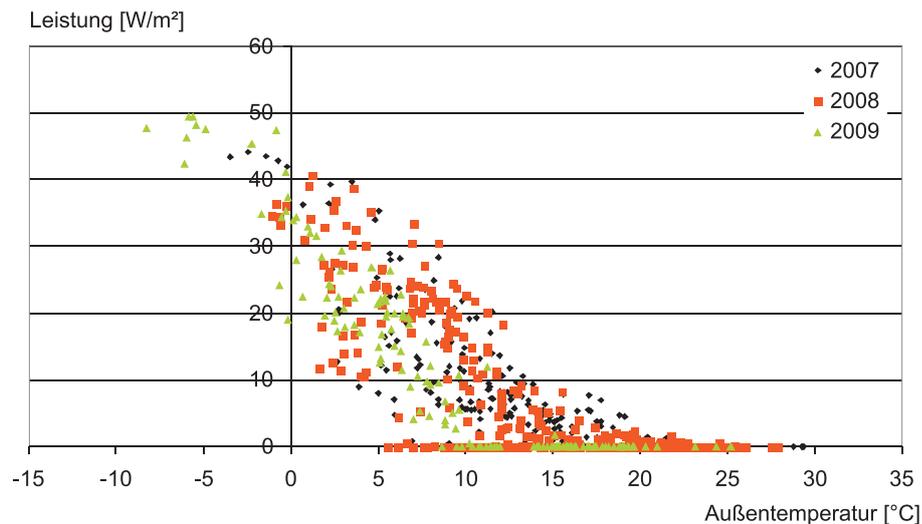


Abbildung 66: Die tagesmittlere spezifische Heizlast der Fußbodenheizung für das Erdgeschoss ‚Bauteil A, in Abhängigkeit von der Außentemperatur, Bezugsfläche 660 m^2

Für den Kreislauf der FBH in Bauteil A wurde 2007 und 2008 eine maximale Leistungsaufnahme von ca. 43 kW registriert. Die Auslegung beträgt 45 kW ($=68 \text{ W/m}^2$). Der Fußbodenkreislauf für Bauteil B und C ist mit 25 kW ($=26 \text{ W/m}^2$) ausgelegt, die bisher maximal gemessene Leistung lag bei 20 kW . Der Fußbodenheizkreis für das Bauteil D ist mit 25 kW ($=116 \text{ W/m}^2$) ausgelegt, jedoch betrug die seit Beginn des Monitorings maximal gemessene Leistungsaufnahme ca. 13 kW und somit nur ungefähr die Hälfte. Entweder ist der Regelkreis so geregelt, dass noch nie die maximale Leistung abgerufen wurde oder aber der Zähler misst falsch.

Klimaboden Im großen Sitzungssaal wurde ein Klimaboden installiert, der im Winter als Fußbodenheizung und im Sommer zur Bodenkühlung eingesetzt werden kann. Abbildung 69 zeigt die täglich

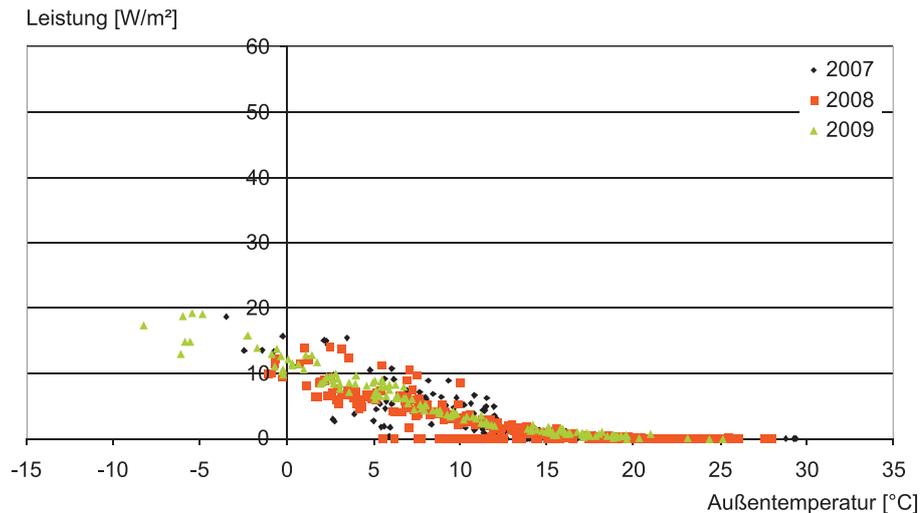


Abbildung 67: Die tagesmittlere spezifische Heizlast der Fußbodenheizung für das Erdgeschoss Bauteil B und C in Abhängigkeit von der Außentemperatur, Bezugsfläche 950 m²

benötigten Wärmemengen des Klimabodens. Dabei erkennt man eine breite Streuung der Werte bei gleichen Außentemperaturen. Die tägliche Nutzungszeit schwankt stark und zusätzlich konkurriert der Klimaboden mit der Konditionierung der Zuluft. Am Wärmeregister in der Zuluftführung ist allerdings kein Zähler installiert, so dass nur Informationen über die Niedertemperaturwärme vorliegen. An Tagen, an welchen der Sitzungssaal nicht genutzt wird, ist auch der Klimaboden nicht in Betrieb - zu erkennen an den zahlreichen Nullwerten im Diagramm.

Betrachtet man Abbildung 69, erkennt man, dass im Jahr 2007 zwischen 15 und 20°C Außentemperatur an fünf Tagen ungewöhnlich hohe Werte auftraten, auch im Jahr 2008 gab es oberhalb von 22°C einige Ausreißer. Im Jahr 2009 scheint sich das Regelverhalten stabilisiert zu haben, Ausreißer sind bisher nicht mehr aufgetreten. Allerdings wurde im Winter 2008/2009 festgestellt, dass nicht nur geheizt, sondern auch gekühlt wurde. In Kapitel 4.4.2 wird auf diesen Umstand näher eingegangen.

Die maximal registrierte Heizleistung betrug im Jahr 2007 25 kW, im Jahr 2008 26 kW, bezogen auf die Grundfläche des Sitzungssaals von 238 m² lag sie somit bei ca. 107 W/m². Die Auslegung des Heizkreises beträgt laut Planunterlagen 25 kW. Im Jahr 2007 hat der Klimaboden 15.745 kWh Wärme benötigt, im Jahr 2008 waren es 21.093 kWh.

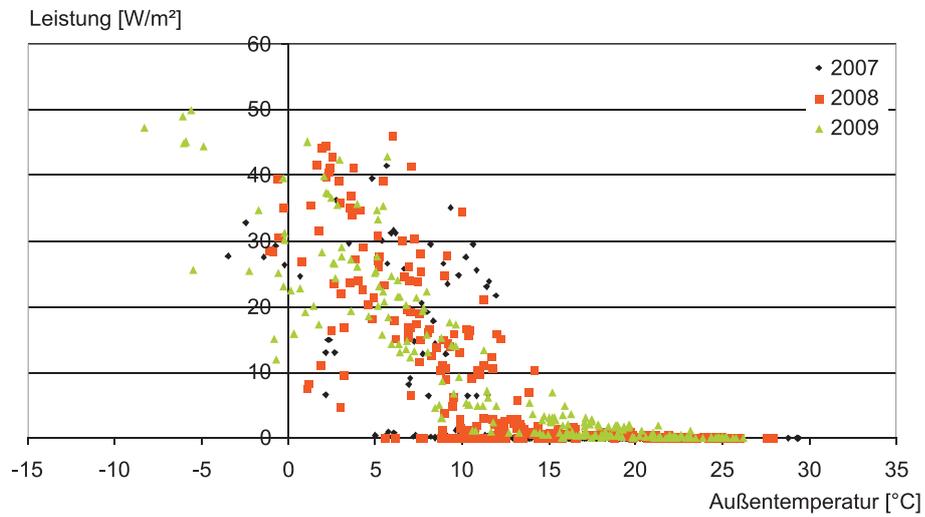


Abbildung 68: Tagesmittlere spezifische Heizlast der Fußbodenheizung für das Erdgeschoss Bauteil D in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur, Bezugsfläche 215 m²

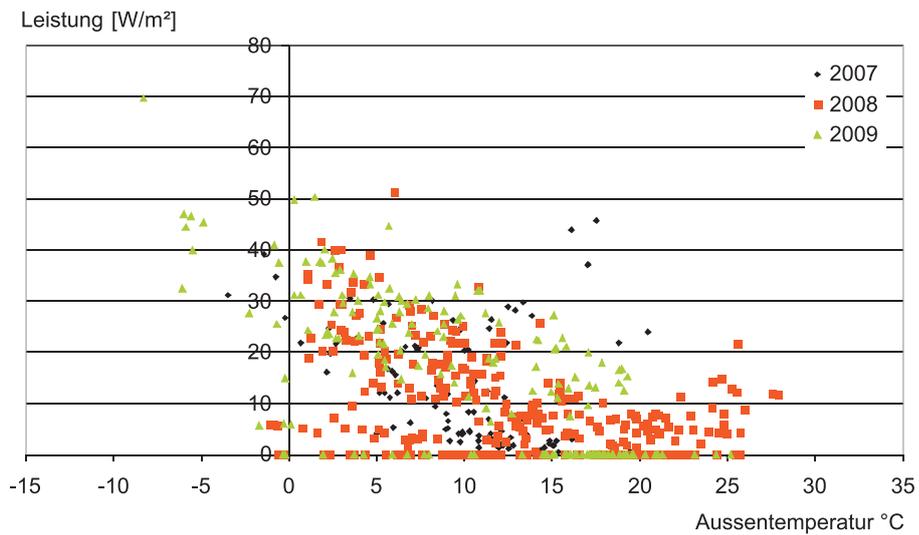


Abbildung 69: Tagesmittlere spezifische Heizlast des Klimabodens im Konferenzsaal in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur, Bezugsfläche 233 m²

4.2.5. Konditionierung der Zuluft

Ein vom Hauptverteiler abgehender Strang versorgt die Wärmetauscher der Lüftungsanlagen und zwei der Fußbodenheizungen im Erdgeschoss. Außerdem sind hier noch der Klimaboden des Konferenzsaals und der Warmwasserbereiter in der Küche angeschlossen (siehe auch Abbildung 10). Die Hauptwärmeabnehmer werden über Wärmemengenzähler erfasst. Abbildung 70 zeigt deren einzelne Monatsverbräuche im Verhältnis zur gesamten Wärmemenge dieses Heizkreises. In den Monaten März bis Mai 2007 ist klar zu erkennen, dass die über die Unterzähler registrierten Energiemengen nicht annähernd der Gesamtwärme entsprachen. Diese Abweichung rührte von dem nicht funktionierenden Zähler der Lüftungsanlage des Vorstandes her. Ab Juni 2007 zeigte auch dieser Zähler Verbrauchswerte an und der unbekannte Anteil wurde entsprechend kleiner. Allerdings lag er mit 20 bis 30 % immer noch sehr hoch, was dem Fachplaner auf einer Sitzung im Oktober 2007 mitgeteilt wurde. Bei der Überprüfung der Wärmezähler durch das fbta im Sommer 2008 konnten keine offensichtlichen Mängel festgestellt werden.

Trägt man die pro Tag verbrauchte Wärmemenge in diesem Strang über der Außentemperatur auf (Abbildung 71), erkennt man den deutlichen Zusammenhang. Da die Zuluft in einigen Lüftungsanlagen auch be- oder entfeuchtet wird und die Warmwasserbereitung täglich in Betrieb ist, ergeben sich auch Wärmeverbräuche bei Außentemperaturen über 20 °C. Dabei stellt der Warmwasserbereiter allerdings nur eine Grundlast von 40 kW (Wochenende) bis 100 kW (Wochentag) dar.

Die maximale registrierte Leistung für den Abgang RLT lag im Jahr 2007 bei 350 kW, im Jahr 2008 bei 300 kW. Das ist insofern auffällig, als die dahinter liegenden Wärmeabnehmer insgesamt eine installierte Leistung von über 1.076 kW haben. Genau kann die installierte Leistung jedoch nicht bestimmt werden, da für drei kleinere Heizkreise keine Planzahlen für die Anschlussleistung in den Unterlagen zu finden waren. Dies deutet darauf hin, dass zumindest dieser Wärmezähler zu geringe Werte ermittelt.

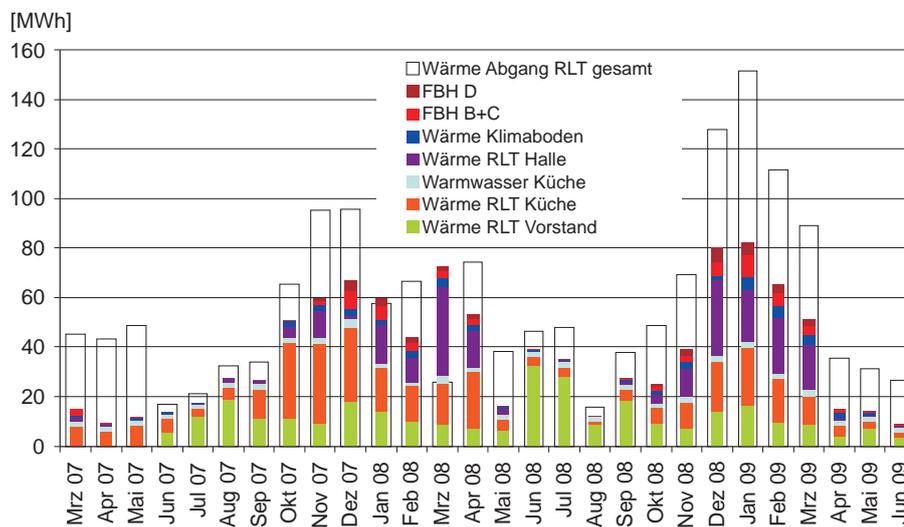


Abbildung 70: Monatliche Wärmemengen des Wärmezählers im Abgang „RLT“ und der dahinter liegenden erfassten Abgänge für Fußbodenheizung, Warmwasser und RLT-Anlagen

RLT Küche Die Vorstandsküche im 9. OG des Bauteils C verfügt über eine Lüftungsanlage. Die Zuluft wird bei Bedarf über einen Wärmetauscher erwärmt. Die installierte Leistung des Wärmetauschers beträgt 135 kW, im Jahr 2007 betrug die maximal über den Wärmemengenzähler aufgezeichnete Leistung 110 kW, im Jahr 2008 waren es 100 kW. Abbildung 72 stellt die täglichen Wärmemengen in Abhän-

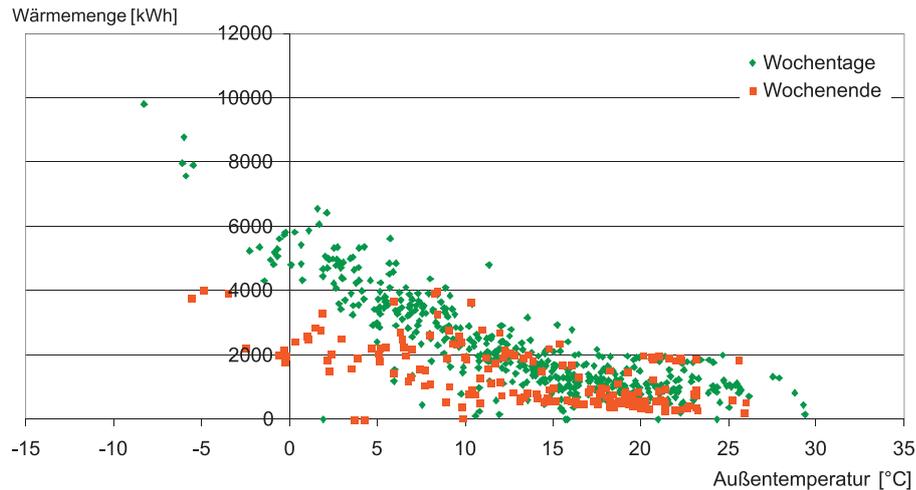


Abbildung 71: Die täglichen Gesamtwärmeverbrauchswerte im Abgang RLT über der Außenlufttemperatur

gigkeit von der Temperatur der Außenluft dar. Die Verbräuche bei einer bestimmten Außentemperatur streuen z.T. sehr stark, was daran liegt, dass die Küche und somit auch die Lüftungsanlage an verschiedenen Tagen unterschiedlich lang betrieben wird. An den Wochenenden wird die Küche meist nicht betrieben. Wenn sie am Wochenende genutzt wird, ist der Wärmeverbrauch ähnlich groß wie unter der Woche.

Im Jahr 2007 wurden für die Erwärmung der Zuluft Küche ca. 173,2 MWh benötigt, was einer mittleren Leistung von 19,8 kW über das ganze Jahr entspricht. Die Laufzeit der Anlage während des Jahres 2007 betrug rund 6.400 Stunden, wodurch sich eine reale mittlere Leistung während der Laufzeit von 27 kW ergibt.

Bereits im Jahr 2008 sind die Auswirkungen einer verbesserten Regelung der Anlage zu erkennen. Im Jahr 2009 sind nur noch Punkte im unteren Bereich der Punkteschar zu erkennen. Bei einer Außentemperatur von 20 °C wird keine Wärme mehr benötigt, bei 10 °C liegt der tägliche Wärmeverbrauch bei ca. 400 kWh.

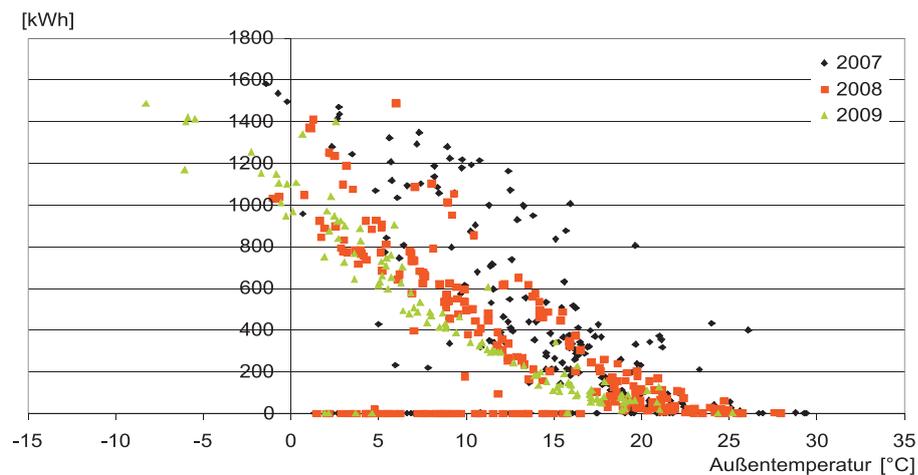


Abbildung 72: Tägliche Wärmeverbrauchswerte der RLT „Küche“ in Abhängigkeit von der tagesmittleren Außenlufttemperatur

RLT Halle Die Lüftungsanlage der Halle ließ bis März 2008 kein regelmäßiges Lüftungsschema erkennen. An vielen Tagen ging sie um 6 Uhr morgens in Betrieb, manchmal auch bereits um 5 Uhr. An vielen Tagen lief sie bis 17:30 Uhr, manchmal noch auf geringer Stufe bis 21 Uhr weiter. Die Anlage lief nicht im Dauerbetrieb, aber offensichtlich auch nicht nur an Tagen mit Veranstaltungen. Manchmal befand sich die Anlage im Dauerbetrieb. Auf die erhöhten Betriebszeiten wird in Kapitel 4.3.5 eingegangen. Der Wärmeverbrauch für die Zulufterwärmung hängt stark von diesen Betriebszeiten ab. Deshalb streuen die täglichen Wärmeverbräuche auch relativ breit, wenn man sie über dem Tagesmittel der Außenlufttemperatur aufträgt (Abbildung 73).

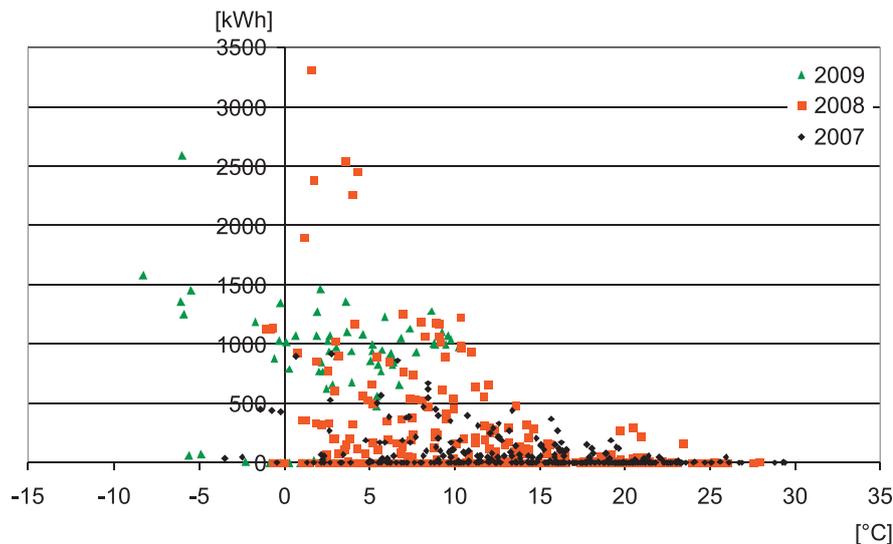


Abbildung 73: Tägliche Wärmeverbrauchswerte für die Konditionierung der Zuluft in der „RLT Halle“ in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Die 2007 maximal registrierte Leistungsaufnahme über den Wärmemengenzähler lag bei 120 kW, im Jahr 2008 bei 130 kW, während die installierte Leistung laut Plänen bei 163 kW liegt.

Im Jahr 2008 lag der gemessene Jahresverbrauch mit 116,7 MWh um 146 Prozent höher als im Jahr 2007, als die Halle weniger für Veranstaltungen genutzt wurde und der Wärmeverbrauch bei 47,5 MWh lag. Betrachtet man die monatlichen Verbrauchszahlen fallen der März 2008 und November 2008 mit extrem hohen Werten auf.

RLT Vorstand Bei der Lüftungsanlage für den Vorstandsbereich handelt es sich um eine Vollklimaanlage mit Be- und Entfeuchtung. Für die Konditionierung der Luft in der Lüftungsanlage des Vorstandes wurden im Jahr 2007 128 MWh Wärme benötigt. Die Darstellung der täglichen Wärmeverbräuche über der Außentemperatur in Abbildung 74 zeigt abnehmende Verbräuche bis zu einer Temperatur von ca. 15°C. Eine Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte der Außenluft ist hier nicht erkennbar. Oberhalb von 15°C wird ebenfalls Wärme benötigt, dann nämlich für den Prozess der Luftentfeuchtung. Hier lässt sich eine Abhängigkeit von der Luftfeuchte erkennen. Bei Luftfeuchten über 80% ist die täglich benötigte Wärmeenergie tendenziell höher, als wenn die Luftfeuchte zwischen 60 und 80 % liegt oder gar geringer als 60 % ist.

Die höchste verzeichnete Wärmeleistung lag 2007 bei 70 kW, im Jahr 2008 bei 80 kW. Der Wärmemengenzähler ist so eingebaut, dass er die Wärmemenge des Vorerhitzers (321 kW) und des Nacherhitzers (118 kW) gemeinsam erfasst.

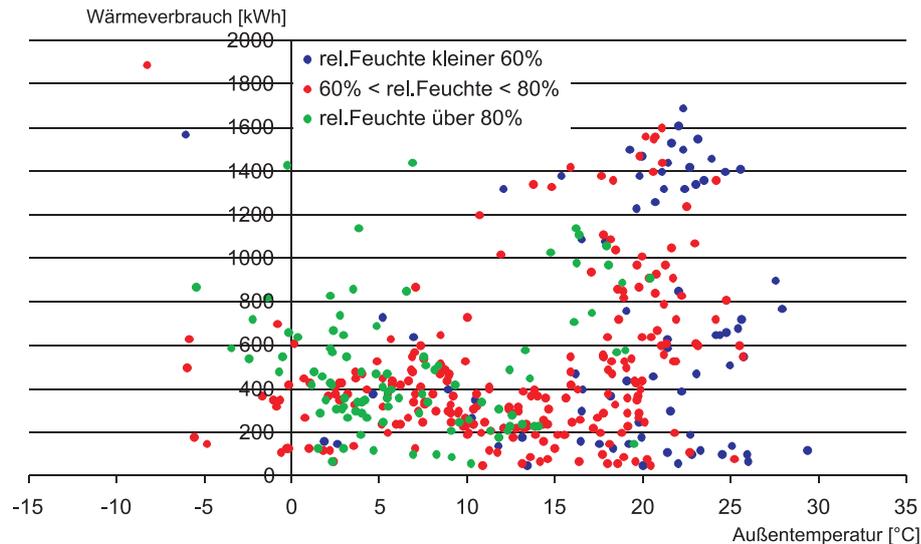


Abbildung 74: Tägliche Wärmemengen für die Zu-/Abluftanlage „Vorstand“ in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur, klassiert nach der relativen Feuchte der Zuluft

4.2.6. Warmwasser

Das Warmwasser für die Handwaschbecken in den WCs und in den Putzräumen wird dezentral in Durchlauferhitzern erzeugt. Im Rahmen dieses Projektes sollten eigentlich Messungen mit mobiler Messtechnik Aufschluss über die Verbräuche an verschiedensten Stellen im Gebäude geben. Dazu war es geplant, jeweils über 4 Wochen möglichst viele Warmwasserbereiter zu erfassen, daraus einen Mittelwert zu bilden und diesen auf das gesamte Gebäude hochzurechnen.

Im Laufe der Planung wurde aber klar, dass die Leitungen in den Elektroverteilkästen aufgrund von Sicherheitsbestimmungen derart gut isoliert werden mussten, dass es durch die Planer als unmöglich beschrieben wurde, später mit akzeptablem Aufwand die Spannung für eine Lastgangmessung in den Verteilern abgreifen zu können. Daraufhin war festgelegt worden, vier Verteilerkästen mit einfachen Stromzählern dauerhaft auszustatten. Diese werden nicht über die GLT ausgelesen, sondern monatlich durch das Facility Management.

Einer der Zähler muss als nicht repräsentativ angesehen werden, da das Geschoss nur mit ungewöhnlich geringer Personenanzahl belegt ist. Der Mittelwert der übrigen Zähler ergibt pro Durchlauferhitzer einen Jahresverbrauch von 100 kWh. Auf das gesamte Gebäude umgelegt ist das ein Jahresverbrauch von 5.985 kWh für die dezentrale Warmwassererzeugung im Jahr 2007 bzw. 4.634 kWh im Jahr 2008.

Abgesehen von den Durchlauferhitzern wird Warmwasser an zwei Stellen im Gebäude zentral über den Wärmekreislauf erzeugt: für die Duschen im Untergeschoss des Bauteils B und für die Küche in Bauteil B. Hier wurden jeweils Wärmemengenzähler eingebaut, die über die GLT auslesbar sind. Im ersten Jahr ergab sich für die Warmwasserbereitung für die Duschen ein Jahresverbrauch von 21.930 kWh (gegenüber 15.710 kWh 2008), für die Küche von 26.370 kWh (gegenüber 26.800 kWh 2008). Spezifisch auf die Gesamtfläche des Gebäudes umgerechnet sind das 1 kWh/m²a bzw. 1,20 kWh/m²a (jeweils Nutzenergie). Für die beiden Wärmetauscher ist in der GLT jeweils eine Betriebszeit von täglich 4:00 bis 0:00 Uhr eingetragen. Die maximale registrierte Leistungsaufnahme (Stundenmittel) lag sowohl 2007 als auch 2008 für die Duschen bei 20 kW, während die installierte Leistung bei 33 kW liegt. Für die Warmwasserbereitung der Küche wurden 2007 maximal 50 kW und 2008 maximal 40 kW aufgezeichnet. Die Auslegungleistung beträgt hier 67 kW.

Abbildung 75 zeigt die monatlichen Energiemengen für die Warmwassererzeugung. Der Verbrauchswert für die Duschen schwankt jahreszeitenunabhängig, für die Warmwassererzeugung der Küche kann eine leichte Abhängigkeit von der Außentemperatur nachgewiesen werden: wenn diese zunimmt, werden geringere Wärmeverbrauchswerte registriert.

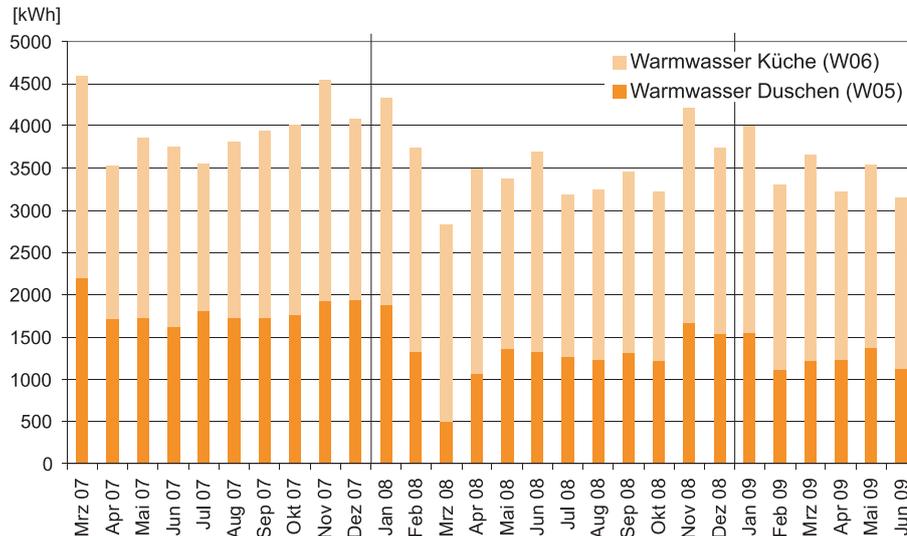


Abbildung 75: Monatliche Wärmemengen für die zentrale Warmwasserbereitung

4.2.7. Hilfsenergie Heizen

Der Energieverbrauch für die Hilfsenergie beim Heizen, sprich der Stromverbrauch für die Umwälzpumpen, wurde über die Vollbetriebsstunden und die Leistungsaufnahme der jeweiligen Pumpen berechnet. Dazu wurden die in der Gebäudeleittechnik aufgeschalteten Betriebsstundenzähler mehrmals vor Ort ausgelesen. Eine Ermittlung der Betriebsstunden war nicht immer möglich, da die Zähler bei unterschiedlichen, nicht bekannten Zählerständen wieder auf 0 zurücksprangen.

Anhand ermittelten Betriebsstunden wurden dann Vollbetriebsstunden geschätzt, die jeweils mit der Leistungsaufnahme der einzelnen Pumpe multipliziert und dann addiert wurden. Insgesamt ergab sich für die Hilfsenergie bei der Heizung ein Stromverbrauch von 124,4 MWh, spezifisch 5,8 kWh/m²a. Die Tabelle 20 stellt die einzelnen Fakten zu den Umwälzpumpen zusammen.

ID	Bezeichnung	Anzahl	Leistungsaufnahme [kW]	2008	2009
P1	Kesselkreispumpe	2	1,10	+4.400	
P2	Hauptversorgung	2	11,00	+4.400	
P3	Fußbodenheizung BT A	2	0,20	+1.000	
P4	statische Heizung	2	1,65	+1.000	
P5	RLT-Anlage A01 Umkleide	1	0,20	2.870	
P6	RLT-Anlage A03 Halle EG	1	0,20	3.380	
P7	RLT-Anlage A09 Catering	1	0,02	2.270	
P8	RLT-Anlage A02 Tresor	1	0,20	2.630	
P9	RLT-Anlage C08 Sitzungssaal	1	0,20	1.860	
P10	RLT-Anlage C08 Sitzungssaal	1	0,20	1.860	
P11	RLT-Anlagen BT C, 10. OG	2	0,63	+2.000	
P12	Fußbodenheizung Klimaboden	1	0,20	3.140	1.440
P13	Fußbodenheizung BT B/C	2	0,20	+1.000	
P14	RLT-Anlage C02 innenliegende Räume	1	0,20	2.880	2.830
P15	Fußbodenheizung BT D	1	0,20	2.200	2.200
P15/2	Fußbodenheizung BT D	1	0,20	2.200	2.200
P16	RLT-Anlage D01 Vorstand NE	1	0,20	1.590	1.090
P17	RLT-Anlage D01 Vorstand LE	1	0,37	1.710	
P18	RLT-Anlage C05 Küche	1	0,20	2.320	
P19	RLT-Anlage C07 Teeküche	1	0,20	2.100	
P20	RLT-Anlage C09 Besprechung	1	0,20	3.110	
P6	Wärmerückgewinnung RLT Halle	1	0,20	1.570	
	RLT-Anlage C08 Sitzungssaal Be- feuchter	1	*0,20	390	
	Wärmezubringer Dachgeschoss BT C Pumpe 1	1	*0,20	2.090	1.820
	Wärmezubringer Dachgeschoss BT C Pumpe 2	1	*0,20	2.280	2.540
P5	RLT-Anlage D01 Vorstand WRG	1	0,37	1.710	1.330
	RLT-Anlage 12 Speiseräume LE- Pumpe	1	*0,20	1.850	1.740
	RLT-Anlage 11 Spülküchen LE-Pumpe	1	*0,20	2.900	2.780
	BT C Warmwasser Ladepumpe	1	*0,20	360	1.090
	BT C Zirkulationspumpe	1	*0,20	3.220	3.650
	BT B Warmwasser Ladepumpe	1	*0,20	3.320	3.000
	RLT A 12 Torluftschleier	1	*0,20	2.030	2.350

Tabelle 20: Ermittelte jährliche Vollbetriebsstunden der Wärmeumwälzpumpen, die aus den Betriebsstunden in der GLT ermittelt wurden. Bei fehlenden Daten wurden die Vollbetriebsstunden geschätzt, diese sind mit einem + markiert. Die aus den Ausführungsplänen ersichtlichen Pumpen sind mit der entsprechenden ID versehen. Unbekannte Leistungsaufnahmen wurden geschätzt und mit einem * versehen.

4.3. Lüften

Der Großteil der Fläche, nämlich die Standardbüros ab dem 1. OG aufwärts, wird über Nachströmöffnungen in der Fassade belüftet und insgesamt vier zentrale Abluftanlagen entlüftet. Bereiche wie Sitzungssaal, Halle, Küche und Vorstandsetagen sind mit Zu- und Abluftanlagen ausgestattet. Genaue Informationen zum Lüftungskonzept finden sich in Kapitel 2.4.

Für die Energiebedarfswerte der Lüftungsanlagen wurden in der Planungsphase Abschätzungen vorgenommen. Dazu wurden geplante Betriebszeiten, Volumenströme und übliche Anlagenkennwerte verwendet. Wo keine Zahlen der Fachplaner vorlagen, wurden Richtwerte aus dem LEE (z.T. mit Sicherheitszuschlag) [4] herangezogen. Im Anhang sind diese Planungswerte für die einzelnen Lüftungsanlagen aufgelistet (Kapitel A.2 Tabelle 46). In den folgenden Kapiteln werden die Auswertungen einzelner gemessener Lüftungsanlagen dargestellt und wenn möglich mit den Zahlen aus der Planung verglichen.

Der ermittelte spezifische Endenergieverbrauch für die Luftförderung lag im Jahr 2007 bei 10,7 kWh/m²a. Im Jahr 2008 ist er leicht auf 10,0 kWh/m²a gesunken. In Tabelle 21 sind die absoluten und spezifischen Kennwerte für 2007 und 2008 der einzelnen Anlagen aufgeführt. Abbildung 76 stellt die Jahresgesamtwerte der einzelnen erfassten Anlagen grafisch dar. Insbesondere im dritten Messzeitraum (Juli 2008 bis Juni 2009) sind die Werte deutlich gesunken.

ID	Bezeichnung	Jahresverbrauch 2007 + 2008 [kWh]	Flächenspezifischer Jahresverbrauch (Endenergie) [kWh/m ² a]	Bezugsfläche [m ²]
S06	RLT Halle EG	48.157	32,36	1.488
		39.494	26,54	1.488
S04	RLT Küche Zuluft	22.929	184,91	124
		18.825	151,81	124
S53	RLT Küche Abluft	35.437	285,78	124
		31.627	255,06	124
S07	RLT Vorstand Zuluft	22.301	15,38	1450
		18.317	12,63	1.450
S49	RLT Vorstand Abluft	18.500	12,76	1450
		15.103	10,42	1.450
S17	RLT Sitzungssaal Zuluft	7577	32,52	233
		8.529	36,61	233
S50	RLT Sitzungssaal Abluft	4948	21,24	233
		3.882	16,66	233
S22	Abluftanlage WC1 exemplarisch	7.724	0,35	21.875
		6.007	0,27	21.875
S23	Abluftanlage WC2 exemplarisch	1.258	0,06	21.875
		1.158	0,05	21.875

Tabelle 21: Gemessene Hilfsenergie Lüftung, Werte für 2007 befinden sich jeweils in der ersten Zeile, Werte für 2008 in der zweiten Zeile. Wo möglich wurden die Werte auf die jeweilige Fläche bezogen, sonst auf die NGF des gesamtem Gebäudes

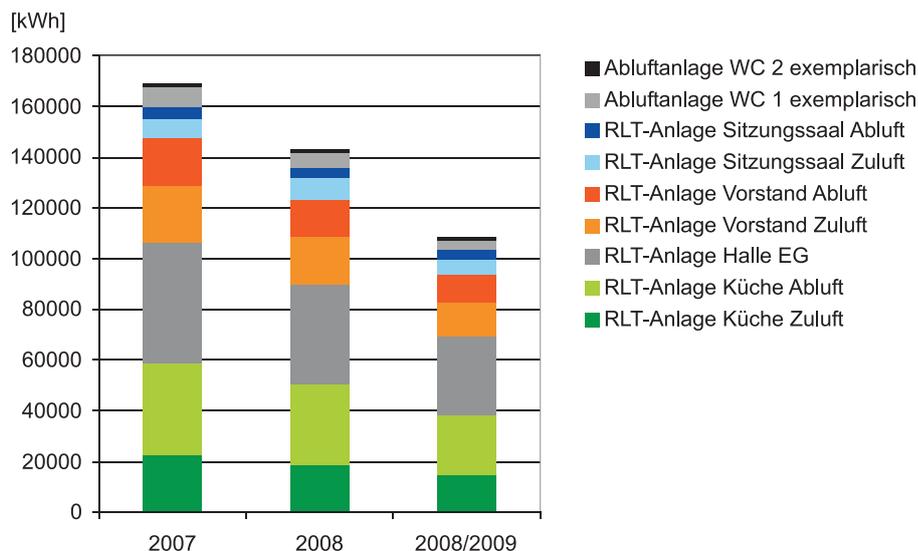


Abbildung 76: Entwicklung des Jahresstromverbrauchs der gemessenen RLT-Anlagen

4.3.1. Zentrale Abluftanlage

Zur Ermittlung des Stromverbrauchs der zentralen Abluftanlage zur Unterdruckbelüftung der Standardbüros wurde exemplarisch ein Stromzähler am Ventilator des Bauteils B installiert. Temperatur und CO₂-Gehalt der zentralen Abluft wurden ebenfalls aufgezeichnet.

Die Summenhäufigkeit in Abbildung 77 zeigt, dass zu 17% der Zeit die Leistungsaufnahme des Ventilators über 3 kW und zu 30% der Zeit über 2 kW liegt. Ca. 50% der Zeit liegt die Leistungsaufnahme zwischen 1 und 2 kW. Die im ersten Jahr maximal registrierte Leistungsaufnahme lag bei ca. 5,5 kW.

Der ermittelte Jahresstromverbrauch für die Abluftanlage im Bauteil B lag in den ersten beiden Jahren bei 16,2 bzw. 19,6 MWh. Im dritten Messzeitraum von Juli 2008 bis Juni 2009 betrug er nur 13,3 MWh, was im Wesentlichen auf die Komplettabschaltung von Januar bis Mai 2009 zurückzuführen ist. Der Jahresstromverbrauch für alle vier zentralen Abluftanlagen im Gebäude wurde für das Jahr 2007 auf 56,7 MWh und für das Jahr 2008 auf 68,6 MWh hochgerechnet. Auf die gesamte Energiebezugsfläche umgelegt ergab sich ein spezifischer Endenergieverbrauch von 2,6 bzw. 3,1 kWh/m²a. Dabei ist zu beachten, dass im Bauteil D nur bis zum 6. Obergeschoss die Räume durch eine Abluftanlage belüftet werden, die Räume darüber verfügen über eine Zu-/Abluftanlage.

Die Betriebsstunden der Anlage betragen im Jahr 2007 8.287 Stunden. Über eine Analyse der Summenhäufigkeit wurde ein Umrechnungsfaktor von Betriebsstunden auf Vollbetriebsstunden ermittelt. Dieser beträgt 32,7 Prozent, so dass für das Jahr 2007 eine Vollbetriebsstundenzahl von 2.710 mit einer Maximalleistung von 5,5 kW berechnet wurde. Die Anlage ist auf einen Volumenstrom von 26.730 m³/h ausgelegt. Eine Maximalleistung von 5,5 kW ergibt einen theoretischen spezifischen Kennwert von 0,21 Wh/m³. Dieser liegt in der Nähe des nach dem Leitfaden für elektrische Energie (LEE, [4]) berechneten einfachen Richtwertes von 0,17, überschreitet den verbesserten Richtwert von 0,12 allerdings beinahe um das Doppelte.

Die Betrachtung der Monatsverbräuche (Abbildung 78) zeigt eine deutliche jahreszeitliche Schwankung. Das ergibt sich durch die Nachtlüftung, die vornehmlich in der wärmeren Jahreszeit automatisch aktiviert wird, und durch einen verringerten Luftwechsel in der Taglüftung bei kälteren Außentemperaturen, der zur Senkung der Lüftungswärmeverluste implementiert wurde.

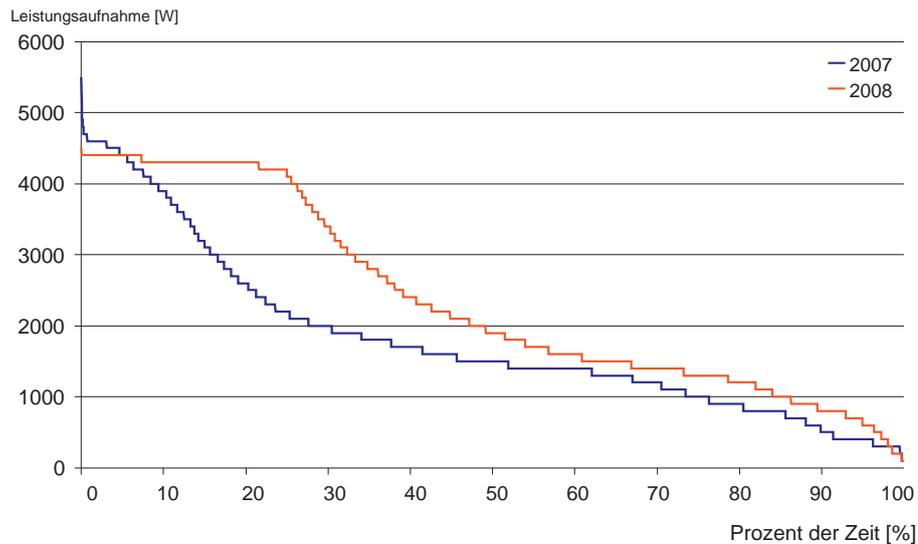


Abbildung 77: Dauerlinie der elektrischen Leistungsaufnahme der Abluftanlage für die Regelbüros, Bauteil B, für 2007 und 2008

Trägt man den täglichen Stromverbrauch des Abluftventilators über der Außentemperatur auf, lassen sich zwei unterschiedliche Cluster der gemessenen Werte erkennen (Abbildung 79). Die höheren Werte lassen sich ziemlich deutlich der Sommerperiode von Mai bis Oktober zuordnen, die niedrigeren Werte der Winterperiode. Es scheint keinen fließenden Übergang zu geben, in der Gebäudeleittechnik wurde aber auch kein explizites Jahreszeiten-Programm gefunden. Da es laut Planung eine eindeutige Abhängigkeit von der Außentemperatur geben sollte, ist ein Fehler in der Programmierung zu vermuten.

Es konnte festgestellt werden, dass im Winter nachts die zentrale Abluft in Betrieb ist, obwohl - außer bei der Nachtauskühlung im Sommer - keine Nachtlüftung vorgesehen ist. Erst morgens ab 4:30 Uhr soll eine Morgenlüftung in Betrieb sein (sowohl im Winter als auch im Sommer), um bei Beginn der Arbeitszeit eine ansprechende Luftqualität im Raum zu gewährleisten. Während der Nutzungszeit soll eine zyklische Lüftung stattfinden, die abhängig von der Außentemperatur unterschiedlich lange Zykluszeiten hat. In den Räumen mit einer Stufe in der Decke (der Coanda-Effekt funktioniert nicht) ist diese zyklische Lüftung abgeschaltet worden. Hier gibt es nur auf Anforderung durch den Nutzer eine mechanische Lüftung.

Analysen der Datenpunkte zur Lüftung des Einzelraumes bestätigen diese Beobachtungen. Abbildung 80 zeigt, dass in kalten Monaten zwar während der Anwesenheit des Nutzers die Nachströmklappen in den Büros weniger geöffnet sind. In den Nachtstunden sind aber deutliche Öffnungszeiten der Klappen erkennbar, die z.B. im Januar und Februar noch ungefähr die Hälfte der Lüftungszeiten in der warmen Jahreszeit betragen. Außerdem sieht man deutlich, dass auch in kalten Monaten nachts mehr gelüftet wird als tagsüber, obwohl es aus energetischer Sicht andersherum sein sollte.

In der Gebäudeleittechnik gibt es 3 Datenpunkte pro Raum, welche die Morgenlüftung, die Nachtlüftung und die Taglüftung regeln. Die Morgenlüftung ist eine Spülung am Morgen, die ursprünglich abhängig von der Außentemperatur zwischen 0 und 60 Minuten pro Stunde liegen sollte.

Allerdings zeigen die Aufzeichnungen, dass die Dauer der Morgenlüftung von der Außentemperatur unabhängig von Dienstag bis Freitag 30 Minuten und am Montag 60 Minuten beträgt. Am Wochenende ist die Morgenlüftung wie geplant nicht in Betrieb.

Die Taglüftung sah ursprünglich in jedem Büro während der gesamten Nutzungszeit eine zyklische Lüftung vor, die je nach Außentemperatur zwischen 0 und 60 Minuten pro Stunde die Nachströmöffnung

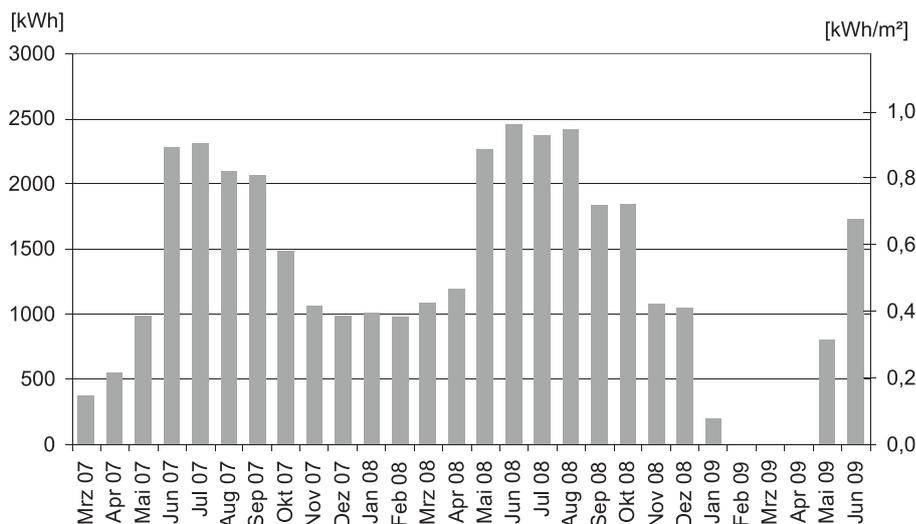


Abbildung 78: Absolute und spezifische Monatsstromverbrauchswerte der Abluftanlage für die Regelbüros in Bauteil B, von Januar bis Mai 2009 war die Anlage ausgeschaltet

und das Ventil im Abluftkanal öffnen sollte. Diese Regelung wurde jedoch in Räumen mit einer positiven Stufe in der Decke während der Präsenz des Nutzers unterbunden. Die Nutzer hatten sich in diesen Büros durch die abfallende Kaltluft gestört gefühlt.

In Abbildung 81 ist die Dauer der täglichen Einschaltzeiten der Taglüftung als Mittelwert für sechs untersuchte Räume dargestellt. Man erkennt, dass im Sommer 2007 noch lange Lüftungszeiten während der Wochentage mit bis zu 11 Stunden vorkamen. Zum Winter hin werden die Zeiten kürzer, was einer außentemperaturabhängigen Regelung entsprechen würde. Dann aber werden die Zeiten zum Sommer hin nicht mehr länger. Und das gilt für alle sechs Räume, unabhängig davon, wie groß und in welche Richtung die Stufe in der Decke ausgeformt ist.

Die Nachtlüftung dagegen hat sehr lange Einschaltzeiten und das auch während der Übergangszeiten und im Winter, obwohl sie eigentlich nur zur Nachtauskühlung im Sommer dienen soll. Das Haupt-Einschaltkriterium ist, dass die Raumtemperatur höher als die eingestellte Soll-Kühltemperatur ist bzw. höchstens 3 Kelvin darunter liegt. Hier könnte das Problem liegen, denn wird in der Übergangszeit z.B. eine Soll-Kühltemperatur von 25 berücksichtigt, so würde bereits ab einer Raumtemperatur von 22°C (auf die tagsüber geheizt wird) die Nachtlüftung aktiviert werden. Hier muss die eingestellte Regelung genauer untersucht werden.

Abbildung 82 zeigt einen der sechs Räume im Jahr 2008, in dem die Nachtlüftungszeiten auffällig lang waren. Dargestellt wird die Dauer der Nachtlüftung pro Tag in Stunden. Man sieht, dass an den Wochenenden die sogenannte Nachtlüftung rund um die Uhr eingeschaltet ist, also die Nachströmöffnung im Büro geöffnet ist.

Am 7.1.2009 wurden die Abluftanlagen aller vier Bauteile testweise komplett abgeschaltet und erst am 18.5.2009 wieder eingeschaltet. Die Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch wurden bereits in Kapitel 4.2.3 beschrieben. Trotz der Abschaltung der zentralen Abluft waren aber die Nachströmöffnungen in den einzelnen Büros weiterhin in Betrieb. Durch Winddruck und Querlüftungseffekte gelangte also nachwievor kalte Außenluft in das Gebäude und trug somit zu unnötig erhöhten Lüftungswärmeverlusten bei.

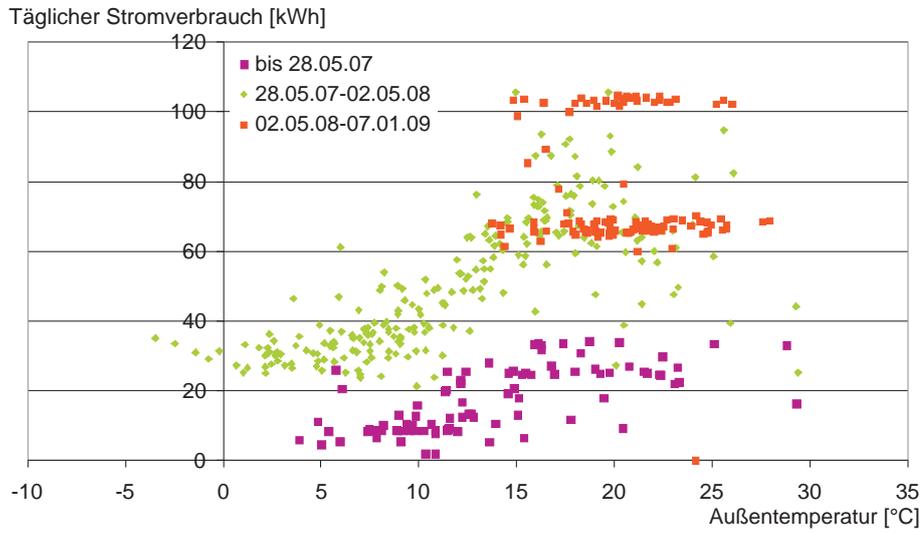


Abbildung 79: Tagesstromverbrauch des Abluftventilators in Bauteil B über der Außenlufttemperatur

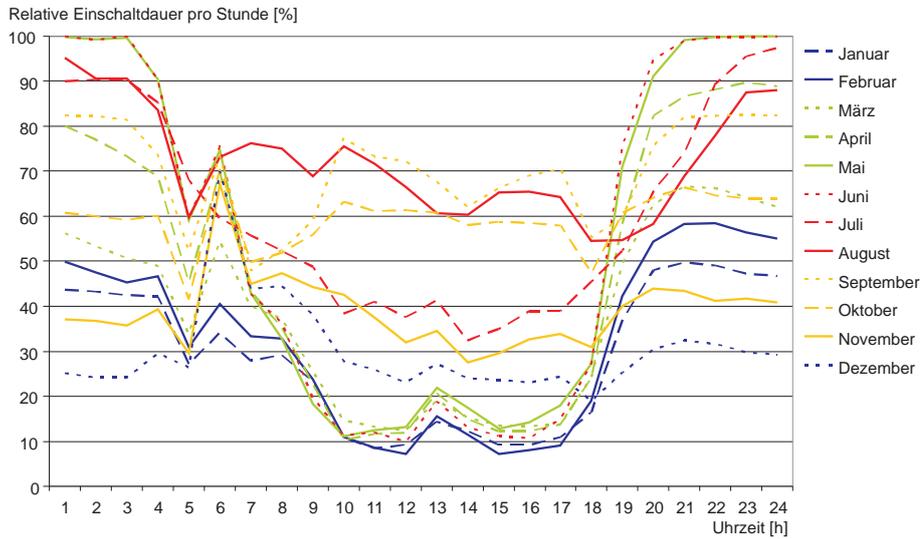


Abbildung 80: Einschaltdauer pro Stunde der mechanischen Abluft in den sechs exemplarisch betrachteten Büros im Tagesverlauf, gemittelt über den jeweiligen Monat

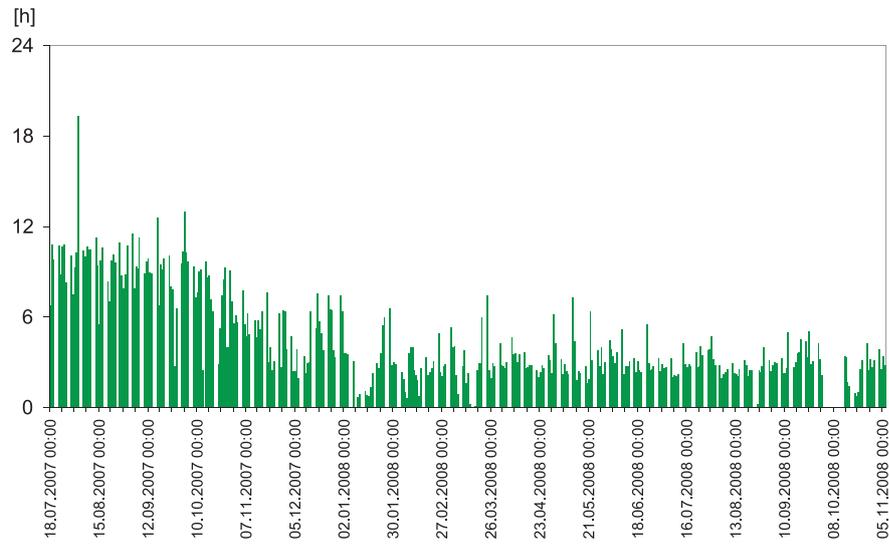


Abbildung 81: Lüftungsdauer der „Taglüftung“ pro Tag als Mittelwert der sechs Büros

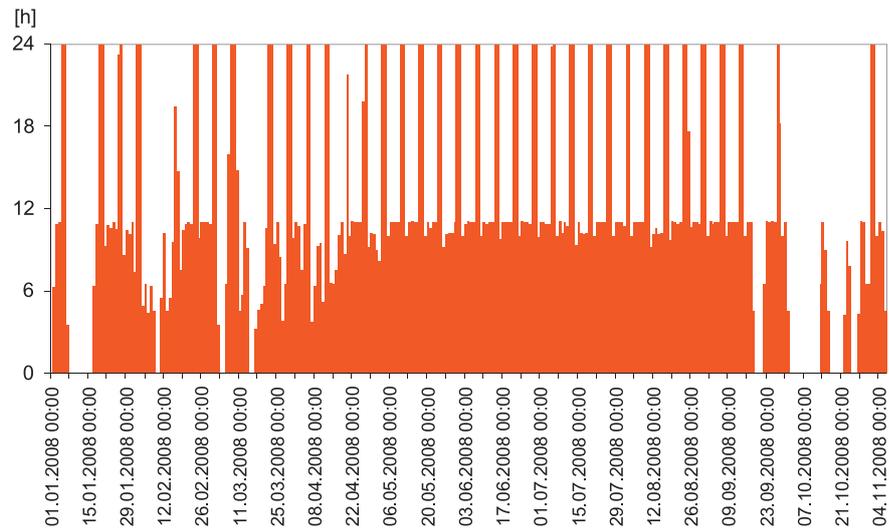


Abbildung 82: Lüftungsdauer der „Nachtlüftung“ pro Tag in einem exemplarischen Büro

4.3.2. Druckdifferenzen

Speziell zur Funktionsprüfung des Lüftungskonzeptes wurden in sechs Büros Druckdifferenzsensoren zur Messung des Differenzdrucks zwischen innen und außen installiert (siehe Kapitel 3.3.2). Wie bereits beschrieben, wurden nur selten Ausschläge festgestellt, die Funktionstüchtigkeit der Sensoren konnte aber nachgewiesen werden.

Tests mit Rauchröhrchen und Messungen von Temperaturen an verschiedenen Nachströmöffnungen zeigten jedoch, dass eine Durchströmung der Zuluftelemente stattfindet. Die Messungen wurden vom 24.06.2008 bis 16.07.2008 im Rahmen eines Projektes der Universität Wuppertal [23] durchgeführt, welches das fbta durch ergänzende Messungen unterstützte (Abbildung 83).

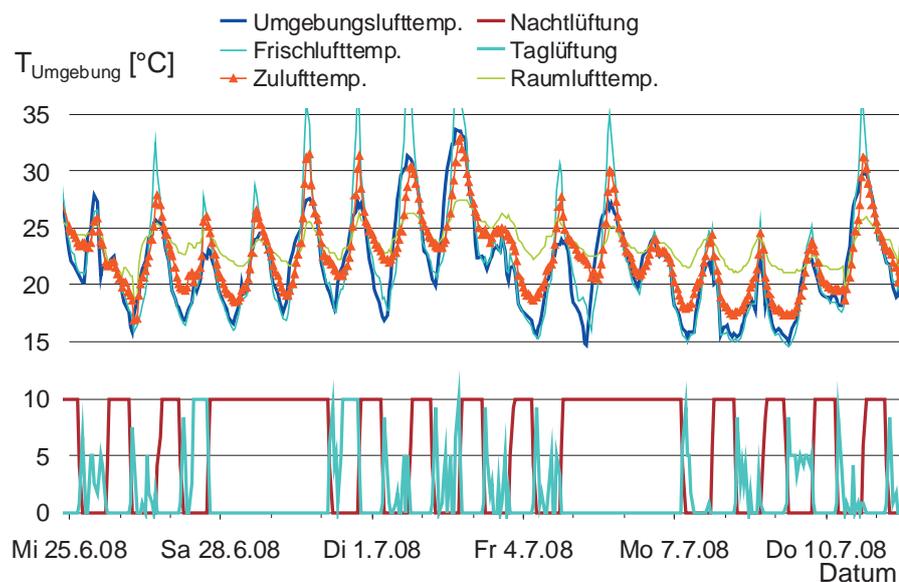


Abbildung 83: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperaturen und der Betriebsweisen der Lüftungsanlage. Auffällig ist, dass die Steuerung der Lüftungsanlage beim Aktivieren der Nachtlüftung scheinbar nicht die Umgebungstemperaturen als Steuerungsparameter berücksichtigt. So beginnt die Nachtlüftung unabhängig von den Umgebungslufttemperaturen stets gegen 17:30 Uhr. An den Wochenenden wird die Lüftungsanlage permanent im Lüftungsmodus betrieben – auch bei Zulufttemperaturen, die über den Raumtemperaturen liegen. Quelle Grafik und Bildunterschrift: btga Wuppertal [23]

Nachteilig wirken sich auf einen definierten Unterdruck in den Büros allerdings die offenstehenden Bürotüren aus. Dies hat zur Folge, dass durch den im Büro erzeugten Unterdruck auch Luft aus den Fluren und den Treppenhäusern nachströmt. Dies wurde noch begünstigt durch die Undichtigkeit der Gebäudehülle und insbesondere der Aufzugsschächte (siehe Kapitel 4.2.1). Insbesondere auf der Ostseite der Fassade (oft die windabgewandte Seite) kommt hinzu, dass ein bei höheren Windgeschwindigkeiten ein Windsog entstehen kann, der dem mechanisch erzeugten Unterdruck im Büro entgegenwirkt.

4.3.3. Luftqualität Büros

In den sechs exemplarisch untersuchten Räumen in Bauteil B werden kontinuierlich auch die CO₂-Konzentrationen erfasst. Damit soll überprüft werden, ob durch die automatische mechanische Lüftung und durch manuelles Lüften der Nutzer die nötige Luftqualität erreicht wird. Abbildung 84 zeigt, wie häufig bestimmte CO₂-Konzentrationen überschritten werden. Die Räume schneiden insgesamt sehr gut ab, da 1.500 ppm praktisch nie erreicht werden und die Pettenkofer-Grenze von 1.000 ppm [22] nur

selten überschritten wird. Raum C und D weisen dabei mit 2 und 3 Prozent die höchsten Überschreitungshäufigkeiten auf.

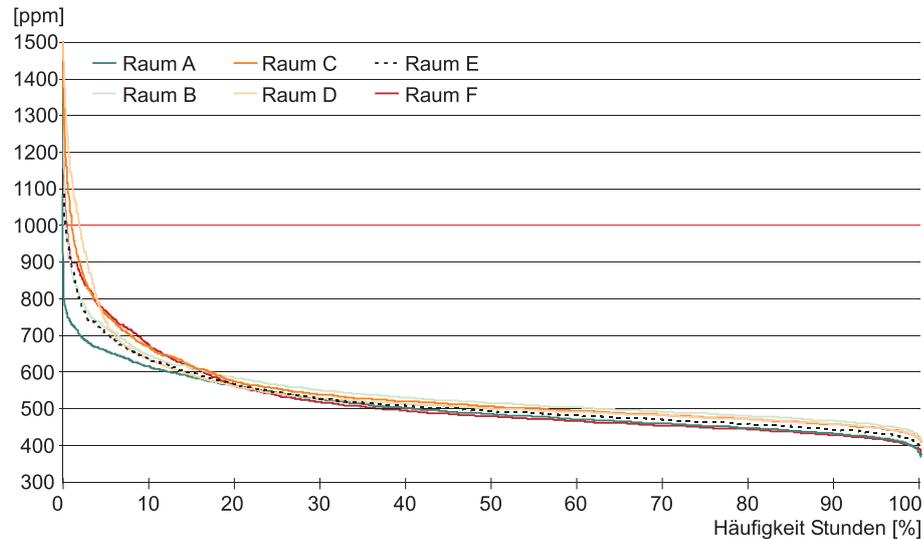


Abbildung 84: Sortierte Dauerlinie der CO₂-Konzentration im Jahr 2007 in den sechs exemplarisch untersuchten Büroräumen, betrachtet wurden alle Stunden im Zeitraum

Außerdem wurde in den gleichen Räumen die relative Luftfeuchte erfasst. Es zeigt sich, dass zu ungefähr 35 % der Zeit die relative Luftfeuchte weniger als 30 % beträgt. Betrachtet man den chronologischen Verlauf erkennt man, dass die niedrigen Werte von bis zu 20% relative Luftfeuchte im Winter auftreten. Dies ist ein generell bekanntes Problem, wird aber in diesem Fall durch den regelmäßigen mechanischen Luftwechsel verstärkt. Eine feuchtere Luft könnte durch die Verringerung der von außen einströmenden Luftmenge oder durch Befeuchtungsmaßnahmen der Luft im Büro erreicht werden.

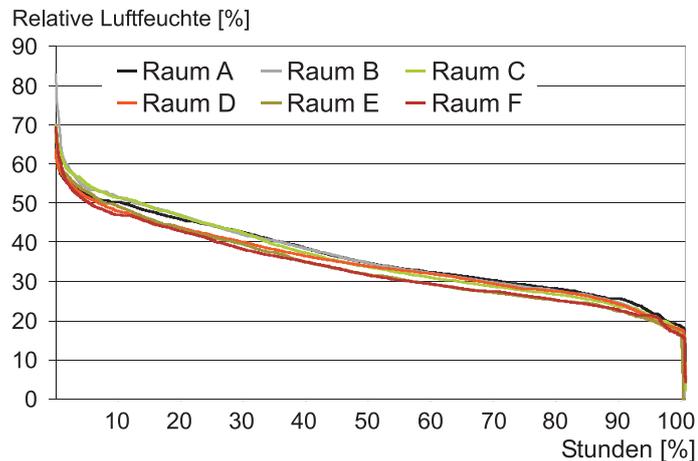


Abbildung 85: Sortierte Dauerlinie der relativen Luftfeuchte in den sechs exemplarisch untersuchten Büroräumen, betrachtet wurden alle Stunden im Zeitraum

4.3.4. Lüftungsanlage Küche

Auch die Stromverbräuche der Lüftungsanlage für die Küche wurden getrennt nach Zu- und Abluft erfasst. Im ersten Jahr wurden für die Förderung der Zuluft 27.700 kWh, für die Förderung der Abluft 38.000 kWh verbraucht. Insgesamt sind das 65.700 kWh (Endenergie), was anteilig am spezifischen Jahresenergieverbrauch des Gebäudes 3 kWh/m²a ausmacht. Bezogen auf die Fläche der Küche (124 m²) sind das 530 kWh/m²a. Das ist deutlich zuviel, zumal in der Planungsphase ein Jahresstromverbrauch von 5.000 kWh für die gesamte Lüftungsanlage anberaumt wurde. Somit lag der gemessene Verbrauch im Jahr 2007 ca. 13-mal so hoch wie abgeschätzt. Im Jahr 2008 konnte der Stromverbrauch auf ca. 50.500 kWh gesenkt werden, eine Reduktion um fast 23 Prozent.

Auf eine mittlere Dauerleistung während des ganzen Jahres umgerechnet ergaben sich für den Zuluftventilator 3,2 kW und für den Abluftventilator 4,3 kW. Betrachtet man die Daten über die gesamte Projektlaufzeit, erkennt man, dass die Lüftungsanlage über lange Zeiträume im Dauerbetrieb lief. So war sie beispielsweise von Mai 2007 bis Dezember 2007 die Anlage im Dauerbetrieb, von Januar 2008 bis Anfang April 2008 ist ein Regelschema für tagsüber nur während der Wochentage erkennbar. Von April 2008 bis Ende Juli 2008 befand die Anlage sich durch eine Fehlbedienung des ehemaligen Betreibers abermals im Dauerbetrieb. Auf einen sinnvollen Betrieb muss kontinuierlich geachtet werden. Abbildung 86 zeigt die Regelung der Anlage anhand der elektrischen Leistungsaufnahme (Zuluftventilator) exemplarisch für den Zeitraum von August bis November 2007 auf.

Die maximale registrierte Leistungsaufnahme des Zuluftventilators lag 2007 bei 4,7 kW, die des Abluftventilators bei 7,1 kW. Mit einem Umrechnungsfaktor von 70 % von Betriebsstunden auf Volllaststunden ergibt sich aus 6.425 Betriebsstunden eine Vollbetriebsstundenzahl von 4.500 h. Der Auslegungsvolumenstrom für die Zuluft der Küche ist mit 10.975 m³/h angegeben, für die Abluft beträgt er 12.000 m³/h. Anhand der maximal gemessenen Leistungsaufnahme der Ventilatoren ergibt sich der spezifische Kennwert der Zuluft zu 0,43 Wh/m³, jener der Abluft zu 0,59 Wh/m³. Zusammen beträgt der Wert 1,02 Wh/m³. Der einfache Richtwert nach LEE [4] beträgt 0,36, der verbesserte Richtwert 0,25 Wh/m³.

Abbildung 87 zeigt die monatlichen Stromverbrauchswerte für den Zuluft- und den Abluftventilator. Dauerhaft ist der Stromverbrauch des Abluftventilators größer als der des Zuluftventilators. In den ersten beiden Jahren sind deutlich höhere Werte in den Sommermonaten erkennbar, ab August 2008 und im Jahr 2009 ist diese Abhängigkeit nicht mehr zu erkennen, die Regelung wurde im August 2008 angepasst.

4.3.5. Lüftungsanlage Halle Erdgeschoss

Der Stromverbrauch für die Lüftungsanlage der Halle wird über einen Gesamtzähler erfasst (Abbildung 88). Diese Lüftungsanlage hat im ersten Jahr einen Jahresverbrauch von 48.160 kWh, im Jahr 2008 waren es nur noch 39.500 kWh (18 Prozent weniger). Bezogen auf die gesamte Gebäudefläche waren das 2,3 bzw. 1,8 kWh/m²a. Bezogen auf die Fläche der Halle waren es im Jahr 2007 32,4 kWh/m²a, im Jahr 2008 26,5 kWh/m²a.

In der Planung war der jährliche Stromverbrauch für die Belüftung der Halle auf 13.000 kWh berechnet worden. Auch hier ergibt sich also ein deutlich höherer gemessener Wert. Allerdings ist hier der Grund bekannt. War nämlich ursprünglich nur eine sporadische Nutzung der Halle für Veranstaltungen geplant, finden zur Zeit wöchentlich, zum Teil sogar mehrmals pro Woche Events im Erdgeschoss statt. Die Nutzungszeit der RLT war mit 600 Stunden im Jahr veranschlagt worden.

Die maximale Leistungsaufnahme der gesamten Anlage lag im Jahr 2007 bei 15 kW, im Jahr 2008 bei 14 kW. Von Februar 2008 bis April 2008 ist die Anlage während einiger hintereinanderfolgender Nächte

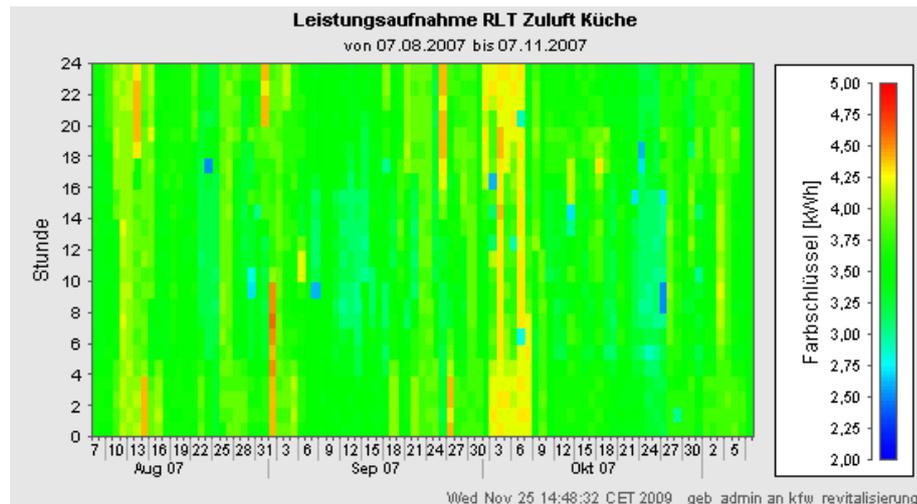


Abbildung 86: Mittlere Stundenleistung des Zuluftventilators der RLT „Küche“ von August bis Oktober 2007

durchgelaufen, was darauf schließen lässt, dass ein aufgrund einer Veranstaltung eingefügtes Zeitprogramm nicht wieder herausgenommen wurde. Diese unbeabsichtigte Vorgehensweise konnte mehrmals während der Laufzeit des Projektes beobachtet werden.

Abbildung 89 zeigt, wie unregelmäßig die Regelung erfolgt. Mit der maximalen Luftmenge von $17.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ergibt sich eine Effizienz von $0,88 \text{ Wh}/\text{m}^3$, die einem einfachen Richtwert von $0,51$ und einem verbesserten Richtwert von $0,36$ nach [4] gegenübersteht.

4.3.6. Lüftungsanlage Vorstand

Der Stromverbrauch der Zu-/Abluftanlage für den Vorstandsbereich wurde über je einen Zähler am entsprechenden Ventilator gemessen. Für die Zuluft ergab sich im ersten Jahr ein Jahresverbrauch von $22,3 \text{ MWh}$, für die Abluft von $18,5 \text{ MWh}$. Insgesamt wurden endenergetisch pro Jahr also ca. $40,8 \text{ MWh}$ für die Luftförderung benötigt. Spezifisch auf das gesamte Gebäude umgelegt waren es $2 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$, nur auf die Fläche des Vorstandsbereiches (1450 m^2) bezogen ergaben sich $30 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$. Im Jahr 2008 wurden $18,3 \text{ MWh}$ Stromverbrauch für die Zuluft und $15,1 \text{ MWh}$ für die Abluft gemessen. Damit reduzierte sich der Stromverbrauch im Jahr 2008 insgesamt um 18 Prozent.

In einem Primärenergie-Bericht von ip5 wurde im Jahr 2003 ein Bedarfswert von ca. 5 MWh ermittelt. Demgegenüber stehen im Jahr 2007 $40,8 \text{ MWh}$, also mehr als 8-mal soviel. In der Bedarfsberechnung wurde mit 2.750 Vollbetriebsstunden, mit $9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ Luftwechsel und mit einem Kennwert von $0,54 \text{ Wh}/\text{m}^3$ gerechnet.

Für das Jahr 2007 ergaben sich 7.420 Betriebsstunden, die umgerechnet ca. 1.500 Vollbetriebsstunden ergeben. Ein längerer Betrieb der Anlage führte also nicht zum dem stark erhöhten Verbrauch.

Die maximal registrierte Leistungsaufnahme pro Ventilator betrug im Jahr 2007 15 kW . Errechnet man anhand dieses Wertes und eines maximalen Volumenstroms von $24.700 \text{ m}^3/\text{h}$ die Effizienz der Lüftungsanlage, erhält man den Kennwert $1,21 \text{ Wh}/\text{m}^3$, der deutlich über dem einfachen Richtwert von $0,51$ und dem verbesserten Richtwert von $0,36$ gemäß LEE [4] liegt. Im Jahr 2008 betrug der Jahresstromverbrauch durch geringere Betriebszeiten und eine verbesserte Regelung nur noch $33,4 \text{ MWh}$.

Abbildung 90 zeigt die monatlichen Stromverbrauchswerte der beiden Ventilatoren im Vergleich. Im Carpetplot (Abbildung 91) lassen sich die unterschiedlichen Schaltzeiten, die Morgenspülung und ein verringerter Betrieb außerhalb der Nutzungszeit erkennen.

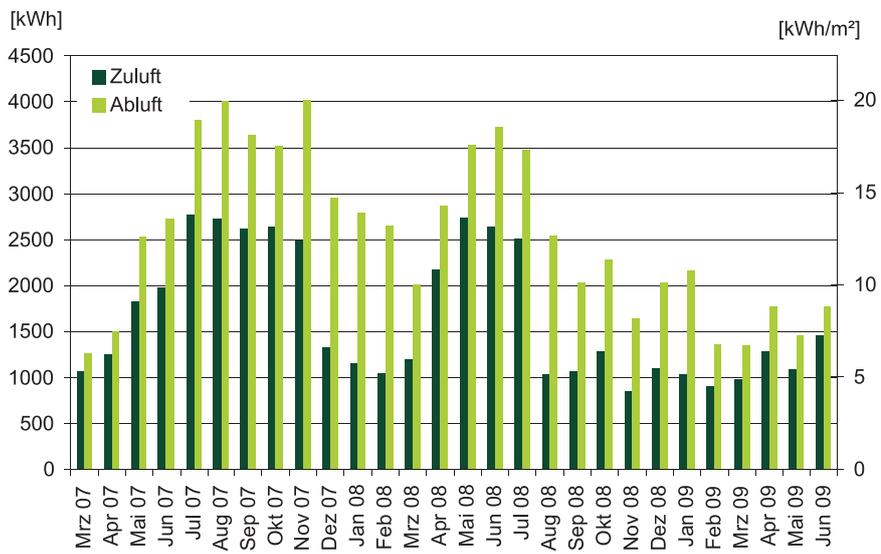


Abbildung 87: Monatliche Stromverbrauchswerte für die Ventilatoren der RLT „Küche“, spezifischer Kennwert auf NGF der Küche bezogen

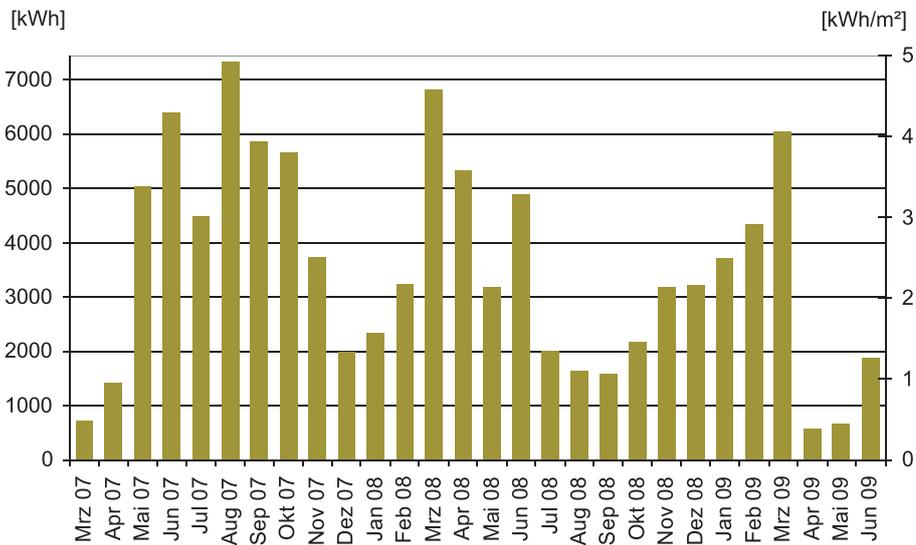


Abbildung 88: Monatlicher Stromverbrauch der RLT Halle als Absolutwerte und spezifisch bezogen auf die Grundfläche der Halle von 1.488 m²

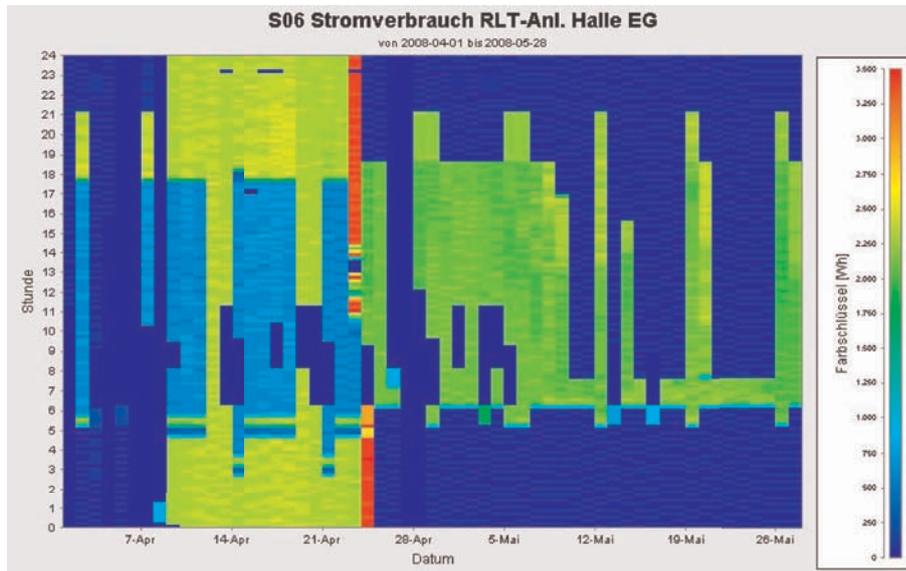


Abbildung 89: Beispielhafte Regelung der RLT „Halle“ im April und Mai 2008

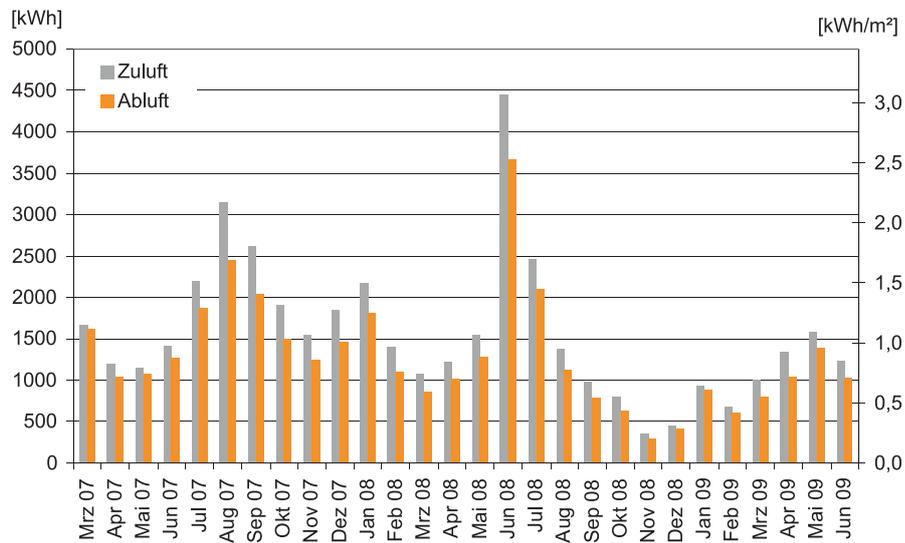


Abbildung 90: Monatliche Stromverbrauchswerte der Zu-/Abluftanlage „Vorstand“

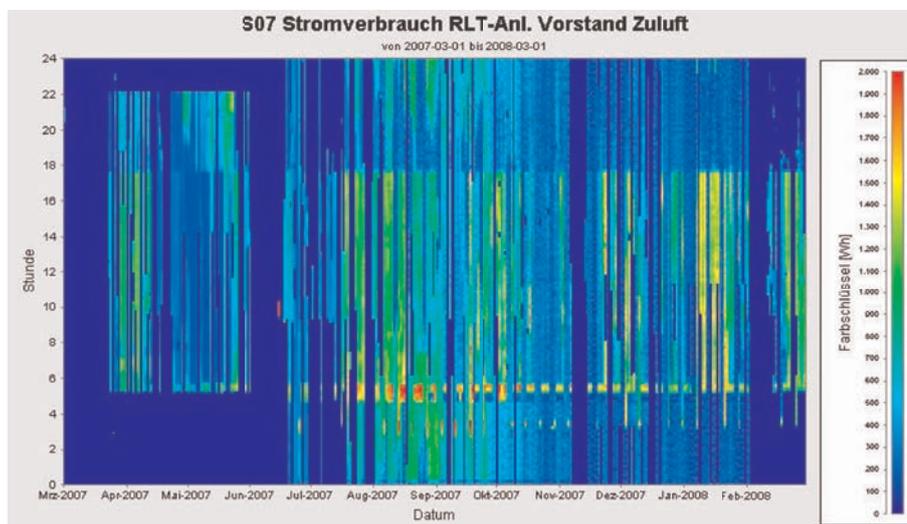


Abbildung 91: Regelung der RLT „Vorstand“ von März 2007 bis Februar 2008

4.3.7. Lüftungsanlage Sitzungssaal

Der Stromverbrauch der Lüftungsanlage Sitzungssaal wird getrennt nach Zu- und Abluft erfasst. Abbildung 92 zeigt, dass die Hilfsenergie für den Zulufttransport deutlich größer ist als für den der Abluft. In der Regel ist der Grund dafür, dass in der Zuluft durch Filter ein höherer Druckverlust herrscht.

Der Jahresverbrauch für die gesamte Anlage lag 2007 bei 12.526 kWh, 2008 bei 12.411 kWh und ist damit faktisch gleich geblieben. Auf die Gesamtbilanz des Gebäudes bezogen sind das 0,55 kWh/m²a, auf die Fläche des Sitzungssaals selbst bezogen 53 kWh/m²a (jeweils Endenergie). Dieser Wert liegt deshalb so hoch, weil im Jahr 2007 der Sitzungssaal sehr häufig benutzt wurde. Da er jederzeit für Sitzungen bereit stehen musste, wurde die Lüftungsanlage bewusst über längere Zeiträume dauerhaft betrieben. Dies war in der ersten Jahreshälfte 2008 auch noch der Fall. Danach reduzierten sich die Nutzungszeiten und so wurde die Anlage am 30.7.2008 vom Dauerbetrieb auf ein Zeitschema umgestellt. In der Planung wurde ein Jahresverbrauch von ca. 3.400 kWh ermittelt. Dabei wurde von 2.000 Vollbetriebsstunden ausgegangen. Als Betriebsstunden für das Jahr 2007 wurden 5.600 h ermittelt. Durch die Analyse der Summenhäufigkeit von auftretenden Ventilatorleistungen lässt sich die ungefähre Vollbetriebsstundenzahl auf 3.500 Stunden ermitteln.

Die maximal gemessene Leistungsaufnahme des Zuluftventilators lag bei 2 kW, die des Abluftventilators bei 1,5 kW. Bei einem Auslegungsvolumenstrom von 4.000 m³/h ergeben sich als spezifische Kennwerte 0,5 (Zuluft) bzw. 0,38 Wh/m³ (Abluft). Insgesamt weist die Anlage also eine volumenstromspezifische Effizienz von 0,88 Wh/m³ auf, die über den Richtwerten liegt (0,52 bzw. 0,28).

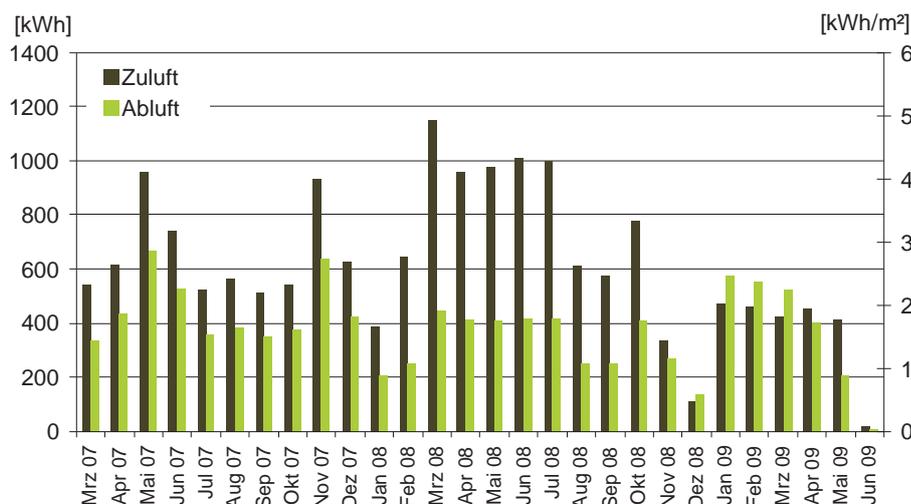


Abbildung 92: Monatlicher Stromverbrauch der RLT „Sitzungssaal“ als Absolutwert und spezifisch bezogen auf die Fläche des Sitzungssaals von 233 m²

4.3.8. Lüftungsanlage Abluft WCs

Die Stromverbräuche von zwei der insgesamt vier WC-Abluftanlagen wurden erfasst, die monatlichen Werte sind in Abbildung 93 dargestellt. Dabei fällt auf, dass die Abluftanlage in Bauteil A deutlich mehr Strom verbraucht (Jahresverbrauch von ca. 7.800 kWh) als die im Bauteil B (1.300 kWh), obwohl Bauteil B das höhere Gebäude ist.

Bis in das Jahr 2008 hinein wurden die gleichen Lüftungsanlagen in Bauteil A und B gänzlich unterschiedlich betrieben. Die Lüftungsanlage im Bauteil A (Abbildung 94) war auf Dauerbetrieb eingestellt,

die Lüftungsanlage im Bauteil B (Abbildung 95) wurde nur während der Arbeitszeiten betrieben. Dadurch liegt allein die Betriebszeit der ersten Anlage um 60% höher als die der zweiten.

Die maximale registrierte Leistungsaufnahme der Anlage in Bauteil A lag im Jahr 2007 bei 2,6 kW. Im Jahr 2008 lag diese allerdings nur noch bei 1 kW. Im Juni 2007 ist eine sprunghafte Veränderung der Leistungsaufnahme festzustellen, wobei uns der Grund nicht bekannt ist. Eine Änderung im Regelverhalten der Anlage könnte genauso der Grund sein wie eine Anpassung im Stromzähler. Die Betriebszeit der Anlage in Bauteil A ergibt sich zu 8.580 Stunden für 2007. Die Vollbetriebsstundenanzahl bezogen auf die 2,7 kW liegt bei 3.900 Stunden. Als Effizienz ergibt sich mit einem angenommenen Volumenstrom von 2.880 m³/h ein Wert von 0,9 Wh/m³. Der einfache Richtwert errechnet sich zu 0,17, der verbesserte Richtwert zu 0,11.

Die maximale gemessene Leistungsaufnahme der Anlage im Bauteil B lag während des gesamten Monitorings bei 0,4 kW. Als Effizienz ergibt sich mit einem angenommenen Volumenstrom von 540 m³/h ein Wert von 0,74 Wh/m³. Der einfache Richtwert errechnet sich zu 0,20, der verbesserte Richtwert zu 0,11. Im Mai 2008 wurde das in der Gebäudeleittechnik hinterlegte Regelungsschema der WC-Abluftanlagen überprüft. Seltsamerweise war hier ein Zeitprogramm für Wochentage von morgens 6 Uhr bis 22 Uhr eingestellt, auch am Samstag sollte die Anlage nur für einige Stunden laufen. Dies stand jedoch im Widerspruch zu den gemessenen Stromverbrauchswerten. Durch eine tieferegehende Überprüfung, die Ende Juli 2008 durchgeführt wurde, konnte festgestellt werden, dass die Anlage im Bauteil A vor Ort manuell auf Dauerbetrieb umgestellt worden war, was in der GLT jedoch nicht angezeigt wurde. Die Einstellung wurde am 30.7. geändert und ein Zeitschema für die Wochentage eingestellt. Analog wurde aus dem Zeitschema der Anlage im Bauteil B der Samstag als Betriebszeit entfernt.

Abbildung 93 zeigt anhand der monatlichen Stromverbrauchswerte die deutliche Reduktion durch die richtige Regelung auf.

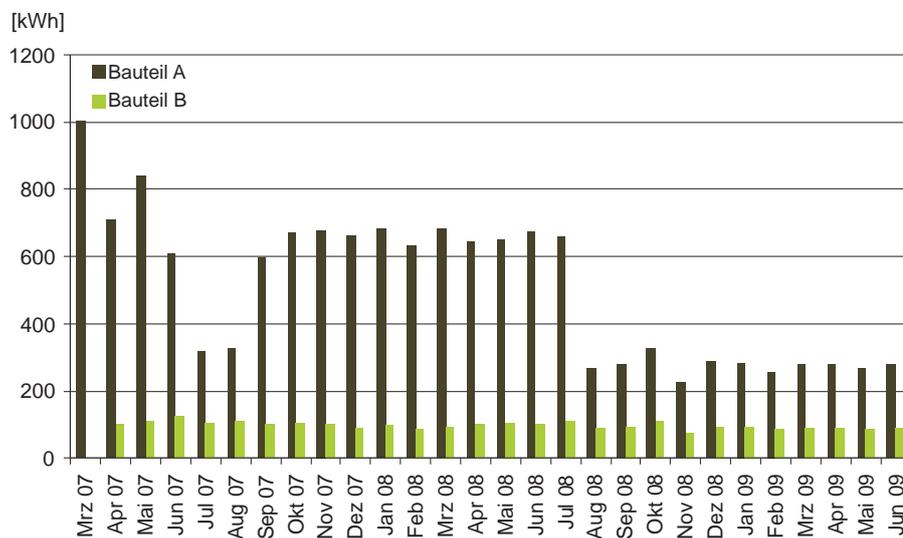


Abbildung 93: Monatlicher Stromverbrauch der zwei erfassten Abluftanlagen in den WCs

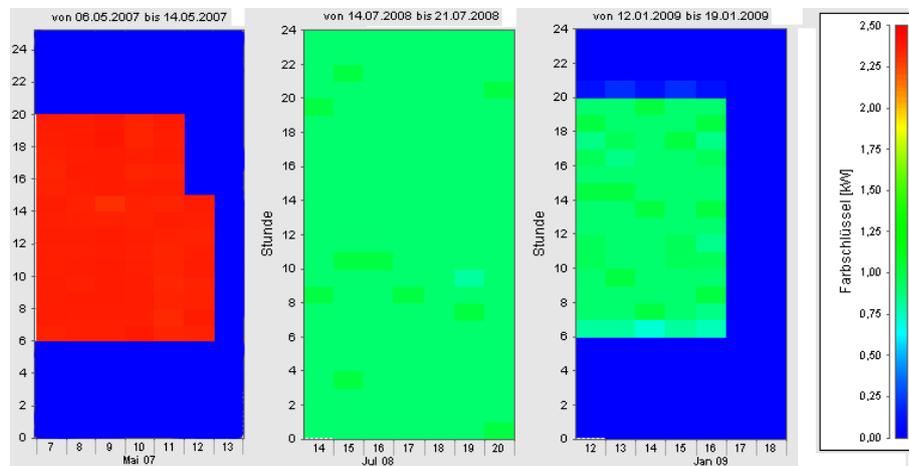


Abbildung 94: Veränderung der Regelung von Abluftanlage „WC“ in Bauteil A anhand drei exemplarischer Wochen

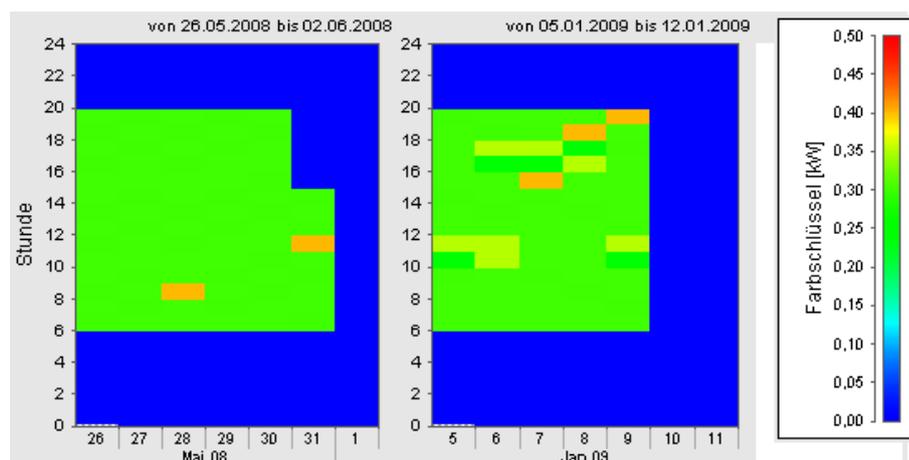


Abbildung 95: Veränderung der Regelung von Abluftanlage „WC“ in Bauteil B anhand zwei exemplarischer Wochen

4.3.9. Klimageräte EDV

Im 6. Geschoss des Bauteils B und im 9. Geschoss des Bauteils C wurden exemplarisch die Stromverbräuche der Klimageräte gemessen, welche die EDV-Serverräume kühlen. Der Stromverbrauch entsteht in diesen Umluftkühlgeräten durch die Ventilatoren, bezieht sich also auf den Energieaufwand zur Luftumwälzung. Aus Kostengründen wurde bei diesen Zählern auf eine kontinuierliche, elektronische Erfassung verzichtet. Stattdessen wurden diese Zähler monatlich durch das FM ausgelesen.

Das Klimagerät im Backup-Raum (S09) wurde am 14. Januar 2008 abgeschaltet, weil in diesem Raum keine Technik installiert ist und so auch keine internen Wärmelasten vorhanden sind.

ID	Bezeichnung	Jahres- verbrauch 2007 [kWh]	Jahres- verbrauch 2008 [kWh]	Spez. Verbrauch 2007 (Endenergie) [kWh/m ² a]	Spez. Verbrauch 2008 (Endenergie) [kWh/m ² a]
S08	Klimagerät EDV	12.928	12.644	0,59	0,58
S09	Klimagerät EDV	14.561	540	0,67	0,02
S28	Klimagerät EDV	861	849	0,04	0,04
S29	Klimagerät EDV	890	579	0,04	0,03

Tabelle 22: Stromverbrauch der EDV-Klimageräte in den Jahren 2007 und 2008

4.3.10. Fazit

Es hat sich gezeigt, dass bezüglich der Regelung der Abluftanlage im Bauteil B Optimierungsbedarf besteht. Im Sommer war wie vorgesehen nachts die Lüftung zur Auskühlung des Gebäudes aktiviert, jedoch war sie auch im Winter in den Nachtstunden in Betrieb. Der Betrieb der Abluftanlage ist nicht eindeutig von der Außentemperatur abhängig, in manchen Zeiträumen war überhaupt keine Abhängigkeit zu erkennen.

Der Stromverbrauch der übrigen drei Abluftanlagen wurde nicht aufgezeichnet, doch es ist davon auszugehen, dass in der Gebäudeleittechnik die Regelung entsprechend umgesetzt wurde. Die Planervorgaben für die temperaturabhängige Lüftungsregelung sind sehr gut dokumentiert, eine intensive Prüfung der Umsetzung in die Regelungstechnik wird empfohlen. Bei Abschaltung der zentralen Ventilatoren zeigte sich, dass die Nachströmöffnungen in der Fassade dennoch weiter automatisch geöffnet wurden. Messungen ergaben, dass trotz der nicht optimalen Regelung die CO₂-Konzentration in den Büroräumen in einem sehr guten Bereich lag. Die Luftfeuchtigkeit in den Büroräumen ist insgesamt eher zu niedrig, insbesondere im Winter sinkt sie durch den mechanischen Luftwechsel auf Werte unter 30 % ab.

Bei den Zu- und Abluftanlagen wurden teilweise hohe volumetrische Kennwerte festgestellt, die auf hohe Druckverluste in den Anlagen zurückzuführen sind. Die beengte Situation in manchen Technikzentralen trägt ihren Teil dazu bei.

Bei einigen dieser Anlagen konnten anhand von erzeugten Stromlastprofilen Mängel in den Zeitschemata entdeckt werden. Durch die Korrektur der Regelung konnten teilweise deutliche Energieeinsparungen erzielt werden. Es zeigte sich, dass für eine Kontrolle die Werte in der Visualisierung der Gebäudeleittechnik nicht immer ausreichen, weil eine manuelle Einstellung (z.B. Handbetrieb) direkt an der Anlage dort nicht angezeigt wurde.

4.4. Kühlen

Die Nachtlüftung als passive Unterstützung zur Reduktion der Kühllasten für eine aktive Kühlung war in Betrieb, weist jedoch, wie die Untersuchungen gezeigt haben, noch Verbesserungspotenzial auf. Der automatische Sonnenschutz als weiterer Baustein bei der Kühllastreduktion hat sehr gut funktioniert.

Über die Gebäudeleittechnik konnte kontinuierlich die Position des Sonnenschutzes aufgezeichnet werden, Abbildung 96 zeigt die ermittelten Tagesprofile. Anhand des erfassten Datenpunktes kann zwar nicht zwischen Aktionen der GLT und des Nutzers unterschieden werden, es kann dennoch festgestellt werden, dass die automatische Regelung des Sonnenschutzes wie geplant funktioniert. Noch deutlicher zeigt sich die korrekte Funktionsweise des Sonnenschutzes, wenn man die pro Fassadenrichtung gemittelte, tägliche Stundenzahl eines aktivierten Sonnenschutzes über der mittleren Einstrahlung auf die Fassade aufträgt (Abbildung 97). Ab einem Tagesmittelwert von ca. 50 W/m^2 ist der Sonnenschutz aktiv, an strahlungsintensiveren Tagen steigt die Aktivierungsdauer an, bis sie an Tagen mit sehr hoher Einstrahlung fast 8 Stunden erreicht.

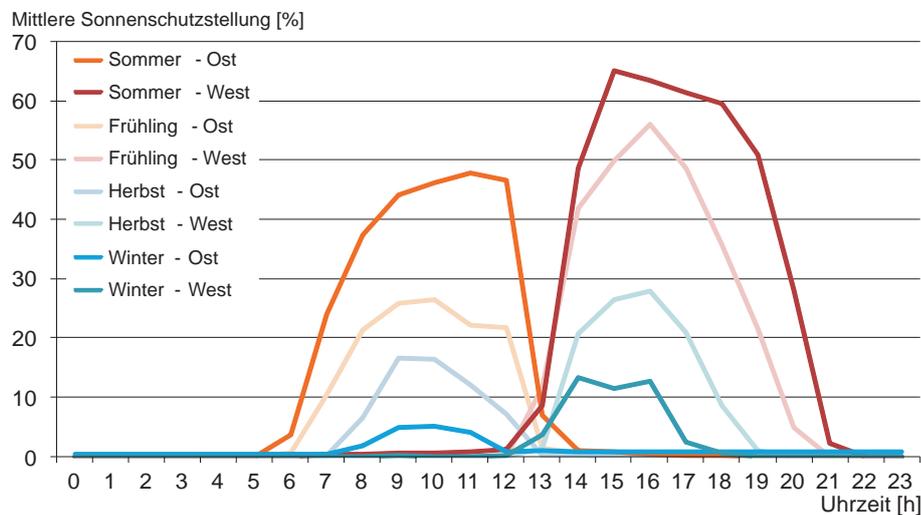


Abbildung 96: Gemittelte Tagesprofile der durchschnittlichen Sonnenschutzstellung getrennt nach Jahreszeit und den Himmelsrichtungen Ost und West

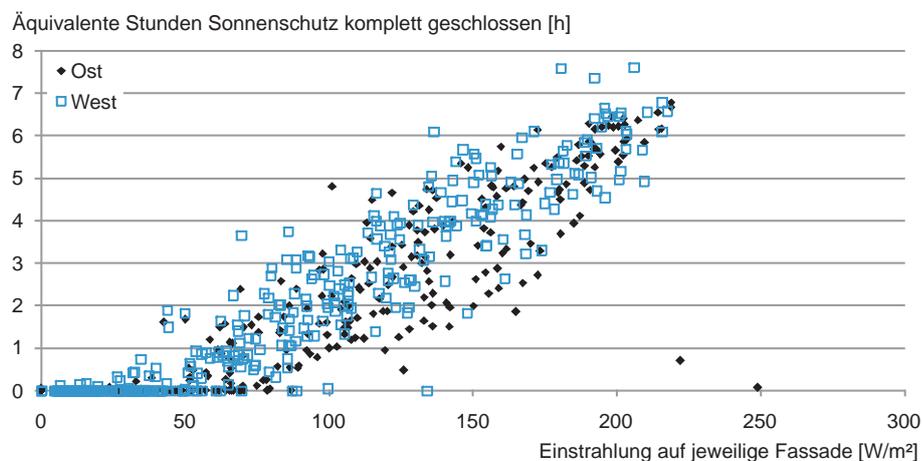


Abbildung 97: Die tägliche Stundenzahl, in welcher der Sonnenschutz aktiviert ist, in Abhängigkeit von der tagesmittleren Einstrahlung auf die Ost- bzw. die Westfassade

Für die aktive Kühlung im Haupthaus kommt die Kälte über eine Hauptleitung aus dem Kälteverbund der Liegenschaft, in der Technikzentrale des Haupthauses selbst stehen keine Kälteerzeuger. Insgesamt sind in diesen Verbund acht Kältemaschinen integriert.

Um den jeweils aktuellen Primärenergiefaktor für die Kälteerzeugung zu ermitteln, müssten für jede Kältemaschine sowohl Zählerwerte für die Antriebsenergie (Strom, Wärme) als auch die erzeugte Energiemenge (Kälte) vorliegen. Diese sind allerdings nicht vollständig, so dass ein Primärenergiefaktor momentan nicht ermittelt werden kann. Der neue Primärenergiefaktor, der nach Abschluss der Infrastrukturmaßnahmen erreicht werden soll, wurde von den Planern mit 0,3 angegeben, der Wert vor der Sanierung lag bei 0,5.

An der Hauptzuleitung wurde ein Wärmemengenzähler installiert, der seit Februar 2007 Werte erfasst hat. Der Jahresverbrauch an Kälte wurde für das Jahr 2007 zu 608 MWh ermittelt. Spezifisch auf die Gesamtfläche des Haupthauses bezogen sind das 27,8 kWh/m²a. Im Jahr 2008 lag die zur Kühlung benötigte Energiemenge mit 435 MWh deutlich niedriger. Abbildung 98 zeigt, dass das Klima dabei nur einen unwesentlichen Einfluss hatte, denn der Verbrauch erhöht sich bei einer Klimabereinigung nur minimal. Die Kühlgradtage (15°C) betragen im Jahr 2007 728 Kd und im Jahr 2008 716 Kd. Im Jahr 2007 betrug die maximale über den Wärmemengenzähler registrierte Leistung der Gesamtkälteeinspeisung 472 kW, im Jahr 2008 370 kW.

Vielmehr ist die Reduktion auf einen verbesserten Betrieb zurückzuführen. Insbesondere bei hohen Außentemperaturen sind die maximalen Tageswerte 2008 deutlich geringer als 2007, wie Abbildung 99 belegt.

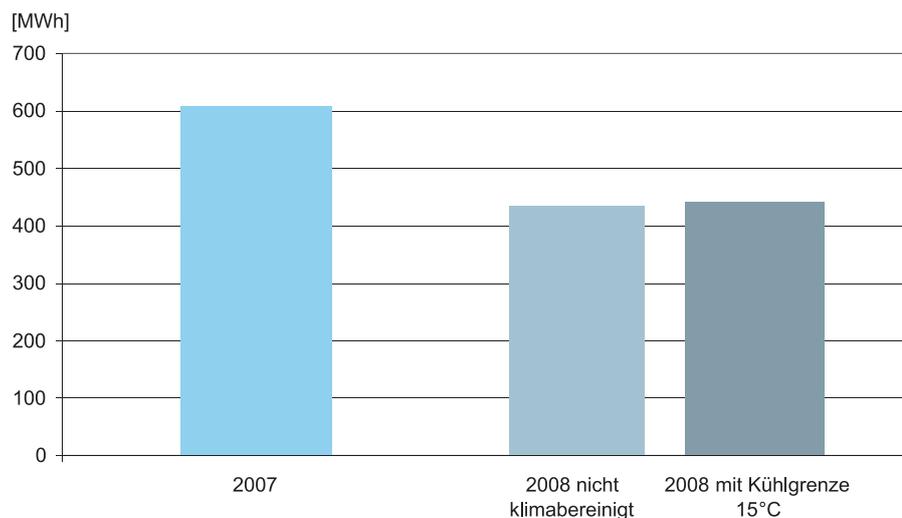


Abbildung 98: Die jährlichen Gesamtkältemengen im Vergleich, der Verbrauch 2008 wurde zusätzlich zum absolut gemessenen Wert noch auf das Klima des Jahres 2007 bereinigt

Abbildung 100 zeigt die monatlichen Gesamtverbräuche und die Aufteilung in die beiden abgehenden Kälteverteilkreise. Deutlich zu erkennen ist, dass im Juni und Juli 2007 die Unterzähler vermutlich falsch gezählt haben. Das Problem lag beim Kältezähler der Kühldecken, der viel zu wenig Verbrauch erfasst hatte.

Die mittels der Kältezähler ermittelte Aufteilung des Jahreskälteverbrauchs in den Jahren 2007 und 2008 ist in Abbildung 101 dargestellt. Im Jahr 2007 waren neben dem Kühldeckenzähler zwei weitere Zähler noch nicht richtig funktionstüchtig, so dass die unbekanntenen Anteile (in der Abbildung als grauer Pfeil) vergleichsweise große waren. Die Tendenz, dass die Hochtemperaturkühlung einen vergleichsweise ge-

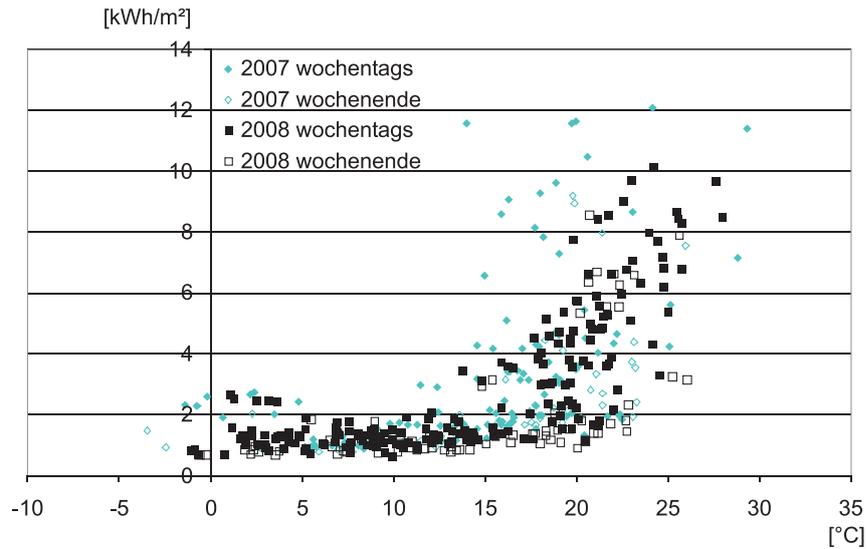


Abbildung 99: Gesamtkälteverbrauch an Wochentagen, dargestellt in Abhängigkeit vom Tagesmittel der Außentemperatur

ringen Anteil hat, ist aber in beiden Jahre zu erkennen. Die größten Verbraucher stellen die Kühlregister in den RLT-Anlagen des Vorstandsbereichs, des Sitzungssaals und der Halle im Erdgeschoss sowie in den Umluftkühlern dar. Die Auswertungen der einzelnen Verbraucher werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

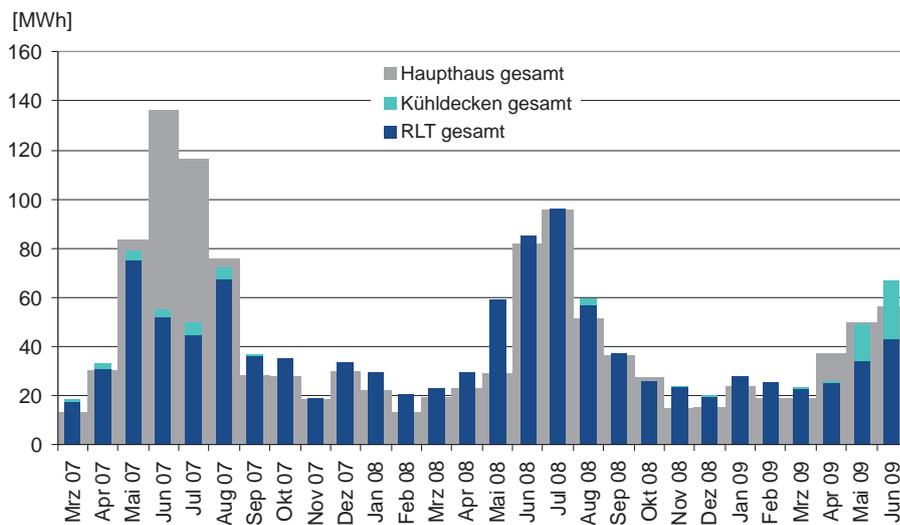


Abbildung 100: Monatliche Kälteverbrauchswerte in der Gesamtzuleitung zum Haupthaus

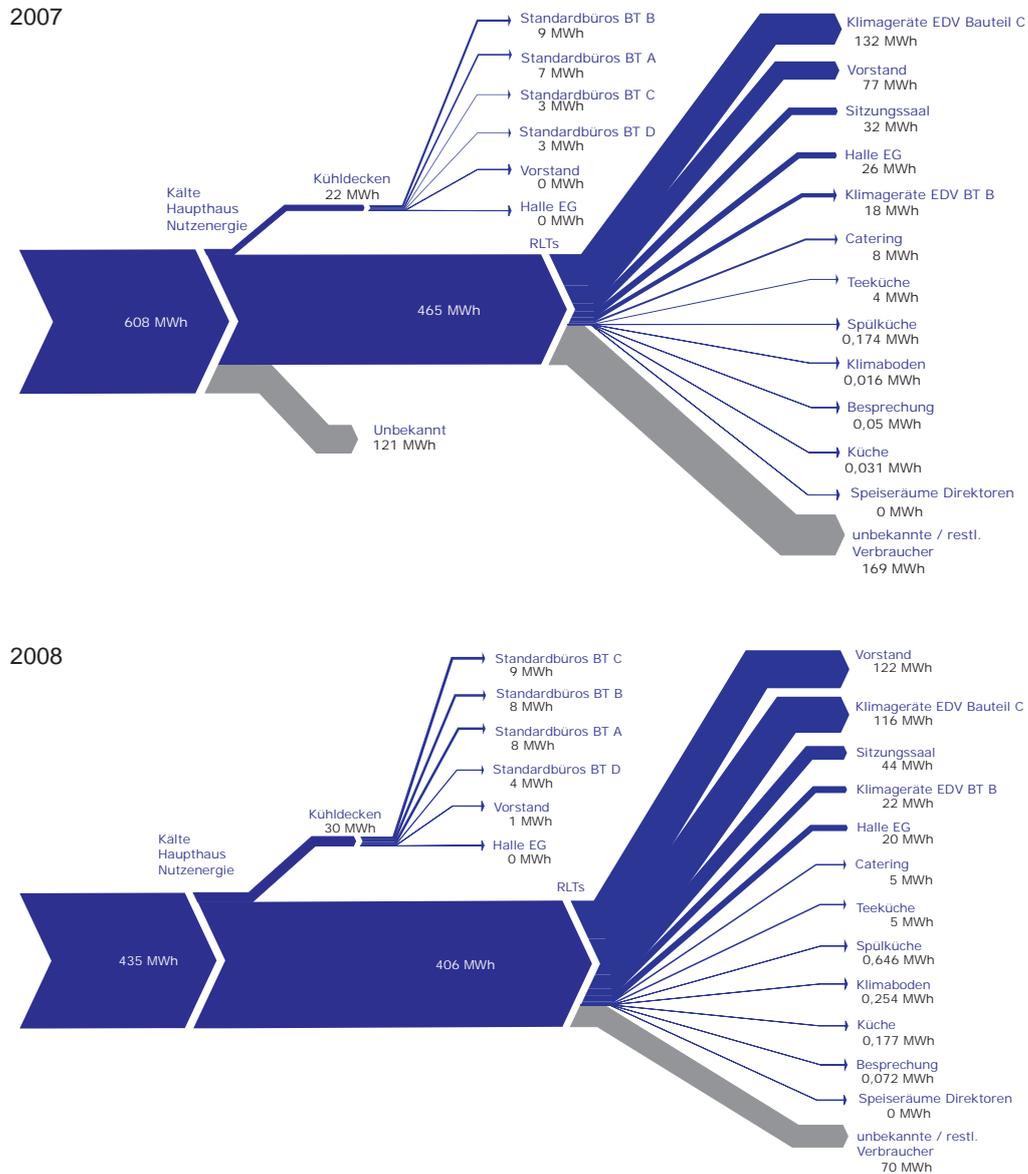


Abbildung 101: Die Aufteilung der jährlichen Kälteverbrauchswerte für das Jahr 2007 und 2008 als Sankey-Diagramme

4.4.1. Kühldecken

Der Abgang „Kühldecken“ gliedert sich entsprechend der vier Gebäudeteile in vier weitere Kühldeckenkreisläufe, die sowohl die Sondernutzung (Halle und Foyer) im Erdgeschoss als auch die Standardbüros ab dem 2. Geschoss versorgen. In den Bauteilen A bis C wurden die Wärmemengenzähler so im Steigstrang montiert, dass sie nur die Verbräuche der Standardbüros erfassen. In Bauteil D wurde der Wärmemengenzähler im 6. OG montiert, so dass ausschließlich der Kälteverbrauch für die Kühldecken im Vorstandsbereich erfasst wird. Außerdem ist an den Kühldecken-Strang auch noch der Klimaboden im Konferenzsaal angebunden, der über einen separaten Zähler erfasst wurde.

Abbildung 102 stellt die monatliche Gesamtkälte der Hauptverteilung Kühldecken dar sowie die gemessenen Teilverbräuche. Der verbleibende graue Anteil spiegelt also einerseits Verteilverluste, andererseits die in den Sonderbereichen verbrauchte Kälte wider. Das ist in den Monaten März bis August 2007 plausibel, im September und Oktober 2007 ist die Summe der Unterzähler allerdings deutlich größer als die des übergeordneten Zählers. Das deutet auf Mängel in der Messdatenerfassung hin. In einer Sitzung im Oktober 2007 wurde dies dem Bauherrn und den ausführenden Firmen mitgeteilt, woraufhin eine Untersuchung zugesagt wurde. Bei der Untersuchung der Kältezähler durch das fbta wurden einige falsch eingebaute Zähler entdeckt. Diese wurden im Herbst 2008 durch die Heizungsfirma ausgetauscht.

Die Einzelraumregelung in den Büros wurde bereits 2007 so angepasst, dass ab 2 K über dem vom Nutzer eingestellten Sollwert ($21^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ K}$) gekühlt wird.

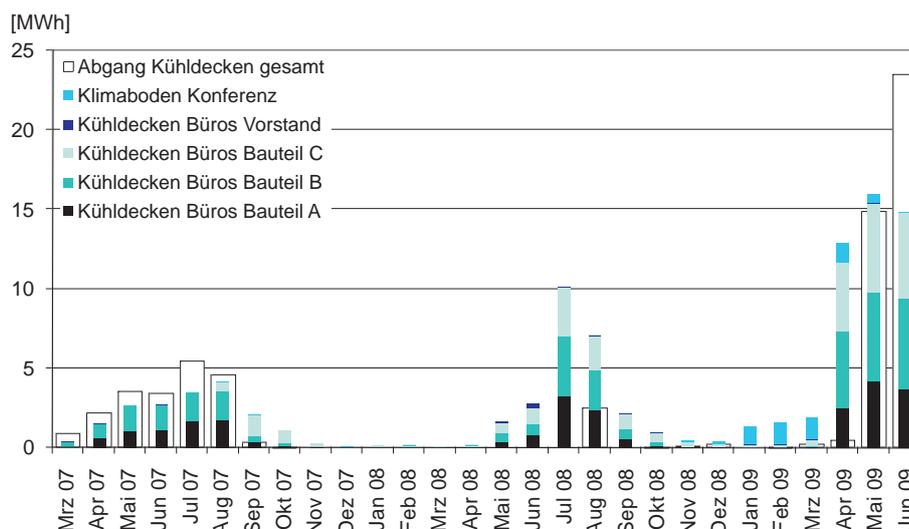


Abbildung 102: Monatliche Gesamtkältemengen der Kühldecken

Im Bauteil A war die maximal registrierte mittlere Stundenleistung 30 kW, was bei einer Kühldeckenfläche von 880 m^2 lediglich eine Kühlleistung von $34,1\text{ W/m}^2$ ergeben hat. Diese wurde z.B. am 31.7.2008 registriert, einem Tag, an dem die mittlere Außentemperatur bei 25°C lag. Auch während der 6 Tage davor hatte das Tagesmittel der Außentemperatur über 25°C betragen. Die Raumtemperaturen der 6 exemplarisch erfassten Büros lagen an diesem Tag alle über 26°C , so dass eine aktive Kühldecke in allen Büros angenommen werden kann. Selbst wenn man nur 70 % der Kühldecken als aktiv ansetzt (Gleichzeitigkeitsfaktor), kommt man lediglich auf eine spezifische Kühlleistung von 49 W/m^2 . Das liegt deutlich unter der geplanten Kühlleistung von 100 W/m^2 . Zieht man den höchsten gemessenen Tageskälteverbrauch von 400 kWh heran und nimmt an, dass alle Kühldecken von 8 bis 18 Uhr aktiv waren,

ergibt sich für diese 10 Stunden eine mittlere Kälteleistung von $45,5 \text{ W/m}^2$. Mit der Berücksichtigung einer Gleichzeitigkeit von 70 % wären das immerhin 65 W/m^2 .

Im Bauteil B und C lagen die ermittelten Kühlleistungen etwas niedriger als im Bauteil A. Nach dem höchsten Stundenverbrauch ergaben sich im Bauteil B $25,5$ (bei 1178 m^2 Kühldecken) und im Bauteil C $27,7 \text{ W/m}^2$ (bei 722 m^2 Kühldecken) bei der Annahme, dass alle Kühldecken aktiv waren. Über den höchsten Tagesverbrauch und bei einer Betriebszeit von 10 Stunden, ergeben sich für Bauteil B $36,5$ und für Bauteil C $41,6 \text{ W/m}^2$.

Im Bauteil D der Vorstandsbereich stellt eine Sondersituation dar, weil hier hauptsächlich über die Klimaanlage gekühlt wird. Der Verbrauch der Kühldecken (469 m^2) ist so gering, dass sich kein maximaler Stundenwert ermitteln ließ. Der größte Tagesverbrauch lag bei 30 kWh , was auf 10 Stunden eine mittlere spezifische Leistung von nur $6,4 \text{ W/m}^2$ ergibt.

Wenn im Sommer hohe Temperaturen in den Büros herrschen und dennoch nicht die komplette theoretische Kühlleistung der Kühldecken abgerufen werden kann, könnte ein Grund ein zu geringer Volumenstrom sein. Ein anderer Grund könnten Abweichungen bei den Vorlauftemperaturen sein. In der Planung ging man von einer Vorlauftemperatur von $16 \text{ }^\circ\text{C}$ aus.

4.4.2. Klimaboden Sitzungssaal

Der Klimaboden im Konferenzsaal kann sowohl als Fußbodenheizung als auch -kühlung eingesetzt werden. Der Kälteanschluss hat eine installierte Leistung von 11 kW .

Nachdem der Kältezähler im November 2008 erneuert wurde (siehe Kapitel 3.3.9), konnte hier schließlich auch die Kühlenergie aufgezeichnet werden. Es zeigten sich Probleme mit der Regelung, die dazu führten, dass auch im Winter der Klimaboden gekühlt wurde (Abbildung 103).

Abbildung 104 zeigt, dass Heizen und Kühlen des Klimabodens nahezu kontinuierlich alternieren. Die dafür verantwortliche Einstellung der Regelung wurde vom Facility Management gefunden und entsprechend geändert.

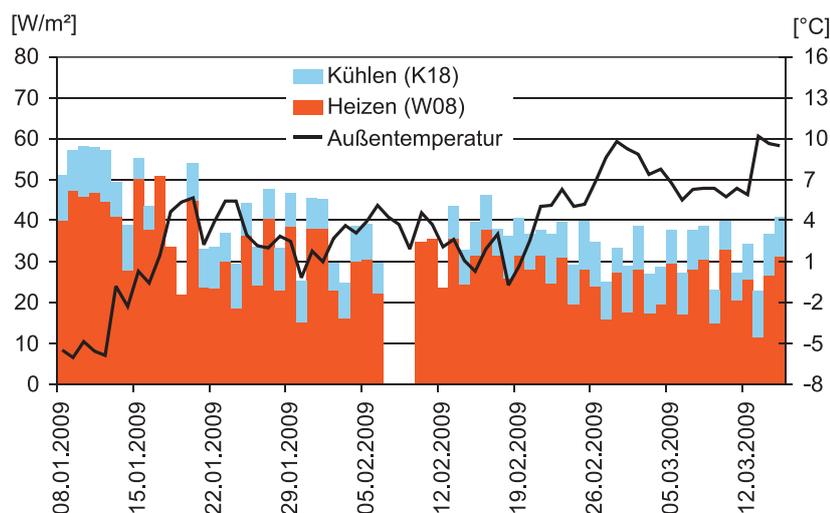


Abbildung 103: Heizen und Kühlen des Klimabodens im Sitzungssaal im Januar 2009, tagesmittlere spezifische Leistung

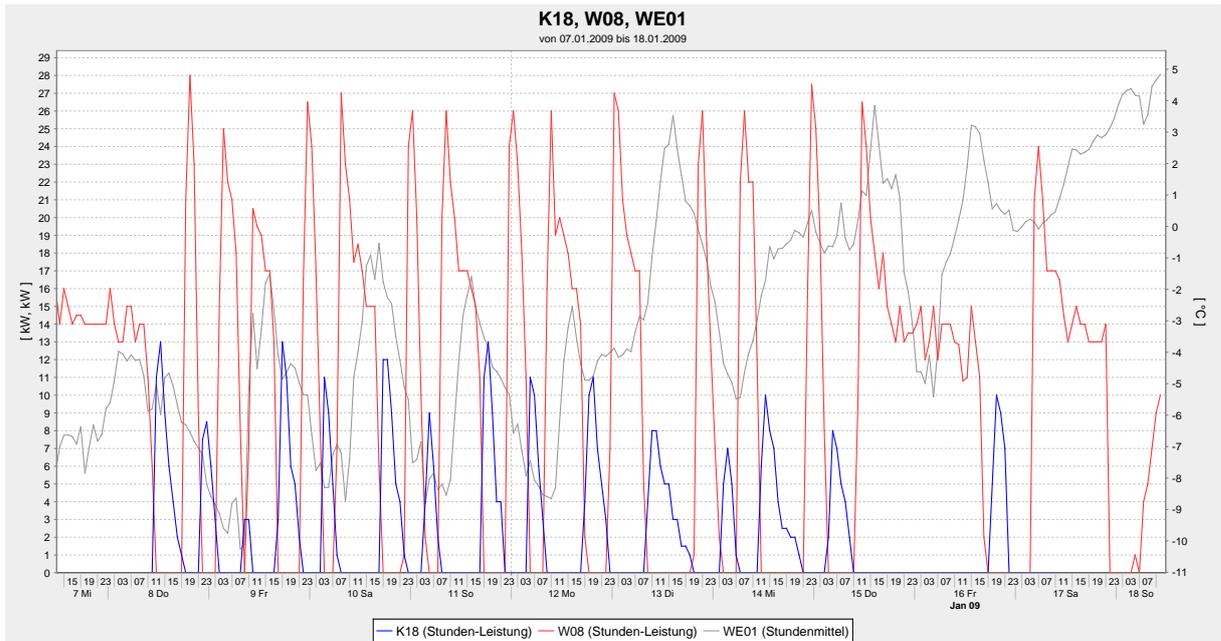


Abbildung 104: Heiz- und Kühlleistung des Klimabodens sowie Außenlufttemperatur vom 7.1. bis 18.1.09

4.4.3. Luftkühlung gesamt

Der Strang für die Lüftungsanlagen versorgt die unterschiedlichsten Wärmetauscher zur Kühlung der Zu- bzw. Umluft. Das Messkonzept wurde so ausgearbeitet, dass die wesentlichen Verbraucher erfasst wurden. Der Vergleich der gesamten Kältemenge mit der Summe der einzelnen Kälteabnehmer (Abbildung 105) zeigt aber, dass ein noch ziemlich großer Anteil unbekannt ist bzw. durch Verluste entsteht. Ab Juni 2007 liegt dieser Anteil immer noch im Bereich von 20 bis 30 Prozent, so dass von uns die Frage an die Fachplaner gestellt wurde, ob wesentliche Verbraucher bei der Erfassung außer acht gelassen wurden oder ob tatsächlich so ein großer Verteilungsverlust entstehen kann. Auch dieses Thema wurde in der Sitzung im Oktober 2008 thematisiert, eine Klärung steht noch aus.

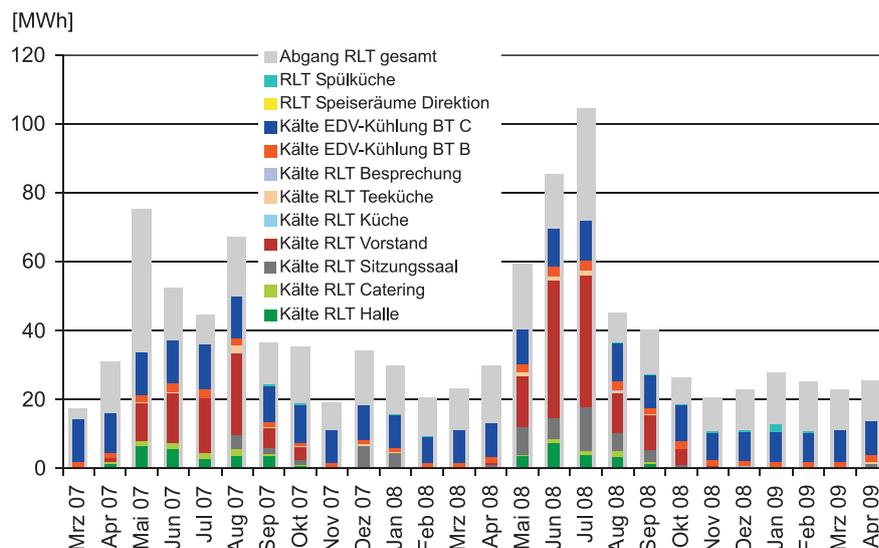


Abbildung 105: Monatliche Kältemengen zur Luftkühlung in den erfassten Lüftungen

4.4.4. Luftkühlung Vorstand

Bei der Anlage für den Vorstandsbereich handelt es sich um eine Vollklimaanlage. Insgesamt wurden hier im Jahr 2007 76,7 MWh und im Jahr 2008 121,8 MWh Kälteenergie benötigt, eine Steigerung um 59%. Abbildung 106 zeigt, dass im Juni und Anfang August 2008 eine Kühlleistung rund um die Uhr abgefragt wurde, weil die Anlage hier im Dauerbetrieb lief. Die korrekte Regelung müsste nach einem Zeitschema während der Nutzungszeiten funktionieren.

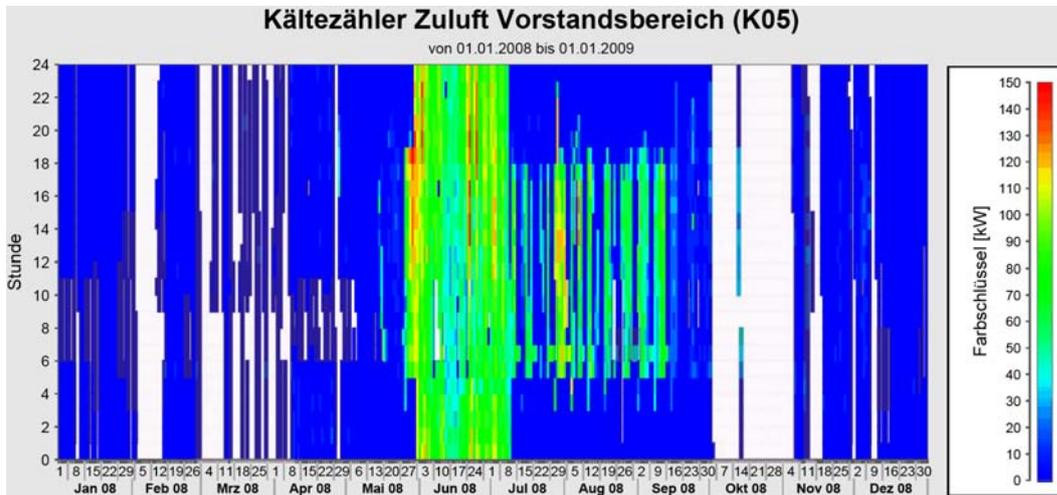


Abbildung 106: Stündlicher Kälteverbrauch für die Konditionierung der Zuluft in der RLT „Vorstand“ im Jahr 2009

In Abhängigkeit von der Außentemperatur (Abbildung 107) erkennt man, dass ab einer mittleren Außentemperatur von 15°C ein Kühlbedarf existiert. Je feuchter die Außenluft ist, desto mehr Kälteenergie muss über den Wärmetauscher zugeführt werden.

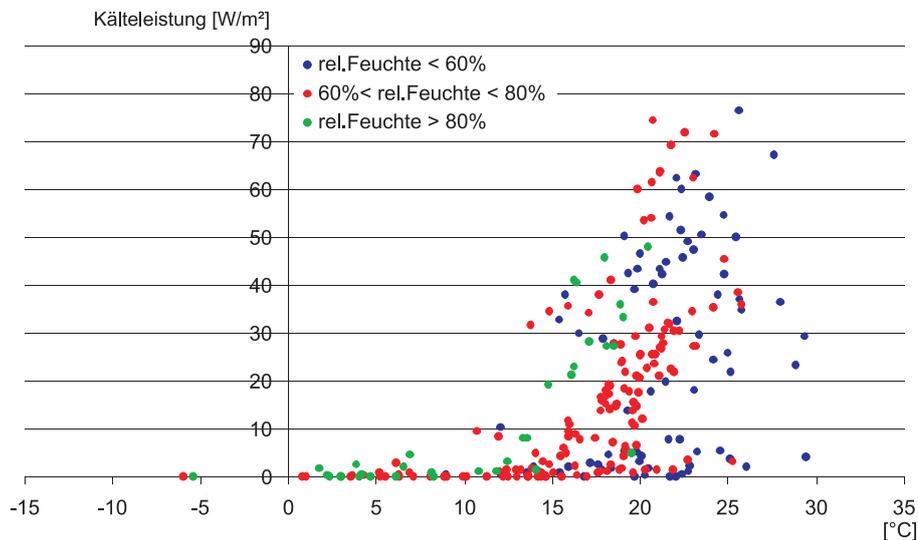


Abbildung 107: Tagesmittlere Kälteleistung in der RLT „Vorstand“ über Außenlufttemperatur und relativer Luftfeuchte

4.4.5. Luftkühlung Halle

Für die Kühlung der Luft in der Lüftungsanlage der Halle wurden im Jahr 2007 25,7 MWh gemessen, im Jahr 2008 20,2 MWh. Man sieht, dass die täglich verbrauchte Kühlenergie zwar von der Außentemperatur abhängt (Abbildung 108), aber durch die unterschiedliche Betriebsdauer der Lüftungsanlage abhängig von der Dauer einer Veranstaltung deutlich streut. Es gibt viele Tage, an denen keine Kälteenergie benötigt wurde, weil entweder die Lüftungsanlage nicht in Betrieb war oder die Außenlufttemperatur so kalt war, dass keine Kühlung erforderlich war.

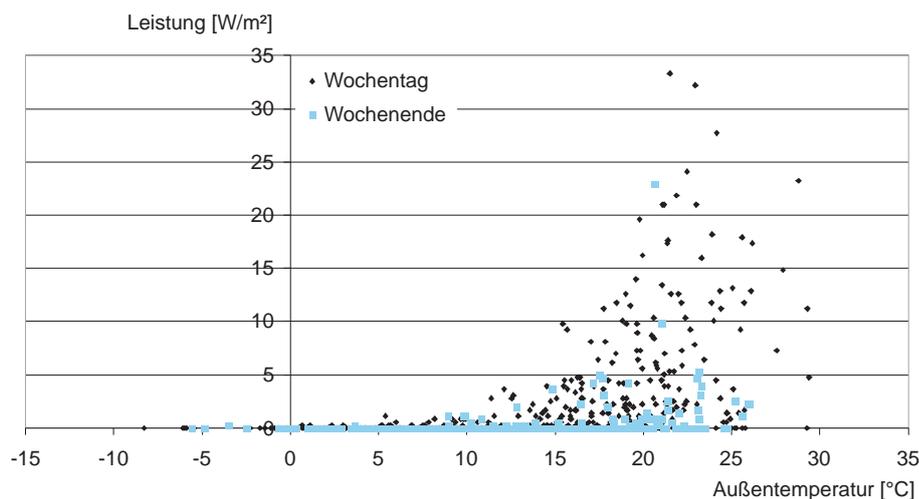


Abbildung 108: Tagesmittlere Kälteleistung in der RLT „Halle“ über der Außenlufttemperatur

4.4.6. Luftkühlung Sitzungssaal

Die Lüftungsanlage des Sitzungssaales wurde 2007 und 2008 sehr häufig betrieben, da immer wieder Sitzungen des Vorstandes zu den unterschiedlichsten Tag- und Nachtzeiten einberufen wurden. Deshalb wurde der Sitzungssaal durch das Facility Management auf Anweisung der KfW insbesondere 2008 lange Zeit im Dauerbetrieb konditioniert.

Insgesamt wurden hier im Jahr 2007 31,6 MWh und im Jahr 2008 44,0 MWh Kälteenergie benötigt, eine Steigerung um 39%. Eine Änderung im Regelverhalten ist nach Abbildung 109 nicht zu erkennen, die erhöhte Kühlleistung hängt mit der längeren Betriebszeit des Zuluftventilators im Jahr 2008 zusammen. Sein Stromverbrauch stieg im Jahr 2008 um ca. 13 Prozent (siehe Kapitel 4.3.7).

Bezogen auf die gesamte NGF des Gebäudes wurden 2008 somit 2,0 kWh/m²a für die Kühlung der Zuluft im Sitzungssaal benötigt. Bezogen auf die Fläche des Sitzungssaals (233 m²) waren dies allerdings 189 kWh/m²a.

Die Anlage verfügt über eine Be- und Entfeuchtungsfunktion. Abbildung 109 zeigt, dass zum Teil bei kalten Außentemperaturen Kälte zur Entfeuchtung der Zuluft benötigt wurde.

4.4.7. Sonstige Luftkühlung

Es wurden an weiteren, kleineren Lüftungsanlagen Wärmemengenzähler installiert. Dies war nicht Bestandteil des Monitoring-Konzeptes, sondern wurde vom Bauherrn bzw. den Fachplanern selbst veranlasst. Die Daten wurden jedoch im Rahmen des Monitorings ebenfalls aufgezeichnet und ausgewertet.

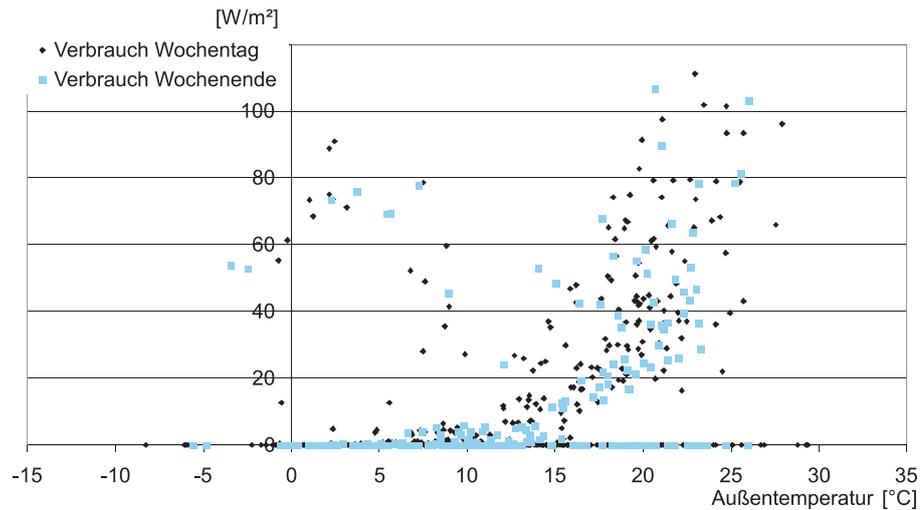


Abbildung 109: Tagesmittlere Kühlleistung der RLT „Sitzungssaal“ in Abhängigkeit vom Tagesmittel der Außentemperatur

Dabei musste festgestellt werden, dass der eingebaute Zähler zur Erfassung der „Kältemenge RLT Speiseräume Direktoren“ bis zur Erstellung dieses Berichtes keine Verbrauchsdaten übermittelt hat. In den folgenden Kapiteln werden die wesentlichen Ergebnisse der restlichen Zähler dargestellt.

Kälte RLT Catering Für die Kühlung der Zuluft der RLT im Catering-Bereich wurden im Jahr 2007 ca. 8,5 MWh Kälte benötigt, im Jahr 2008 waren es nur noch 5,0 MWh. Die Darstellung der stündlichen Verbrauchswerte als Carpet-Diagramm in Abbildung 110 zeigt, dass wie geplant nur bei warmen Außentemperaturen (also hier in den Monaten Mai bis Oktober) Kälte zur Kühlung der Zuluft benötigt wurde. Betrachtet man Stundenwerte, erkennt man, dass ab einer Außentemperatur von 15°C die Zuluft gekühlt wurde.

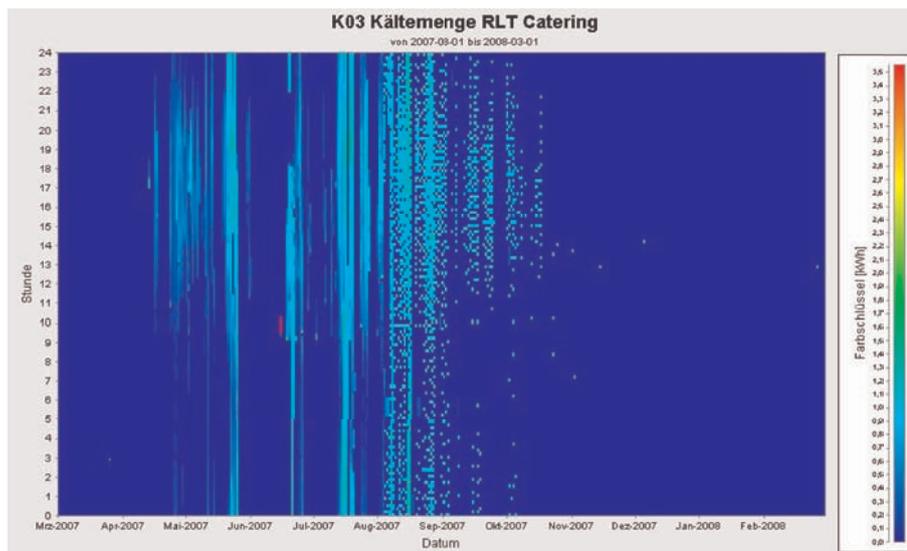


Abbildung 110: Carpet-Plot des Kälteverbrauchs in der RLT „Catering“ von März 2007 bis Februar 2008

Kälte RLT Küche Da der Zähler bis zum November 2008 defekt war, wurden hier Werte bis 1.9.2009 berücksichtigt. Die übermittelten Werte sind um den Faktor 10 zu klein und wurden nachträglich korrigiert.

Abbildung 111 zeigt die täglichen Kältemengen in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur der Außenluft. Unterhalb von 10°C (zur Entfeuchtung) sowie oberhalb von 14°C wird Kühlenergie benötigt, an den Wochenenden ist die Anlage in der Regel ausgeschaltet. Wird die Anlage am Wochenende betrieben, liegen die Verbrauchswerte in gleichen Bereichen wie an Wochentagen.

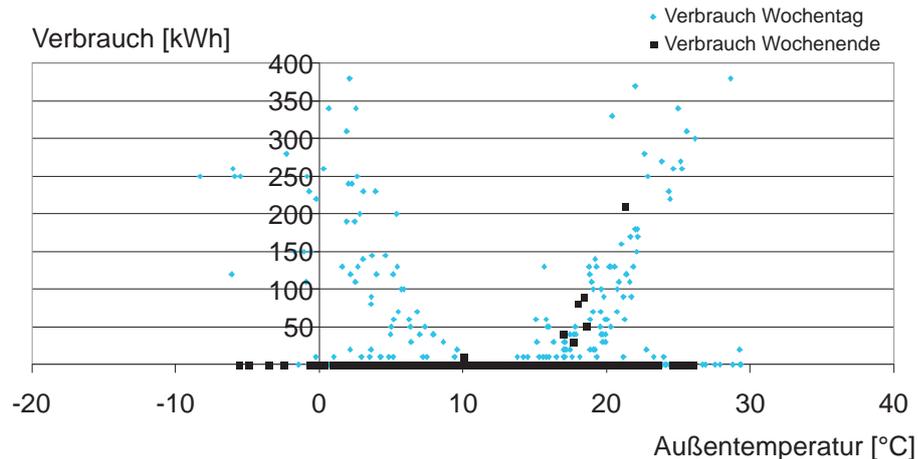


Abbildung 111: Täglicher Kälteverbrauch zur Kühlung der Zuluft in die Küche in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Kälte RLT Teeküche Der Wärmemengenzähler hat für das Jahr 2007 einen Kälteverbrauch von 4,4 MWh für die Kühlung der Zuluft registriert, im Jahr 2008 waren es 4,8 MWh.

2007 wurde zunächst nur während der warmen Jahreszeit von Mai bis Oktober ein Kälteverbrauch registriert. Dann wurde aber auch vom 27.12.2007 bis zum 18.1.2008 ein Kälteverbrauch von insgesamt 785 kWh aufgezeichnet, der auf eine falsche manuelle Einstellung durch den Betreiber zurückzuführen ist.

Diese Unregelmäßigkeiten wurden seit Januar 2008 nicht mehr festgestellt, die Zuluft wird seitdem erst ab einer mittleren Tagesaußentemperatur von 15 °C gekühlt.

Kälte RLT Spülküche In der RLT für die Spülküche wurden 2007 lediglich 174 kWh Kälte zur Luftkühlung gemessen, was allerdings daran lag, dass auch dieser Zähler falsch eingebaut war. Für einen kurzen Zeitraum hat der Zähler zwischen Oktober 2008 und Februar 2009 sich kontinuierlich ändernde Werte übertragen. Seit dem 9.2.09 allerdings sind wieder keine Daten verfügbar, so dass eine Auswertung dieses Datenpunktes nicht sinnvoll ist.

Kälte RLT Besprechung Seitdem auch dieser Zähler Ende 2008 ausgetauscht wurde, werden plausible Verbrauchswerte aufgezeichnet (Abbildung 112). Ab einer Tagesmitteltemperatur von ca. 17 °C wird mit steigender Temperatur auch zunehmend Energie zur Kühlung der Zuluft aufgewendet. Man sieht, dass wie beabsichtigt nur bei Nutzung der Besprechungsräume Kälte benötigt wird, da es warme Tage gibt, an denen kein Verbrauch auftritt.

Der zu erwartende Jahresverbrauch für das Jahr 2009 wird auf 1,6 MWh geschätzt. Die maximale registrierte Leistungsaufnahme lag seit Austausch des Zählers bei 4 kW, eine installierte Leistung für diesen Kälteanschluss ist nicht bekannt.

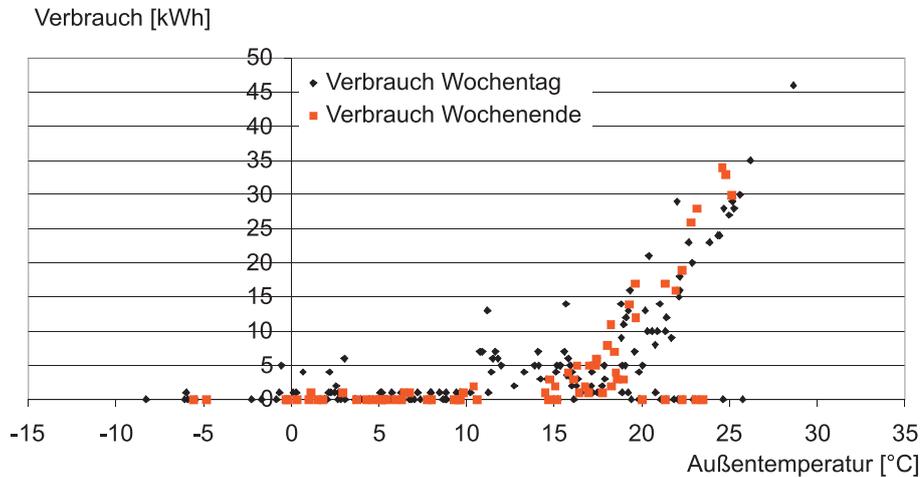


Abbildung 112: Täglicher Kälteverbrauch für die RLT „Besprechung“ seit 1.1.2009, in Abhängigkeit von der Außentemperatur

4.4.8. Kälte Klimageräte EDV

Im Bauteil B und C werden im Untergeschoss die Abgänge für die Klimageräte Server/EDV über je einen Wärmemengenzähler erfasst. Im Jahr 2007 wurden im Bauteil B 18,1 MWh und im Bauteil C 131,5 MWh zur Kühlung benötigt, im Jahr 2008 waren es 22,5 bzw. 116,3 MWh.

Die mittlere Leistung im Jahr 2008 lag somit im Bauteil B bei 2,6 kW, im Bauteil C bei 13,3 kW. Die Kühlung lief im Dauerbetrieb, die benötigte Kälte war nur leicht von den Außentemperaturen abhängig, da die EDV-Räume wenig Kopplung an das Außenklima haben. Die deutlich unterschiedlichen Kühllasten ergaben sich durch die unterschiedliche Bestückung der Serverräume.

Für Bauteil B wurde ein einziges Mal 10 kW Leistungsaufnahme registriert (mittlere Leistung in einer Stunde), einige wenige Male lag die Leistung bei 6 kW. Im Bauteil C befinden sich hinter dem Zähler (K11) 10 Kühlgeräte mit einer Gesamtleistung von ungefähr 67 kW. Im Jahr 2007 lag die maximal registrierte Leistung bei 40 kW, in den Jahren danach noch bei 30 kW.

4.4.9. Hilfsenergie Kühlen

Der Energieverbrauch für die Hilfsenergie beim Kühlen wurde analog demjenigen beim Heizen ermittelt. Auch hier konnten nicht alle Werte aus der GLT ausgelesen werden. Für zukünftige Monitoring-Projekte wird empfohlen, zumindest die großen Pumpen mit langen Laufzeiten mit einfachen Stromzählern auszustatten. Diese müssen zwar vor Ort abgelesen werden, kosten jedoch nicht viel und bieten eine weitaus größere Zuverlässigkeit als die Hochrechnung über Betriebsstunden.

Insgesamt ergab sich für die Hilfsenergie bei der Kühlung ein Stromverbrauch von 28,5 MWh, spezifisch 1,3 kWh/m²a. Die Tabelle 24 stellt die einzelnen Fakten zu den Umwälzpumpen zusammen.

ID	Bezeichnung	Jahresverbrauch 2007/2008 [kWh]	Flächenspezifischer Jahresverbrauch (Nutzenergie) [kWh/m ² a]	Bezugsfläche [m ²]
K01	Kühldecken gesamt	21.660	0,99	21.875
	defekt		–	–
K02	RLT Halle EG	25.730	17,29	1.488
		20.220	13,59	
K03	RLT Catering	8.425	0,39	21.875
		4.951	0,23	
K04	RLT Sitzungssaal	31.642	135,80	233
		43.991	188,80	
K05	RLT Vorstand	76.700	52,90	1.450
		121.840	84,03	
K06	RLT Küche	erst ab 11/08	–	–
K07	RLT Teeküche	4.412	0,20	21.875
		4.860	0,22	21.875
K08	RLT Besprechung	erst ab 11/08	–	–
K09	RLT gesamt	453.610	21,74	21.875
		511.620	23,39	21.875
K10	Klimageräte Server EDV Bauteil B	18.072	0,83	21.875
		22.484	1,03	21.875
K11	Klimageräte Server EDV Bauteil C	131.540	6,01	21.875
		116.250	5,31	21.875
K12	Kühldecken Vorstand Bauteil D	120	0,08	1.450
		640	0,44	1.450
K13	Kühldecken Bauteil C (Büros)	3.310	0,15	21.875
		9.470	0,43	21.875
K14	Kühldecken Bauteil B (Büros)	8.710	0,40	21.875
		8.350	0,38	21.875
K15	Kühldecken Bauteil A (Büros)	6.850	0,31	21.875
		7.580	0,35	21.875
K16	Haupthaus gesamt (aus Nordarkade)	608.268	27,81	21.875
		435.319	19,90	21.875
K17	RLT Speiseräume Vorstand	defekt	–	–
K18	Klimaboden	erst ab 11/08	–	–
K19	RLT Spülküche	erst ab 11/08	–	–

Tabelle 23: Gemessene Jahreskälteverbräuche; wo bekannt auf die jeweilige Fläche bezogen, sonst auf die Gesamtfläche des Gebäudes, in der ersten Zeile jeweils Wert für 2007, in der zweiten Zeile für 2008

ID	Bezeichnung	Anzahl	Leistungsaufnahme [kW]	2008	2009
P1	Primärkreis	1	1,50	+2.000	
P2	Kühldecken BT A-D	1	7,50	1.080	1.280
P2/2	Kühldecken BT A-D	1	7,50	1.090	1.300
P3	Datenverarbeitung BT B	1	0,29	+8.760	
P4	Datenverarbeitung BT C	1	0,29	+8.760	
P7	Händlertische BT A	2	0,35	+8.760	
	RLT-Anlage D01 Vorstand adiabatisch	1	*0,3	176	93
	Medientrennung Kälte Dachgeschoss BT C	1	*0,3	2.850	3.330
	Kälteverbraucher HH 04-2 Pumpe 1	1	*0,6	2.210	
	Kälteverbraucher HH 04-2 Pumpe 2	1	*0,6	2.170	
	Kälteverbraucher HH 04-1 Pumpe 1	1	*0,6	2.230	
	Kälteverbraucher HH 04-1 Pumpe 2	1	*0,6	2.230	

Tabelle 24: Ermittelte jährliche Vollbetriebsstunden der Kälteumwälzpumpen, die aus den Betriebsstunden in der GLT ermittelt wurden. Bei fehlenden Daten wurden die Vollbetriebsstunden geschätzt, diese sind mit einem + markiert. Die aus den Ausführungsplänen ersichtlichen Pumpen sind mit der entsprechenden ID versehen. Unbekannte Leistungsaufnahmen wurden geschätzt und mit einem * versehen.

4.5. Beleuchten

Die Ergebnisse des Energieverbrauchs für die Beleuchtung stellen eine Mischung aus automatisch aufgezeichneten Werten, aus manuell abgelesenen Monatswerten und Hochrechnungen aus temporären Insitu-Messungen der Betriebszeiten dar. Insgesamt wurde im Jahr 2007 für die Beleuchtung ein spezifischer Stromverbrauch von $15,2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Endenergie) ermittelt. Im Jahr 2008 ist dieser leicht um 0,8 auf $14,4 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ gesunken. Primärenergetisch ergibt sich ein Wert von 41,1 bzw. $38,9 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, der sehr nah an dem ermittelten Zielwert aus der Planungsphase liegt.

Tabelle 25 listet zunächst die gemessenen Jahresstromverbräuche für die erfassten Bereiche auf. In den folgenden Kapiteln werden die Tageslichtqualität der Räume sowie Überprüfungen der Kunstlichtregelung beschrieben. Es schließen sich Messergebnisse für einzelne Nutzungsbereiche und Erläuterungen der Hochrechnungen an.

4.5.1. Tageslichtqualität der Büroräume

Im Zuge der Sanierung erfolgte auch eine Tageslichtoptimierung der Fassade. Die außenliegenden auskragenden Putzbalkone wurden entfernt. Der Fenstersturz ist auf die Höhe des Fensterrahmens minimiert. Eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Tageslichtversorgung ist der Tageslichtquotient, der die Beleuchtungsstärke im Rauminnern ins Verhältnis zu der außen verfügbaren setzt.

Beispielhaft wurden im Jahr 2006 in einigen Büros die Tageslichtquotienten ermittelt. Dazu wurde in Ein-Meter-Abständen von der Fensterebene aus jeweils in der Raummitte und einen Meter von den Seitenwänden entfernt in einer Höhe von 85 Zentimetern die Beleuchtungsstärke gemessen. Im schmalen Zweiachserbüro wurde nur in der Mittelachse gemessen. Der Arbeitsplatz eines Mitarbeiters befindet sich üblicher Weise ca. zwei Meter vom Fenster entfernt.

Abbildung 113 zeigt exemplarisch das Ergebnis zweier Messungen in einem solchen Zweiachserbüro,

die Abbildung 114 zeigt die Fassade von innen. Der Tageslichtquotient bleibt auch in 5 m Entfernung von der Fensterebene noch über dem Mindestwert von 0,9 % [10].

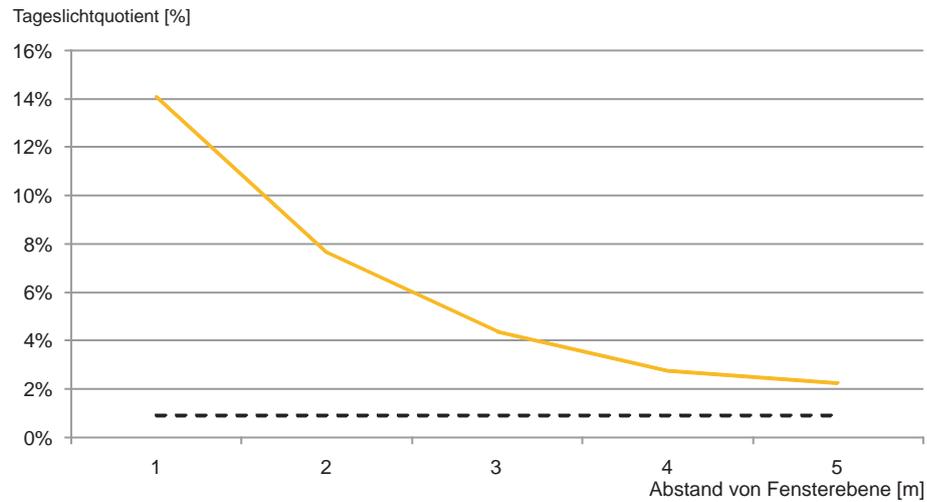


Abbildung 113: Tageslichtquotienten in Raum V in Abhängigkeit von der Raumtiefe



Abbildung 114: Fassade von innen in Raum V

In Abbildung 115 sind die Ergebnisse eines Dreiaxserbüros dargestellt. Der mittlere Fensterflügel ist feststehend und weist oben und unten keinen sichtbaren Rahmen auf (Abbildung 116). Auf dem Photo ist der Sonnenschutz ein Stück heruntergefahren, für die Messung wurde er allerdings komplett nach oben gefahren. Die Tageslichtquotienten liegen in der Raummittelachse erwartungsgemäß etwas höher, im Bereich des Arbeitsplatzes liegt der Wert zwischen 4 und 5 Prozent.

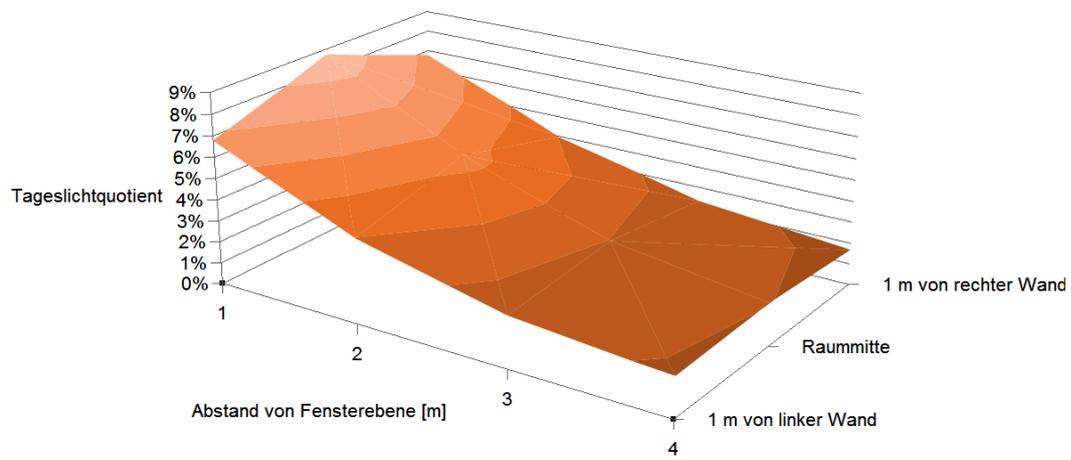


Abbildung 115: Tageslichtquotienten in Raum D abhängig von der Position im Raum



Abbildung 116: Fassade von innen in Raum D

ID	Bezeichnung	Jahresverbrauch 2007 und 2008 [kWh]	Flächenspezifischer Jahresverbrauch (Endenergie) [kWh/m ² a]	Bezugsfläche [m ²]
S15	Beleuchtung Wandelhalle A+B	34.548	47,3	730
		16.827	23,1	
S18	Beleuchtung Wandelhalle C	11.066	46,5	238
		11.512	48,4	
S19	Beleuchtung Wandelhalle D	8.467	45,5	186
		12.121	65,2	
S16	Beleuchtung Sitzungssaal	9.945	42,7	233
		9.142	39,2	
S21	Beleuchtung Speiseräume Di- rektion	1.259	8,9	142
		1.153	8,1	
S31	Beleuchtung Büros 8.OG BT A	1.010	5,2	194
		1.204	6,2	
S32	Beleuchtung Büros 5.OG BT B	2.106	10,9	194
		1.958	10,1	
S33	Beleuchtung Büros 8.OG BT B	5.862	30,2	194
		4.478	23,1	
S34	Beleuchtung Büros 12.OG BT B	1.658	8,5	194
		1.732	8,9	
S35	Beleuchtung Büros 8.OG BT C	2.442	12,6	194
		2.486	12,8	
S36	Beleuchtung Büros 8.OG BT D	524	1,9	281
		839	3,0	
S37	Beleuchtung Flur 8.OG BT A	610	5,8	105
		526	5,0	
S38	Beleuchtung Flur 5.OG BT B	5.421	58,3	93
		4.218	45,35	
S39	Beleuchtung Flur 8.OG BT B	1.326	14,6	91
		2.535	27,9	
S40	Beleuchtung Flur 12.OG BT B	5.228	56,8	92
		5.194	56,5	
S41	Beleuchtung Flur 8.OG BT C	809	8,9	91
		820	9,0	
S42	Beleuchtung Flur 8.OG BT D	293	2,7	107
		959	9,0	

Tabelle 25: Gemessene Jahresstromverbräuche für die Beleuchtung in den Jahren 2007 (jeweils erste Zeile) und 2008 (jeweils zweite Zeile), bezogen auf die jeweilige Fläche

4.5.2. Kunstlichtregelung

Im August 2006 wurden während der Inbetriebnahmephase die Beleuchtungsstärken auf den Arbeitsoberflächen in zwei Büros exemplarisch gemessen. Von der Planerseite war vorgegeben, dass der Nutzer das Beleuchtungsstärkeniveau auf seinem Arbeitsplatz über das Bedienelement im Bereich von 300 bis 700 lx wählen können sollte. Bei den Messungen wurden jedoch bei niedrigster Dimmeinstellung Werte von nur ca. 60 lx (Abb. 117) bzw. ca. 90 lx (Abb. 118) gemessen.

Auch bei der Einstellung des Maximalwertes über das Bedienelement wurden deutliche Abweichungen sichtbar. Statt der geplanten 700 lx wurden ca. 950 lx (Abb. 119) bzw. ca. 1.100 lx (Abb. 120) gemessen. Hier konnten wir bereits in der Inbetriebnahmephase helfen, unplausible Reglereinstellungen zu beheben. Die Elektrofirma musste die Einstellungen erneut überprüfen und nachjustieren. Erneute Stichproben ergaben danach die korrekte Einregelung der Kunstlichtanlage.

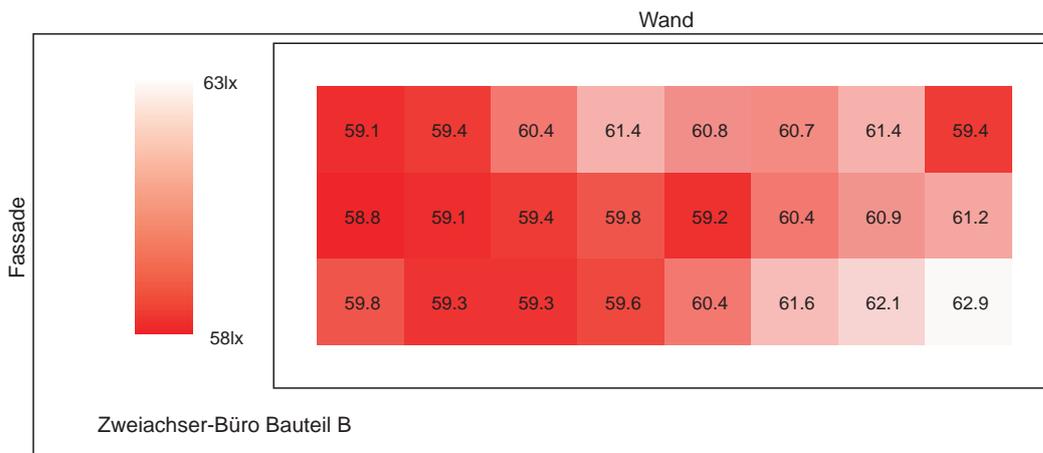


Abbildung 117: Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Arbeitsoberfläche bei Minimaleinstellung über das Bedienelement in einem Zweiachser-Büro am 24.8.2006

Auch die geplante Adaption an zunehmende Außenbeleuchtungs niveaus wurde von uns in der Inbetriebnahmephase überprüft. Zunächst funktionierte die Regelung nicht wie geplant, die Einzelraumregelung musste hinsichtlich dieser Parameter korrigiert werden (siehe Abbildung 121). Aufgrund einfacherer Handhabung wurde bei dieser Überprüfung nicht die Außenbeleuchtungsstärke auf dem Dach, sondern in der Fensterebene gemessen. Das Ergebnis muss aber qualitativ das gleiche sein. Man erkennt jedoch deutlich, dass bei geringer Helligkeit draußen innen nicht zunächst auf ein konstantes Niveau geregelt wird, sondern die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsoberfläche von Beginn an ansteigt. Auch bei hohem Tageslichtangebot wird der zweite Bereich eines Konstant-Sollwertes nicht erreicht, sondern vielmehr ist zu erkennen, dass ab einem bestimmten Wert außen (hier 3.500 lux in der Fensterebene) nicht mehr weiter heruntergedimmt bzw. schließlich das Kunstlicht ausgeschaltet wird.

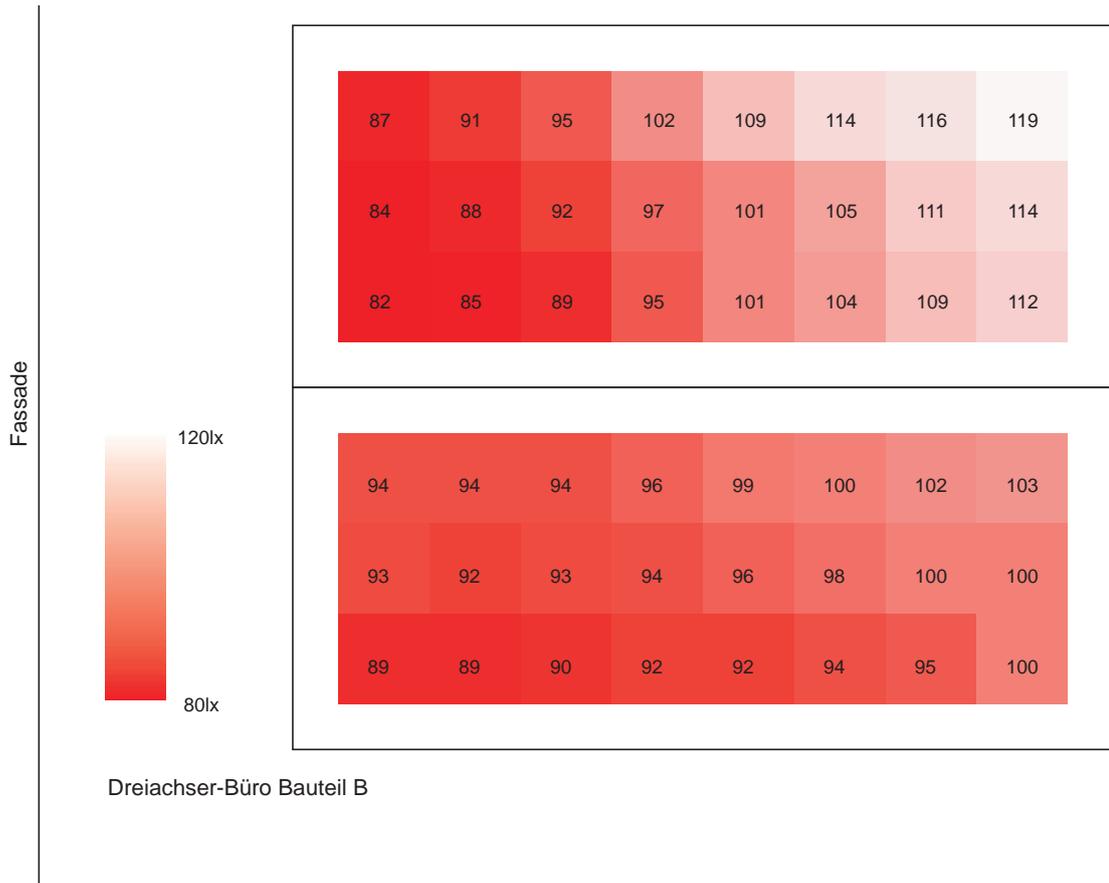


Abbildung 118: Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Arbeitsoberfläche bei Minimaleinstellung über das Bedienelement in einem Dreiachser-Büro am 24.8.2006

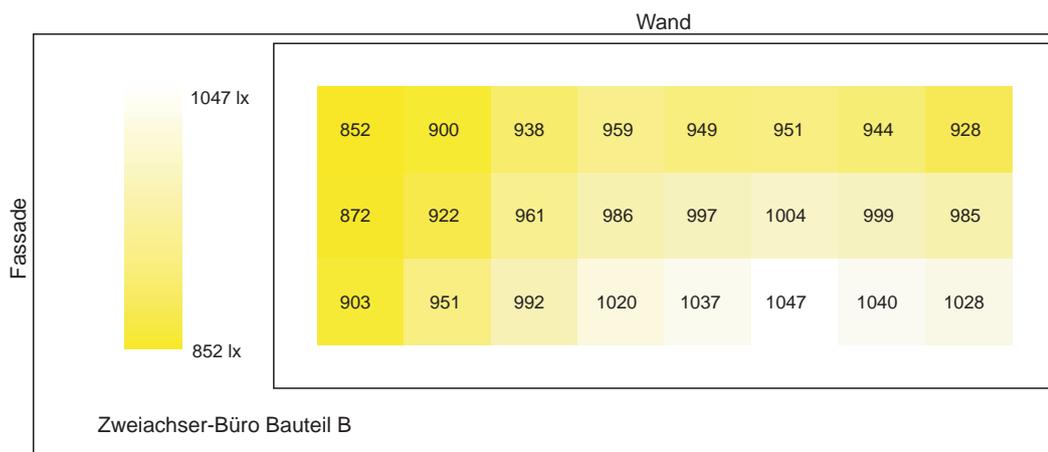


Abbildung 119: Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Arbeitsoberfläche bei Maximaleinstellung über das Bedienelement in einem Zweiachser-Büro am 24.8.2006

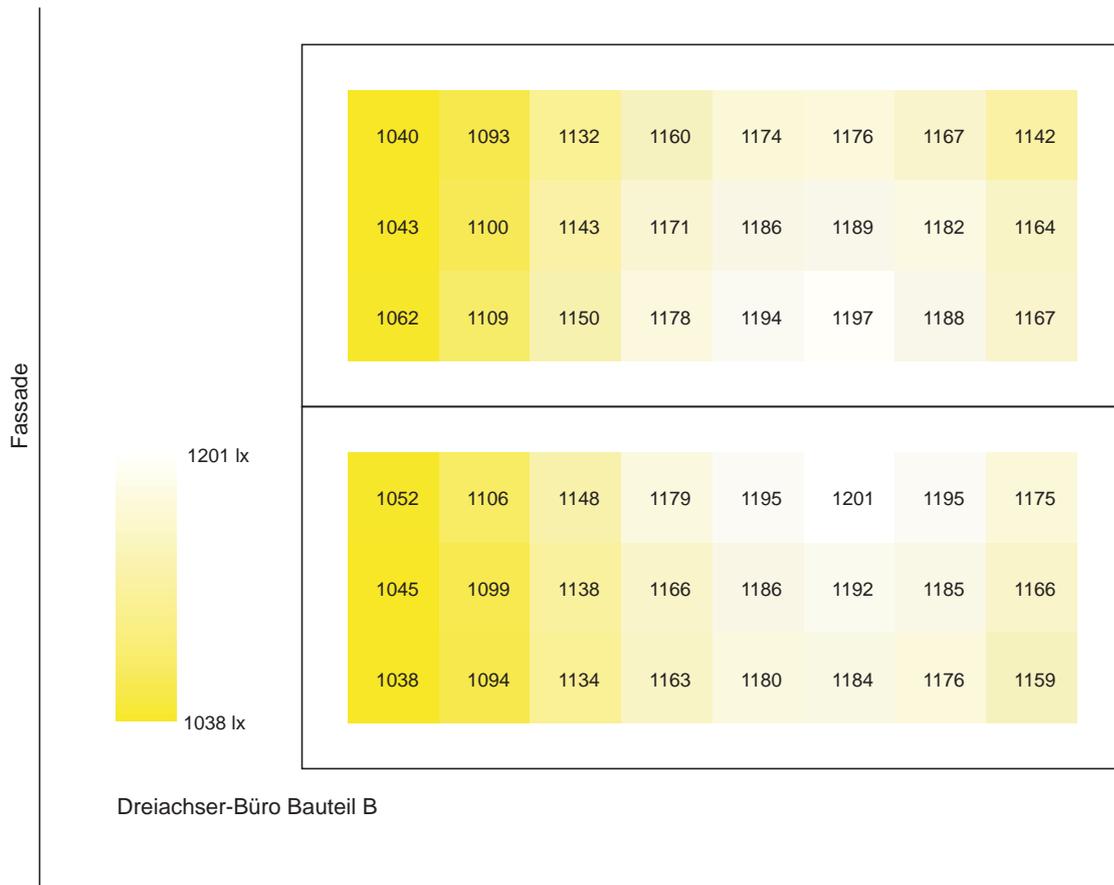


Abbildung 120: Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Arbeitsoberfläche bei Maximaleinstellung über das Bedienelement in einem Dreiachser-Büro am 24.8.2006

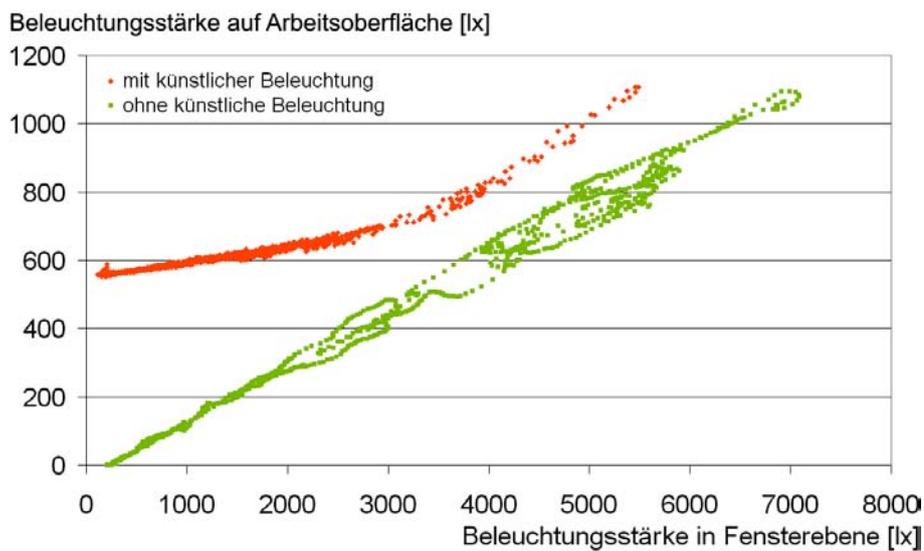


Abbildung 121: Messung von Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsoberfläche und in der Fensterebene zur Überprüfung der Kunstlichtregelung

4.5.3. Büros

Exemplarisch wurde auf 6 Etagen der Stromkreis für die Beleuchtung der Büros erfasst. Hochgerechnet auf alle Büros (über die Anzahl) ergibt sich 2007 ein Jahresverbrauch von 130.500 kWh. Spezifisch auf die gesamte Energiebezugsfläche des Gebäudes bezogen ist das ein Verbrauch von 6 kWh/m²a. Bezogen auf die Bürofläche sind das 13,6 kWh/m²a. Im Jahr 2008 ist der Gesamtverbrauch nur leicht auf 132.600 kWh gestiegen.

Trägt man die täglichen Stromverbräuche für die Beleuchtung der Büros über der tagesmittleren Globalstrahlung auf, ist insbesondere aufgrund der tageslichtabhängigen Kunstlichtregelung eine Abnahme mit steigender Globalstrahlung zu erwarten. Abbildung 122 bestätigt diese Annahme und zeigt, dass ab einem Tagesmittelwert von ca. 250 W/m² keine Beleuchtung mehr benötigt wird bzw. diese selbst abschaltet. Dies ist auch im 12. OG Bauteil B der Fall (bei ca. 300 W/m²) und im 8. OG des Bauteils D (bei ca. 220 W/m²).

Im 5. OG Bauteil B, im 8. OG Bauteil B (Abbildung 123) und im 8. OG Bauteil C verhalten sich die Stromverbräuche anders. Hier werden auch an den hellsten Tagen mit einer mittleren Globalstrahlung von 300 W/m² noch Stromverbräuche gemessen, die zwischen 30 und 60 % der Werte an sehr dunklen Tagen liegen und nicht gegen 0 tendieren.

Die Gründe hierfür sind nicht bekannt und können verschiedenartig sein. Entweder ist die Kunstlichtregelung nicht richtig eingestellt, es sind andere Verbraucher auf diesen Stromkreis aufgeschaltet, die während der Nutzungszeit in Betrieb und vom Tageslichtangebot mehr oder weniger unabhängig sind. Es wurde überprüft, dass es keine konstanten Verbraucher sind, die 24 Stunden in Betrieb sind.

Für die Beleuchtung im Vorstandsbereich wurde in der Planungsphase ein Bedarf von 5.528 kWh/a errechnet und eine Vollbetriebszeit von 1.100 Stunden angenommen. Im Jahr 2007 ergeben hier Büros und Flure zusammen einen Stromverbrauch von 4.898 kWh und treffen die Prognose somit recht genau. Die einzelnen für die Büroetagen gemessenen Werte sind in Abbildung 124 dargestellt. Das dritte Jahr umfasst den Zeitraum von Juli 2008 bis Juni 2009. Der Stromverbrauch hat sich während der zweieinhalb Jahre kaum verändert.

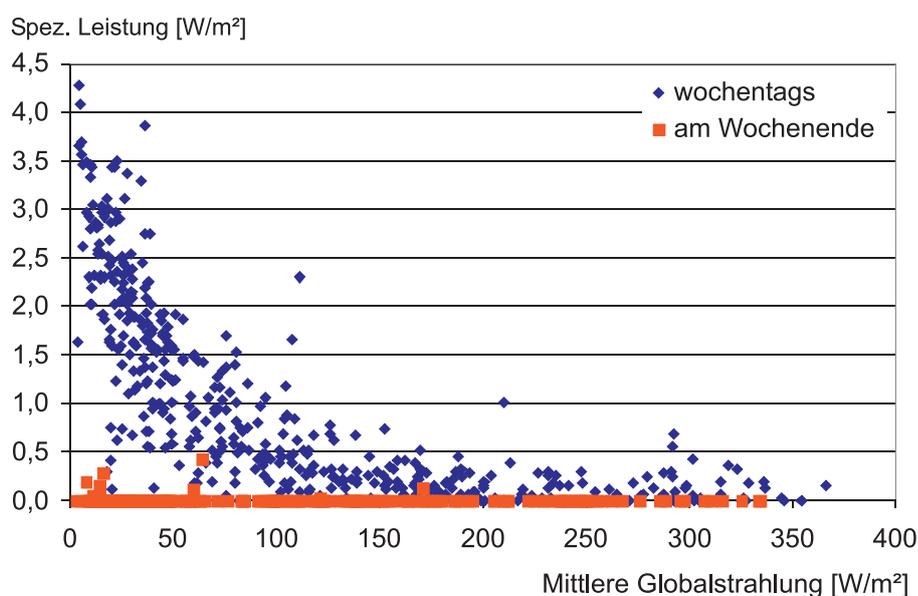


Abbildung 122: Beleuchtungsstromverbrauch im Büro 8.OG, Bauteil A, in Abhängigkeit von der mittleren Globalstrahlung, Tageswerte

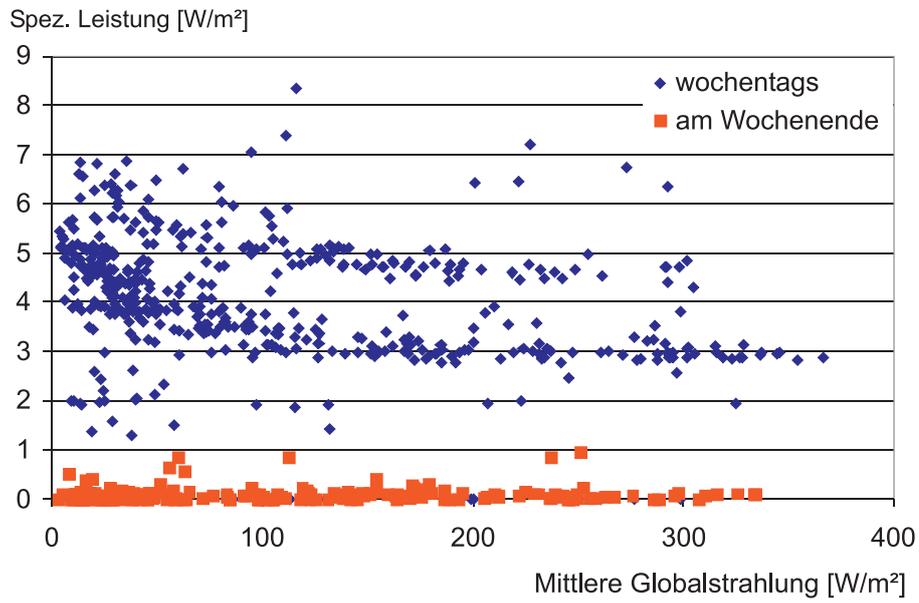


Abbildung 123: Beleuchtungsstromverbrauch im Büro 8.OG, Bauteil B, in Abhängigkeit von der mittleren Globalstrahlung, Tageswerte

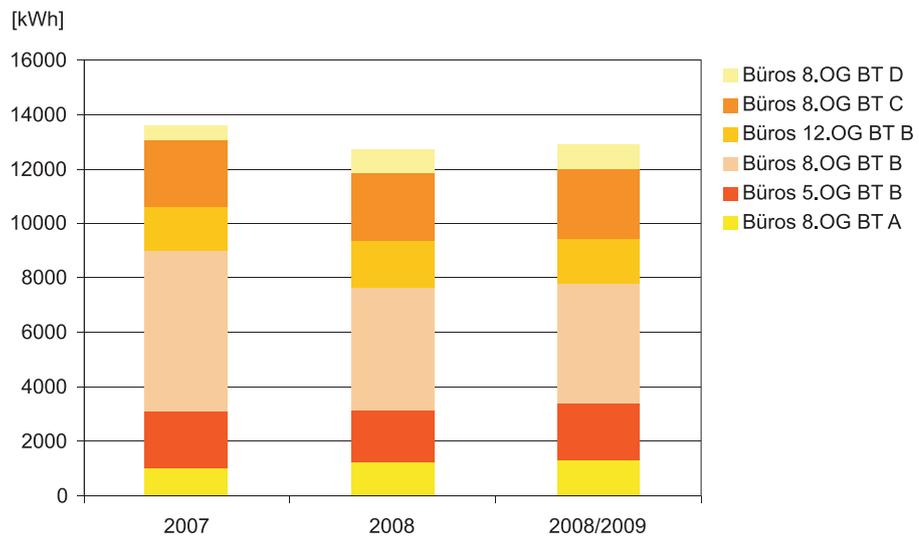


Abbildung 124: Jahresstromverbrauchswerte für die Beleuchtung der sechs exemplarisch erfassten Büroetagen

4.5.4. Flure

In den gleichen sechs Geschossen wurde auch der Stromverbrauch für die Flurbeleuchtung gemessen. Die Hochrechnung der gemessenen Verbräuche für alle Flure ergibt für das Jahr 2007 einen Wert von ca. 94.300 kWh, was spezifisch auf die Gesamtenergiebezugsfläche einen Wert von 4,3 kWh/m²a ergibt. Die Beleuchtung des Flurs im 8.OG des Bauteils A ist wochentags von 5 bis 17:30 Uhr in Betrieb (Abbildung 125). Die Betriebszeiten der anderen Flure in Bauteil B und C entsprechen diesen Werten.

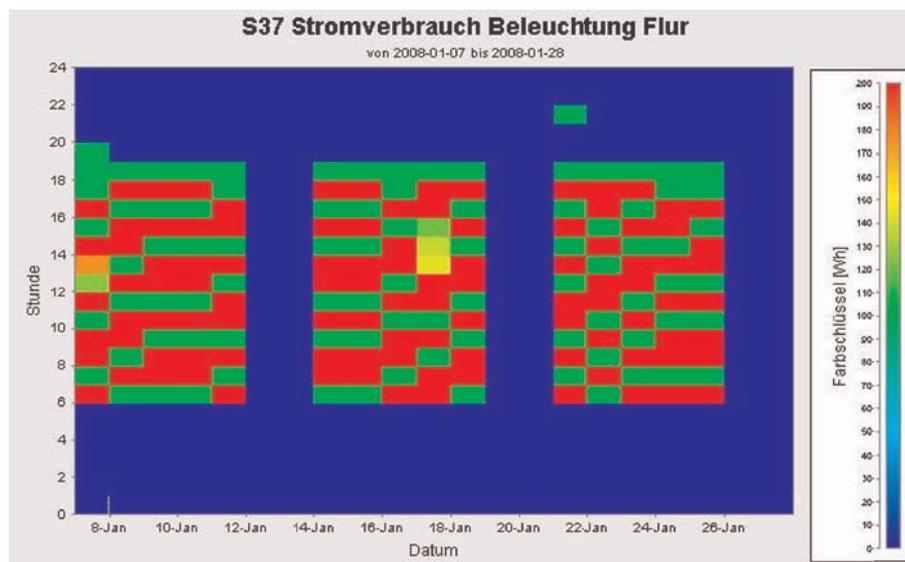


Abbildung 125: Ermittelte Verbrauchswerte der Flurbeleuchtung im 8. OG, Bauteil A, vom 7.1. bis 28.1.2008

In den Fluren der Bauteile A bis C kommen T3 und T6 Röhren zum Einsatz, im Vorstandsbereich in Bauteil D sind es Neon-Röhren. Für die Beleuchtung des Flures im 5.OG des Bauteils B werden bei eingeschalteter Beleuchtung ca. 1.500 W gemessen (Abbildung 126). Für die Beleuchtung im 8. OG des Bauteils B wird bei gleicher installierter Leistung im Betrieb nur eine maximale Leistungsaufnahme von ca. 750 W gemessen. Hier wurde die Lichtleiste für das Streiflicht am Aufzugskern nicht auf den Zähler mit aufgeschaltet, um einen Vergleichswert zu den anderen beiden Zählern zu haben. Beim Jahresverbrauch macht der Verbrauch der Lichtleiste pro Etage eine Differenz von ca. 4.200 kWh aus.

Ein deutlicher Unterschied bei der Regelung des Kunstlichts zeigt sich in Bauteil D im Vorstandsbereich (Abbildung 127). Hier wird die Flurbeleuchtung nur bei Bedarf und zwar durch Tastendruck eingeschaltet. Die maximal registrierte Leistungsaufnahme über diesen Zähler liegt bei ca. 1000 Watt.

Die einzelnen für die Büroetagen gemessenen Werte sind in Abbildung 128 dargestellt. Das dritte Jahr umfasst den Zeitraum von Juli 2008 bis Juni 2009. Der Stromverbrauch hat sich während der zweieinhalb Jahre kaum verändert. Deutlich zu erkennen sind die beiden Flure mit den Lichtbändern an den Wänden des Aufzugskerns.

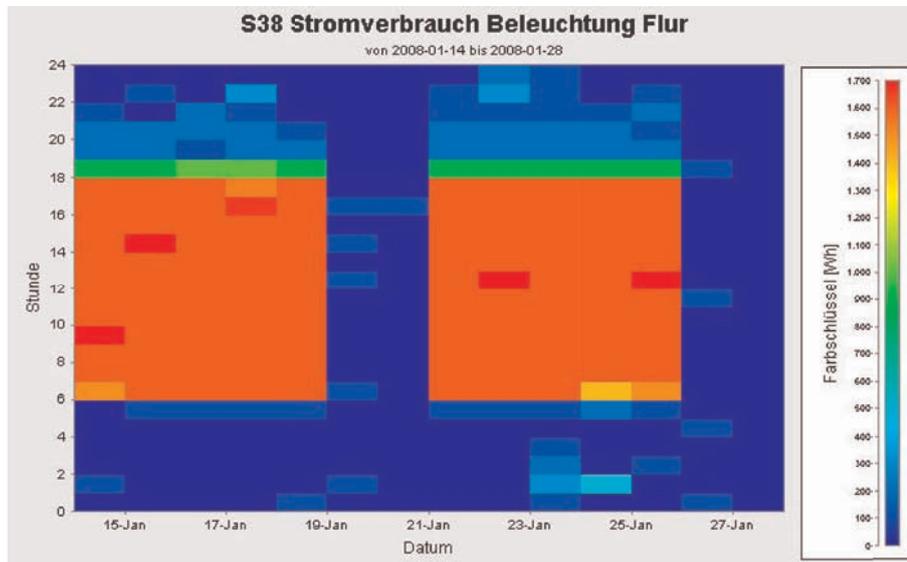


Abbildung 126: Ermittelte Verbrauchswerte der Flurbeleuchtung im 5. OG, Bauteil B, vom 14.1. bis 28.1.2008

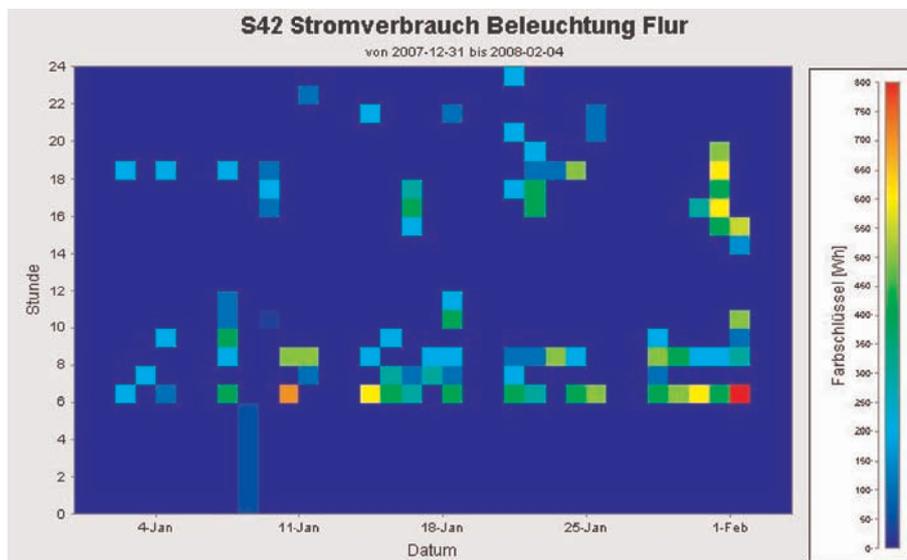


Abbildung 127: Ermittelte Verbrauchswerte der Flurbeleuchtung im 8. OG, Bauteil D, vom 31.12.2007 bis 4.2.2008

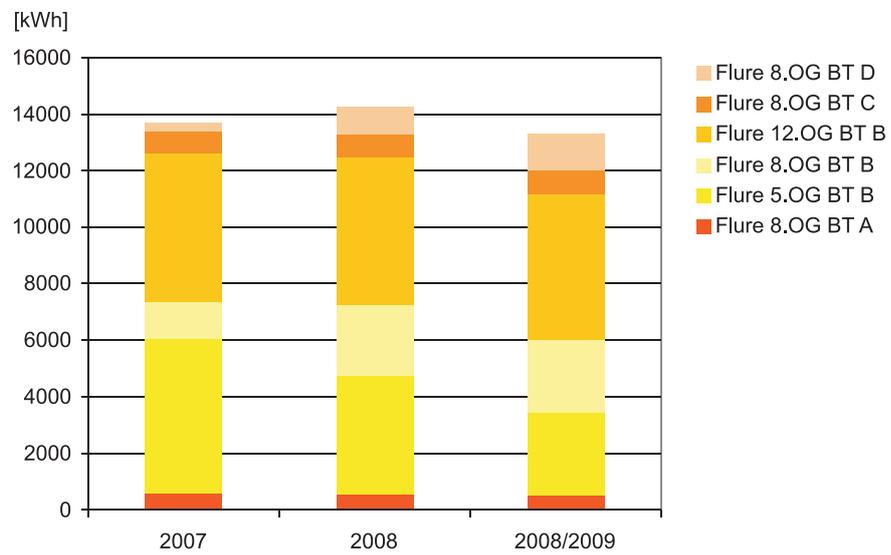


Abbildung 128: Jahreswerte des Stromverbrauchs für die Beleuchtung der Flure

4.5.5. Treppenhäuser

Der Stromverbrauch für die Beleuchtung der Treppenhäuser wurde nicht über Zähler erfasst, sondern mittels per Datenloggern ermittelten Laufzeiten und der installierten Leistung errechnet.

Die Betriebszeit wurde auf ein Jahr hochgerechnet und bei einer Begehung wurden alle Leuchten gezählt. Je zwei HoBos mit Lichtsensoren wurden pro Treppenhaus zwei Wochen lang in der Nähe der Leuchtmittel befestigt. Diese zeichneten jede Minute einen Wert auf, so dass sich sehr genaue Profile der Schaltzeiten der Beleuchtung ablesen ließen.

Für die vier Treppenhäuser wurden zu diesem Zeitpunkt ganz unterschiedliche Regelungszeiten festgestellt.

Im Treppenhaus des Bauteils A war das Zeitschema auf 5:30 bis 18:30 Uhr an allen Tagen der Woche eingestellt. Die Berechnung der Betriebsstunden für ein Jahr ergab in Bauteil A 5.131 Stunden. Im Treppenhaus 1 des Bauteils B wurde ein Dauerbetrieb der Beleuchtung festgestellt. Im zweiten Treppenhaus des Bauteils B war das Zeitschema auf Wochentage von 5:00 bis 17:30 Uhr beschränkt. Die jährliche Betriebszeit wurde auf 3.800 Stunden ermittelt. Im Treppenhaus des Bauteils D war das Zeitschema auf 5:30 bis 17:30 Uhr eingestellt, die hochgerechnete Jahresbetriebsdauer betrug 3.500 Stunden.

Beispielhaft ist hier Abbildung 129 aufgeführt, welche die Messungen in Bauteil D zeigt. Gut lassen sich die Wochenenden und die regelmäßigen Zeitschemata an den Wochentagen erkennen. Wochentags von 5:30 bis 17:30 Uhr ist die Beleuchtung dauerhaft eingeschaltet, an anderen Zeiten wird sie durch Tastendruck aktiviert.

Nach Mitteilung dieser Messergebnisse an die KfW wurden die Betriebszeiten an die Nutzungszeiten von Montag bis Freitag, 5:30 bis 17:30 Uhr angepasst. Die dadurch erzielbare Einsparung gegenüber dem bisherigen Zustand wurde berechnet und lag bei 31,2 Prozent.

Über die installierte Leistung und die errechneten Betriebszeiten wurde ein Jahresstromverbrauch von 43.000 kWh für die Beleuchtung der Treppenhäuser ausgerechnet. Bezogen auf die gesamte Energiebezugsfläche des Gebäudes sind das 2 kWh/m²a (Endenergie).

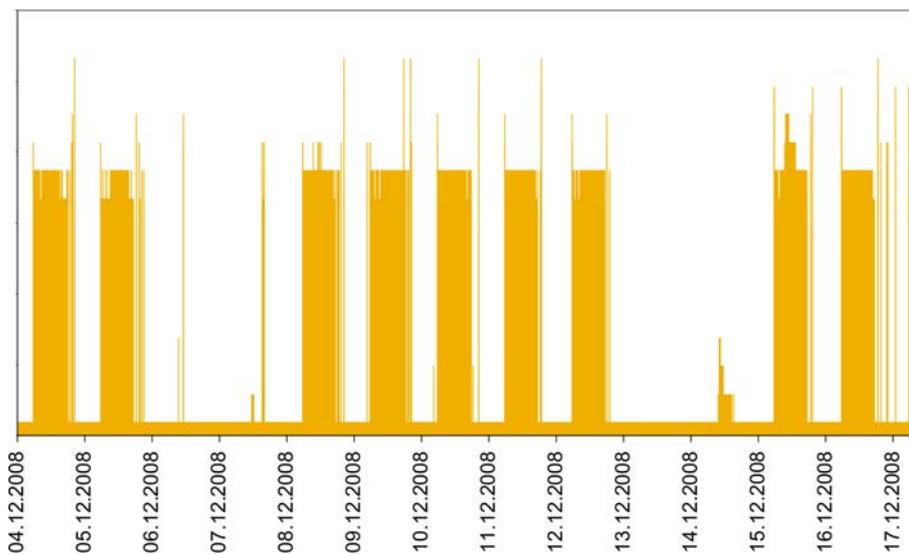


Abbildung 129: Über mobile Datenlogger ermittelte Betriebszeiten der Treppenhausbeleuchtung in Bauteil D

4.5.6. WCs

In den WCs wurden ebenfalls keine Stromzähler installiert, stattdessen wurden im Rahmen von Stichproben im Oktober 2008 die Betriebszeiten der Beleuchtung über Datenlogger erfasst. Die Messungen entsprachen dem in der GLT hinterlegten Zeitschema, nach dem die Beleuchtung in den WCs wochentags von 5:30 bis 17:30 eingeschaltet ist und außerhalb dieser Zeit vom Nutzer manuell eingeschaltet werden kann.

Im Rahmen der Energieoptimierung ergänzte die KfW die Beleuchtungsregelung in zwei WCs um einen Präsenzmelder. Die Regelung wurde auf ein festes Zeitschema von wochentags 5:00 bis 10:30 Uhr und eine Präsenzschtaltung in der restlichen Zeit umgestellt. In zwei dieser umgerüsteten WCs wurden die Betriebszeiten der Beleuchtung gemessen (Tabelle 26). Bei der zweiten Messung ist durch Weihnachten und Neujahr sowohl ein Zeitraum mit seltener Nutzung des WCs enthalten, als auch mit der zweiten Januarhälfte ein Zeitraum mit normaler Nutzung.

	Messung Sep/Okt 2008	Messung Dez/Jan 2009
H WC 301		P
H WC 302	Z	P
H WC 402	Z	Z
H WC 502	Z	

Tabelle 26: Messungen der WC-Beleuchtungszeiten bei Regelung nach Zeitprogramm (Z) und anhand von verkürztem Zeitprogramm kombiniert mit Präsenzregelung (P)

Bei Verwendung der Präsenzregelung reduziert sich die Betriebszeit der Beleuchtung im Zeitraum mit seltener Nutzung deutlicher als bei der Regelung nach Zeitschema. Im WC 302 ist sie 30 % und im WC 301 27 % geringer als bei normaler Nutzung, im WC 402 liegt sie allerdings nur 10 % niedriger.

Auch bei der Betrachtung der absoluten Zahlen zeigt sich der Vorteil der angepassten Regelung. Im WC 302 wurden im Oktober 2008 3.916 Betriebsstunden pro Jahr errechnet, nach der Umrüstung wurden im Januar 2009 nur noch 2.734 Jahresbetriebsstunden errechnet. Dies entspricht einer Reduktion von 30 Prozent. Im WC 402 dagegen, in welchem die Regelung beibehalten wurde, betragen die Jahresbetriebsstunden 4.063 Stunden im Oktober 2008 und 3.925 Stunden im Januar 2009. Hier trat also kaum eine Veränderung ein.

Nimmt man 4 Leuchten a 36 Watt als installierte Kunstlicht-Leistung in einem WC an, ergibt sich anhand des obigen Beispiels eine jährliche Einsparung von ca. 170 kWh. Nimmt man 1 kWh mit einem Preis von 18 Cent an, lassen sich so pro Jahr ca. 30 Euro sparen. Bei einer rein wirtschaftlichen Betrachtung muss dieser Wert mit den einmaligen Kosten für die Umrüstung der Regelung und den laufenden Kosten (Stromverbrauch Präsenzmelder) verglichen werden.

Allerdings muss berücksichtigt werden, dass im Rahmen dieses Projektes lediglich die oben beschriebene nicht repräsentative Stichprobe durchgeführt wurde.

4.5.7. Halle Erdgeschoss

Die Stromversorgung für das Kunstlicht in der Halle ist in drei Stromkreise und zwar Bauteil A/B, Bauteil C und Bauteil D getrennt, die allesamt über Elektrozähler erfasst werden. Insgesamt verbrauchte die Beleuchtung der Halle im Jahr 2007 54 MWh, im Jahr 2008 waren es mit 40,5 MWh deutlich weniger. Bezogen auf die gesamte NGF des Gebäudes ist das ein spezifischer Wert von 2,5 kWh/m²a (2008: 1,9

kWh/m²a), bezogen auf die Fläche der Halle selbst waren es 37,5 kWh/m²a (2008: 28,1 kWh/m²a). In der Planung wurde ein Energiebedarf von 65,5 MWh/a für die Beleuchtung der Halle errechnet, die Vollbetriebsstunden wurden mit 2.750 Stunden angenommen. Die Nutzungszeiten der Halle hängen stark von der Anzahl und Dauer der dort stattfindenden Veranstaltungen ab.

Die höchste während des Monitorings gemessene Leistungsaufnahme für die Beleuchtung von Halle A/B betrug 18 kW. Die maximale Leistungsaufnahme für die anderen Bereiche konnte nicht festgestellt werden, da hier nur Monatswerte von den Zählern abgelesen wurden.

Rechnet man aus dem Jahresverbrauch und der maximalen Leistungsaufnahme auf die Volllaststunden zurück, erhält man für 2007 3.000 h und für 2008 2.250 h, so dass die 2.750 Stunden aus der Planung eine gute Annahme waren.

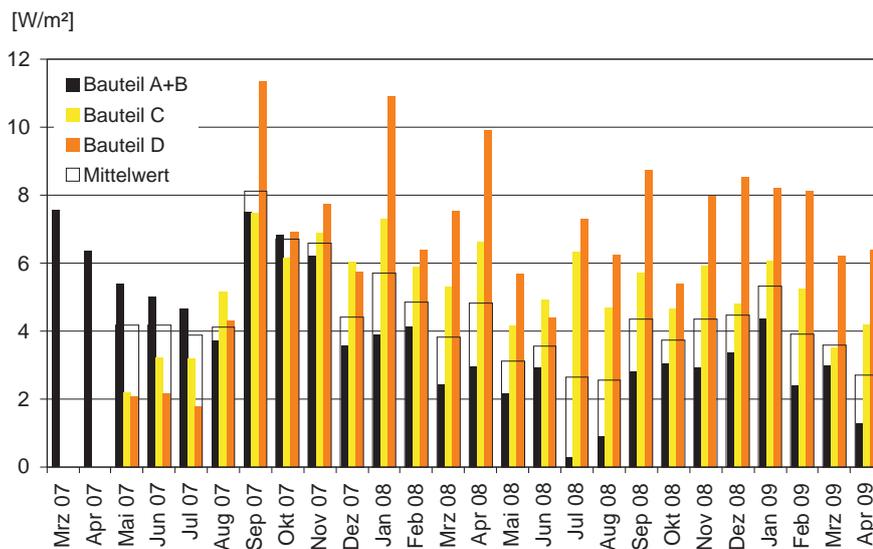


Abbildung 130: Monatsmittel der spezifischen Leistungsaufnahme der Beleuchtung in der Wandelhalle, getrennt nach Flächen und als flächengewichteter Mittelwert

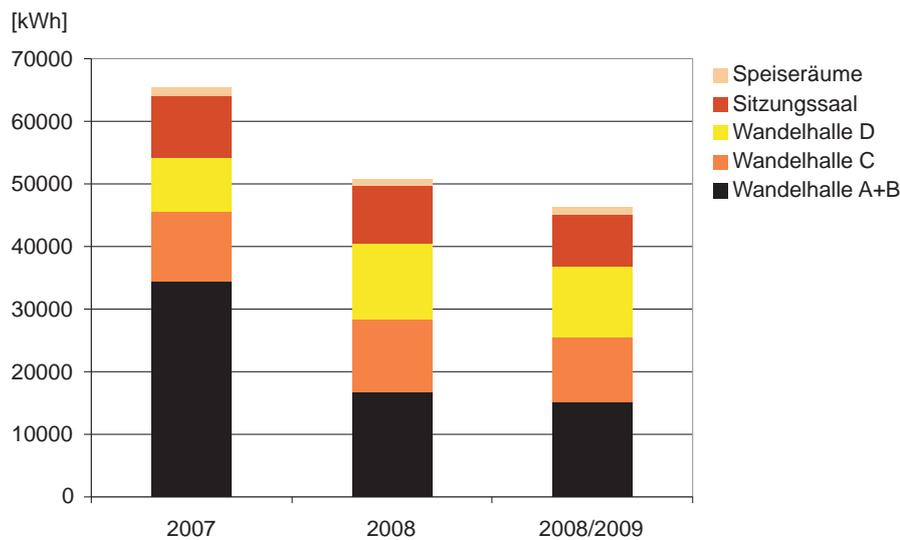


Abbildung 131: Jahreswerte des Stromverbrauchs für die Beleuchtung von Halle und Speiseräumen

4.5.8. Sitzungssaal

Der Stromverbrauch für die Beleuchtung des Sitzungssaals wurde über einen Zähler erfasst, der allerdings nur monatlich abgelesen wurde. Im Jahr 2007 wurden 9,9 MWh elektrische Energie verbraucht, 2008 waren es mit 9,1 MWh etwas weniger. Bezogen auf die Grundfläche des Sitzungssaals sind das 42 kWh/m²a (Endenergie). Die monatliche mittlere Leistungsaufnahme ist in Abbildung 132 dargestellt. Die Verbrauchswerte sind deshalb so hoch, weil der Sitzungssaal während der Projektlaufzeit sehr häufig genutzt wurde.

Da der Zähler hier nicht über die GLT ausgelesen wird, sondern nur einmal im Monat, können hier keine Tages- oder Wochenprofile zur genaueren Untersuchung erstellt werden. Eine jahreszeitliche Schwankung des Stromverbrauchs ist in Abbildung 132 nicht eindeutig, aber tendenziell zu erkennen.

Nimmt man eine installierte Leistung von 15 W/m² an, dann lägen die Volllaststunden bei ca. 2.700 Stunden, was ein durchaus plausibler Wert ist.

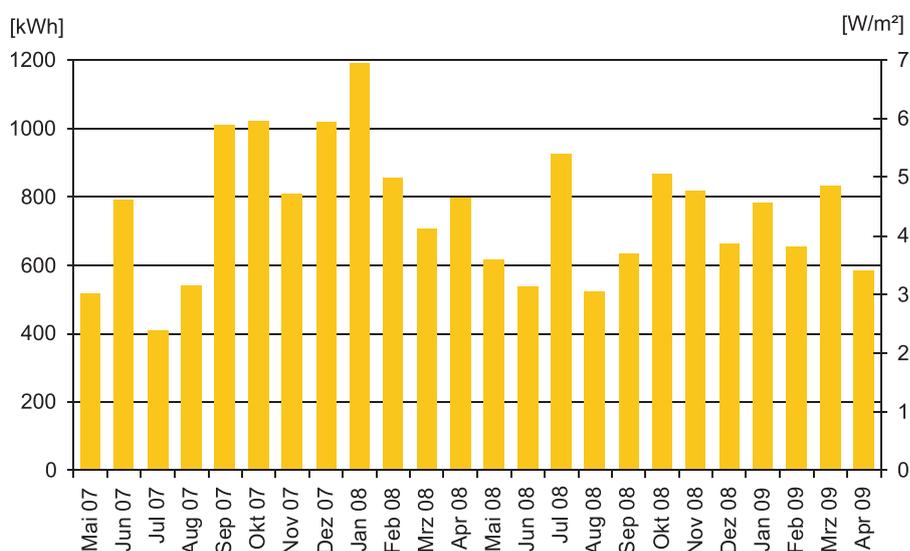


Abbildung 132: Monatsmittlere elektrische Leistungsaufnahme der Beleuchtung im Sitzungssaal

4.5.9. Sonstige Beleuchtung

Ein weiterer manuell abzulesender Stromzähler wurde noch am Stromkreis für die Beleuchtung der Direktionspeiseräume installiert. Der Jahresverbrauch betrug im Jahr 2007 1,3 MWh und im Jahr 2008 1,2 MWh.

4.6. Stromverbrauch

Neben dem Stromverbrauch in den Bereichen Luftförderung und Beleuchtung werden zur Ermittlung der Kennzahlen gemäß DIN V 18599-Systematik auch weitere Hilfsenergien wie für Pumpen oder andere haustechnische Anlagen berücksichtigt.

Außen vor bleiben dabei nutzerspezifische Verbraucher wie Computer, Monitore, Kaffeemaschinen, Kopierer und andere. Unser Anliegen war jedoch, auch deren Stromverbrauch zu ermitteln, um die Gesamtverteilung des Gesamtstromverbrauchs möglichst exakt bestimmen zu können.

4.6.1. Gesamtstromverbrauch

Der Jahresstromverbrauch des gesamten Gebäudes wurde über einen LON-fähigen Stromzähler erfasst. Dieser hat für das Jahr 2007 einen Wert von 1,94 GWh für das Haupthaus ermittelt, im Jahr 2008 waren es 2,31 GWh. Dabei ist zu beachten, dass hier der Stromverbrauch für die gesamte Heizzentrale enthalten ist, die ja über den Wärmeverbund auch Wärme für andere Häuser bereitstellt. Dafür ist aber die Kältezentrale nicht enthalten, die sich ja in der Nordarkade befindet und die Kälte für das Haupthaus bereitstellt. Das ist vermutlich auch der Grund, warum der Gesamtstromverbrauch bei kalten Temperaturen leicht höher ist, wie in Abbildung 133 zu erkennen.

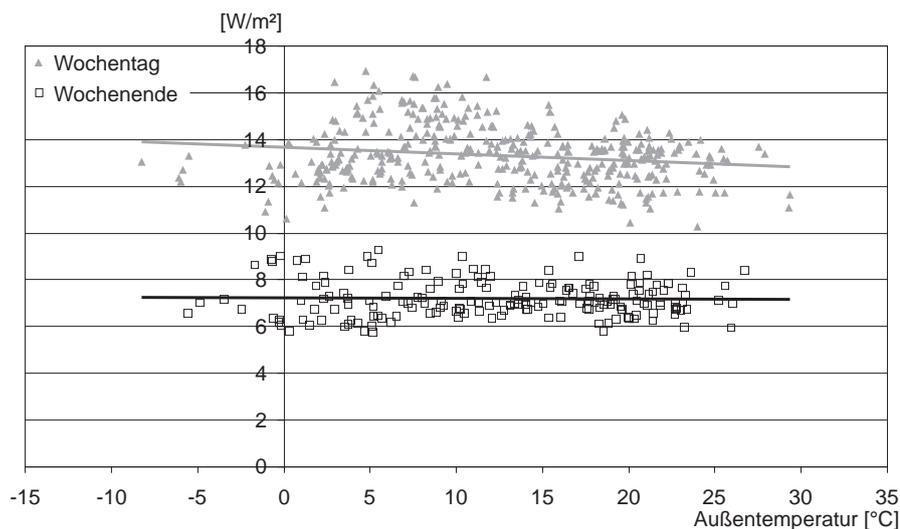


Abbildung 133: Abhängigkeit der elektrischen Gesamtleistungsaufnahme von der Außentemperatur getrennt nach Wochentagen (Dreiecke) und Wochenenden (Quadrate)

Spezifisch auf die Energiebezugsfläche berechnet ergibt sich im Jahr 2007 ein Gesamtstromverbrauch von 88,7 kWh/m²a (Endenergie). Im Jahr 2008 sind es 105,6 kWh/m²a. Die Steigerung ergab sich aus der Tatsache, dass einige Arbeitsplätze erst im Laufe des ersten Jahres bezogen wurden. Der Trend einer Steigerung setzt sich jedoch nicht fort: von September 2008 bis August 2009 betrug der Jahreswert 2,02 GWh und somit 92,3 kWh/m²a.

Abbildung 134 zeigt den für Bürogebäude typischen Wochenverlauf: der Standby-Verbrauch des Gebäudes in der Nacht und am Wochenende ist mit 40 % der Lastspitzen noch ziemlich hoch.

Unter den gemessenen Verbrauchern gibt es zwei Kategorien, die nachts einen vergleichsweise hohen Strombedarf aufweisen: die EDV-Umluftkühler haben einen konstant hohen Strombedarf, der sich nachts nicht von dem am Tag unterscheidet. Die Stromzähler, die auf den Etagen die Arbeitsmittel erfassen, zeigen nachts noch Leistungsaufnahmen, die im Bereich von 30 % der Werte tagsüber liegen.

Lüftungsanlagen sind nachts in der Regel ausgeschaltet, die Ergebnisse von Pumpenlaufzeiten für Kälte- und Wärmeverteilung stehen noch aus. Vermutlich tragen sie aber ebenso ihren Anteil zum hohen Standby-Verbrauch des Gebäudes bei.

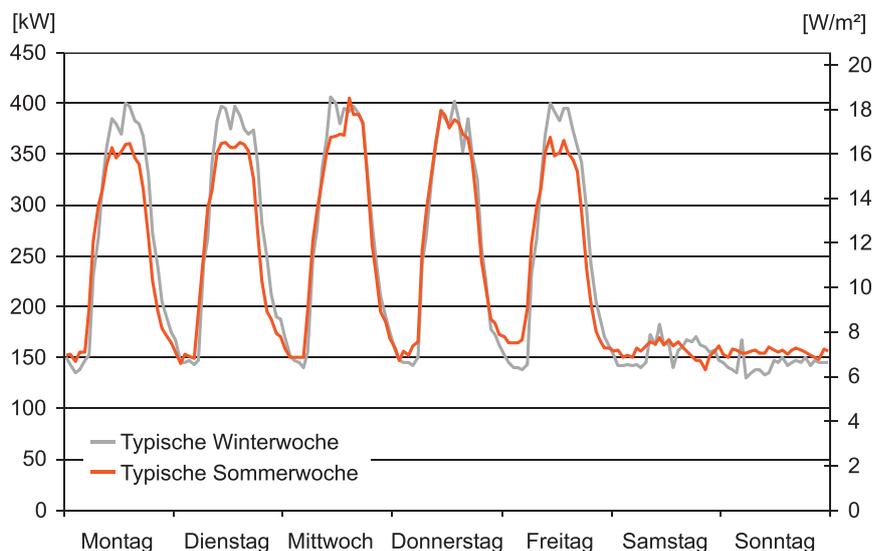


Abbildung 134: Typische Wochenprofile der elektrischen Gesamtleistungsaufnahme im Winter und im Sommer

Ein interessanter Aspekt der Gesamtleistungsaufnahme des Gebäudes zeigte sich bei der Betrachtung des Lastgangs an Feiertagen. In Abbildung 135 wurden sowohl der Lastgang des Gesamtstroms (rot, linke Y-Achse) als auch zwei Lüftungsanlagen (blau und gelb, rechte Y-Achse) am Osterwochenende 2009 dargestellt. Zwar wurden am Karfreitag und am Ostermontag nicht die Lastspitzen wie an den Arbeitstagen erreicht, dennoch lag die Leistungsaufnahme nicht im Bereich des Wochenendes. Der Betrieb der zwei Lüftungsanlagen beweist, dass hier - zumindest in Teilbereichen der Gebäudeleittechnik - kein Feiertagsprogramm hinterlegt wurde. Dies wurde von der KfW geprüft, bestätigt und die Änderung dem Betreiber in Auftrag gegeben.

Es lässt sich aus diesem Verlauf allerdings recht genau der durch nutzungsspezifische Verbraucher wie Beleuchtung, Arbeitsmittel oder Aufzüge induzierte Anteil ablesen. Diese Information wurde unter anderem verwendet, um die Aufteilung des Gesamtstromverbrauchs zu ermitteln (siehe Kapitel 4.6.5).

Aufgrund des vergleichsweise hohen Standby-Verbrauchs des Gebäudes wurde geprüft, welche der über Zähler erfassten Stromverbraucher auch nachts bzw. am Wochenende eine Leistungsaufnahme aufwiesen. Größter gemessener Verbraucher ist dabei die Küche mit 2 bis 2,5 kW im Bereich Bauteil C und ca. 1 kW im Bereich Bauteil D. Es wurde auch ein Betrieb der Lüftungsanlage „Abluft Küche“ festgestellt, der 1 bis 1,5 kW ausmacht. Die zentrale Abluftanlage benötigte 0,8 bis 1,5 kW, die Klimageräte im HVT-Raum (Zähler S08) 1,4 bis 1,5 kW und die Fettabscheidungsanlage 0,5 kW. Rechnet man den Wert für die Zentrale Abluft für alle vier Bauteile hoch und nimmt die Klimageräte ebenfalls mal vier, erhält man maximal 17,5 kW.

In den gemessenen Büros liegt die Leistungsaufnahme der Arbeitsmittel nachts bei 400 W (8.OG Bauteil A), 300 W (5.OG Bauteil B), 300 W (8.OG Bauteil B), 400 W (12.OG Bauteil B), 300 W (8.OG Bauteil C) und 150 W (8.OG Bauteil D). Rechnet man diese Zahlen auf das gesamte Gebäude hoch, ergeben sich 15 kW. Insgesamt sind das 32,5 kW, spezifisch ca. 1,5 W/m², also lediglich ein Viertel der gesamten nächtlichen Leistungsaufnahme. Da das Gebäude auch nachts geheizt und gekühlt werden muss, wird ein wesentlicher Anteil der verbleibenden 5 W/m² von den Umwälzpumpen verursacht.

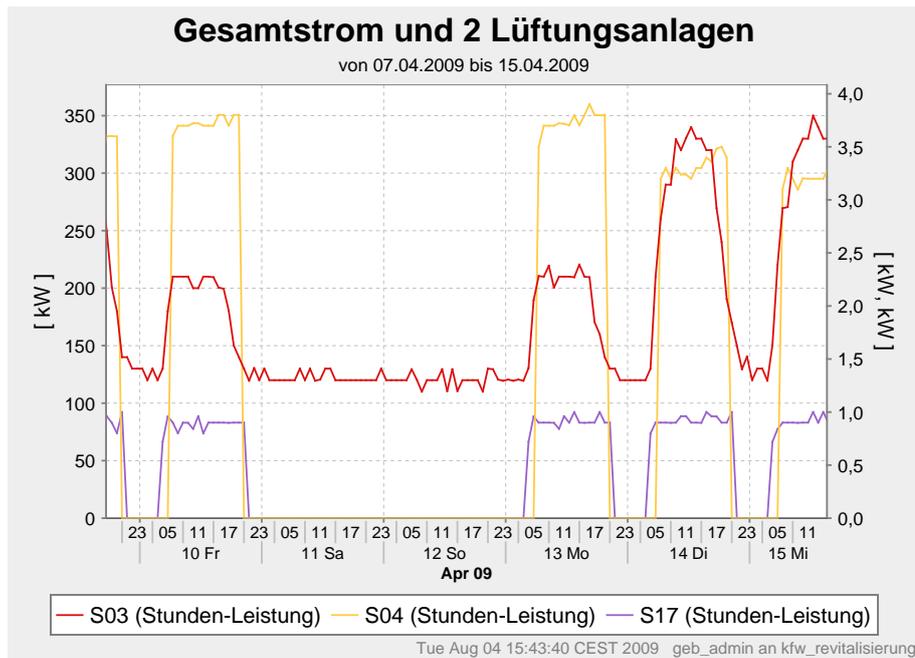


Abbildung 135: Lastgang des Gesamtstroms am Osterwochenende

Falls die Gebäudeleittechnik insgesamt tatsächlich - wie von den Planern im Vorfeld abgeschätzt - eine Leistungsaufnahme von 7 kW hat, dann sind das spezifisch weitere $0,3 \text{ W/m}^2$.

4.6.2. Stromverbrauch weiterer Haustechnik

Da mobile Strommessungen wegen der gut isolierten Schaltschränke als umständlich anzusehen sind, wurden im Vorfeld weitere festinstallierte Stromzähler zur manuellen Ablesung montiert.

Der Stromverbrauch der Grauwasseranlage scheint gering zu sein, der Wert entspricht einer Dauerleistung von nur 63 Watt über das ganze Jahr. Eventuell wird nur ein Teil der Grauwasseraufbereitung über diesen Zähler erfasst. Tabelle 27 stellt die erfassten Jahreswerte dar.

4.6.3. Stromverbrauch nutzerspezifischer Verbraucher

Die Küche im 9.OG als ein Großverbraucher erhielt zwei separate Zähler. Der im Bauteil C hat für das Jahr 2007 einen Gesamtstromverbrauch von etwas mehr als 63 MWh registriert, der im Bauteil D einen Verbrauch von fast 34 MWh. Insgesamt sind das 97 MWh, bezogen auf die Gesamtfläche des Gebäudes sind das $4,4 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Das entspricht einer Dauerleistung von ca. 11 kW über das ganze Jahr, ein beachtlicher Wert.

Außerdem wurden die beiden kleinen Küchen im EG gezählt. In der einen Küche werden die Speisen und Getränke für die Konferenzräume angerichtet, in der anderen diejenigen für Veranstaltungen, die in der Halle im EG stattfinden. Da Besprechungen täglich stattfinden, ist der größere Stromverbrauch für den Konferenzservice plausibel.

In der Halle im EG wurden drei weitere Stromzähler installiert, um den Stromverbrauch der dort verwendeten Geräte zu erfassen. Der Stromverbrauch dieser drei Zähler hat im Jahr 2007 insgesamt 1,9 MWh betragen. Tabelle 28 listet die absoluten und spezifischen Jahreswerte auf.

ID	Bezeichnung	Jahres- verbrauch 2007 [kWh]	Spez. Jahresverbrauch (Endenergie) [kWh/m ² a]	Jahres- verbrauch 2008 [kWh]	Spez. Jahresverbrauch (Endenergie) [kWh/m ² a]
S30	Grauwasseranlage	557	0.025	533	0.024
S51	ISP6 Druckerhöhung Re- genwasseraufbereitung	295	0.013	298	0.014
S52	ISP6 Druckerhöhung Brauchwasser	1.878	0.086	1.918	0.088
S54	Fettwasseranlage	3.922	0.179	3.948	0.180
S55	Zisternenpumpe 1 West (nicht in Betrieb)	0	0	0	0
S56	Zisternenpumpe 2 Ost	46	0.002	70	0.003

Tabelle 27: Gemessene Jahresstromverbrauchswerte für sonstige Haustechnik, bezogen auf die Energiebezugsfläche von 21.875 m²

ID	Bezeichnung	Jahres- verbrauch 2007 [kWh]	Spez. Jahres- verbrauch (Endenergie) [kWh/m ² a]	Jahres- verbrauch 2008 [kWh]	Spez. Jahres- verbrauch (Endenergie) [kWh/m ² a]
S05	Geräte Vorstandsküche 9.OG Bauteil C	62.326	2,85	42.002	1,92
S20	Geräte Vorstandsküche 9.OG Bauteil D	37.621	1,72	35.932	1,64
S10	Geräte Küche Anrichte Konfe- renzservice EG	7.016	0,32	9.310	0,43
S11	Geräte Warmküche Veranstal- tungsservice EG	1.264	0,058	845	0,039
S12	Geräte Halle Funktionssteck- dosen/Medientechnik	865	0,040	810	0,037
S13	Geräte Halle Achse 1-10	582	0,027	469	0,021
S14	Geräte Halle Achse 11-19	452	0,021	231	0,011

Tabelle 28: Gemessene Jahresstromverbrauchswerte für nutzerspezifische Verbraucher, bezogen auf die Energiebezugsfläche von 21.875 m²

4.6.4. Stromverbrauch Arbeitsmittel

In den 6 exemplarisch bzgl. Beleuchtung gemessenen Büroetagen wurden außerdem die Stromkreise für die Arbeitsmittel kontinuierlich über die GLT erfasst. Im Wesentlichen sind daran Computer, Bildschirme und Telefone als Verbraucher angeschlossen.

Tabelle 29 zeigt die jeweiligen Jahreswerte als Gesamtwerte und flächenbezogene Kennwerte (jeweils Endenergie).

ID	Bezeichnung	Jahresverbrauch [kWh]	Flächenspezifischer Jahresverbrauch (Endenergie) [kWh/m ² a]	Mittlere Leistungsaufnahme [W/m ² a]	Bezugsfläche [m ²]
S43	Büros 8.OG BT A (2007/2008)	8.125	41,9	4,8	194
		8.033	41,4	4,8	194
S44	Büros 5.OG BT B	5.475	28,2	3,2	194
		5.629	29,0	3,3	194
S45	Büros 8.OG BT B	5.104	26,3	3,0	194
		5.188	26,7	3,1	194
S46	Büros 12.OG BT B	5.341	27,5	3,1	194
		5.423	28,0	3,2	194
S47	Büros 8.OG BT C	6.130	31,6	3,6	194
		5.681	29,3	3,3	194
S48	Büros 8.OG BT D	2.192	7,8	0,9	281
		2.195	7,8	0,9	281

Tabelle 29: Gemessene Jahresstromverbrauchswerte für Arbeitsmittel in den Jahren 2007 und 2008, bezogen auf die jeweilige Fläche

Im Gebäude wurden weitere nutzerspezifische Stromverbraucher gemessen. Diese wurden über einen längeren Zeitraum über Steckdosenmessgeräte erfasst und zur Analyse des Gesamtstromverbrauchs auf das gesamte Gebäude hochgerechnet. Es wurden Drucker, Kopiergeräte, Faxgeräte und Shredder in den gemeinschaftlichen EDV-Räumen gemessen, die von mehreren Mitarbeitern auf einer Etage genutzt werden (Tabellen 30, 31 und 32). Außerdem wurden die Kaffeeautomaten in den Teapoints gemessen.

Raum	Gerät	Zeitraum [h]	Verbrauch [kWh]	Jahresverbrauch [kWh]	Flächenspezifischer Jahresverbrauch (Endenergie) [kWh/m ² a]
501B	Canon iR 4570	619	16,61	235,1	0,01075
503C	Canon iR 4570	670	18,96	247,9	0,01133
602C	Canon iR 4570	670	23,26	304,1	0,01390

Tabelle 30: Stromverbrauch der gemessenen Kopierer (Messung, Jahresverbrauch und flächenspezifischer Endenergiekennwert)

Raum	Gerät	Zeitraum [h]	Verbrauch [kWh]	Jahresverbrauch [kWh]	Flächenspezifischer Jahresverbrauch (Endenergie) [kWh/m ² a]
501B	OKI c5450	619	12,68	179,4	0,00820
801B	OKI c5450	503	10,90	189,8	0,00868
301B	OKI c5900	334	4,78	125,2	0,00573
503C	OKI c9600	670	20,98	274,3	0,01254

Tabelle 31: Stromverbrauch der gemessenen Drucker (Messung, Jahresverbrauch und flächenspezifischer Endenergiekennwert)

Raum	Gerät	Zeitraum [h]	Verbrauch [kWh]	Jahresverbrauch [kWh]	Flächenspezifischer Jahresverbrauch (Endenergie) [kWh/m ² a]
501B	HSM 225.2 (Shredder)	619	0,03	0,4	0,00002
801B	HSM 225.2 (Shredder)	334	0,61	15,9	0,00073
503C	HSM 225.2 (Shredder)	670	3,2	0,241	0,00014
801B	brother 8360P (Faxgerät)	334	2,64	69,2	0,00317

Tabelle 32: Stromverbrauch der gemessenen Faxgeräte, Shredder, etc. (Messung, Jahresverbrauch und flächenspezifischer Endenergiekennwert)

4.6.5. Aufteilung des Gesamtstromverbrauchs

Über die fest installierten Stromzähler wird nur etwa ein Fünftel des Gesamtstromverbrauchs erfasst. Einige Zähler befinden sich in Referenzbereichen, so dass die ermittelten Stromverbrauchswerte über die Fläche hochgerechnet werden konnten. Durch die Informationen aus fliegenden Messungen und weiteren Abschätzungen konnte der Gesamtstromverbrauch relativ genau den entsprechenden Teilverbrauchern zugeordnet werden. Abbildung 136 zeigt die ermittelte Aufteilung des Gesamtstromverbrauchs für die erfassten drei Jahreszeiträume, wobei im Jahr 2007 ca. 16 Prozent nicht zugeordnet werden konnten. Im Jahr 2008 lag der unbekannte Anteil deutlich höher, für den Zeitraum Juli 2008 bis Juni 2009 wurde die Aufteilung nicht ermittelt. Die Abbildung zeigt aber sehr gut, dass sich der Trend einer Steigerung des Gesamtverbrauchs nicht fortsetzt. In Abbildung 137 ist die Aufteilung des Bereichs „Sonstige Geräte“ noch einmal genauer aufgeschlüsselt. Die größten Anteile haben hier die Küche, die Aufzüge und die Stellmotoren, die im Standby jeweils eine geringe Leistungsaufnahme haben, aber an jeden Sonnenschutz installiert sind. Die Leistungsaufnahme der Gebäudeleittechnik war während der Planungsphase vom Elektroplaner gemeinsam mit den Energieplanern auf ca. 7 kW Dauerleistung beziffert worden, so dass sich ein Jahresbedarf von 62 MWh ergab. Diese Zahlen wurden auch hier zugrunde gelegt. Einige Werte sind geschätzt, bei den gemessenen Werten ist dies vermerkt.

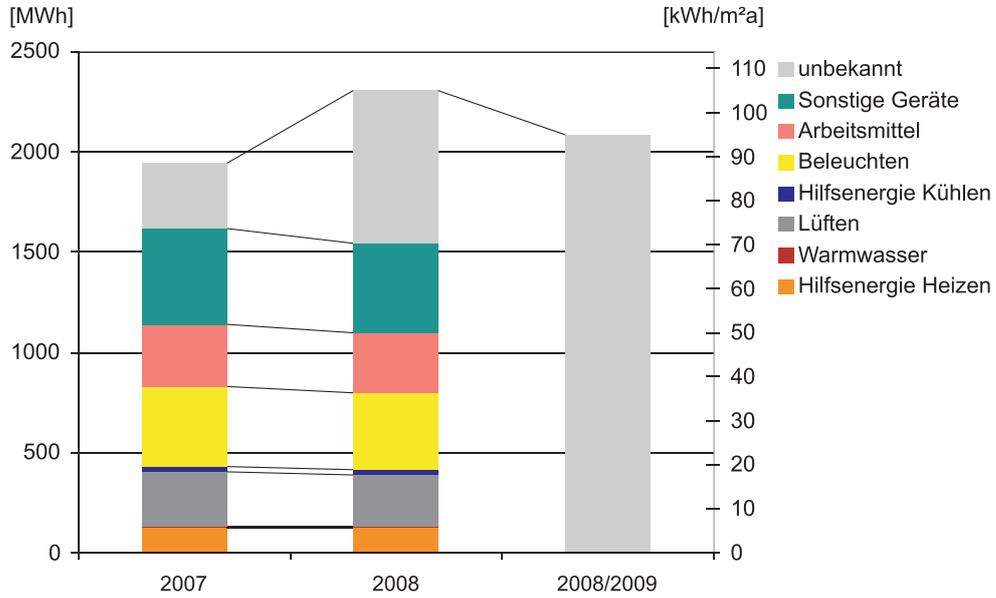


Abbildung 136: Aufteilung des Gesamtstromverbrauchs im Jahr 2007 und 2008

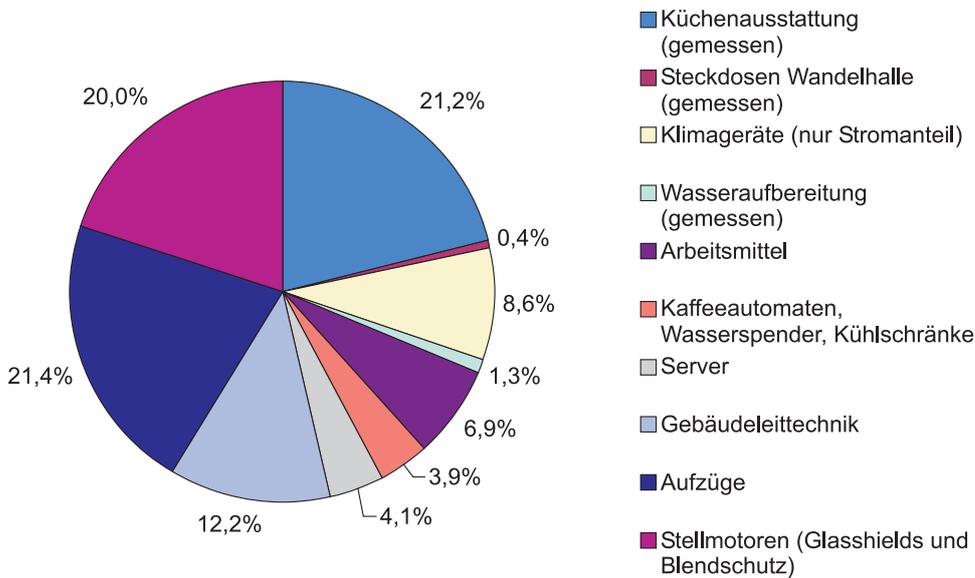


Abbildung 137: Aufteilung des Jahresstromverbrauchs sonstiger Geräte 2007

4.7. Wasser

Da die Untersuchung der Wasserverbräuche nicht als Ziel dieses Monitoring-Projektes definiert wurde, wurden keine Extra-Zähler eingebaut, sondern lediglich die Zähler ausgewertet, die bereits vorhanden sind und monatlich vom Facility Management abgelesen und notiert werden.

Der Gesamtwasserverbrauch für das Haupthaus wird über den Wasserzähler mit der Nummer 9436650-03 registriert. Abbildung 138 zeigt die monatlichen Verbräuche und die jeweilige Verteilung auf. Man erkennt, dass die Summen der Unterzähler ziemlich gut mit dem Gesamtzähler übereinstimmen. In den Monaten Juli und August 2007 hat ein Defekt beim Wasserbecken zu hohen unnötigen Wasserverlusten geführt. Auch die Nachspeisung für die Regenwasserzisterne war in den Monaten Mai, September und Oktober 2007 unverhältnismäßig hoch. Ob hier auch ein Defekt oder Fehler vorlag, ist uns nicht bekannt. Der Gesamtverbrauch an Wasser lag demnach im Jahr 2007 bei ca. 8.880 m³. Das entspricht 1,1 Liter/m²d bzw. bei einer Mitarbeiterzahl von 575 einem Verbrauch von 42,3 Liter/(m²*Mitarbeiter).

Allerdings reduzieren sich die Werte deutlich, wenn man das Wasserbecken und die Nachspeisung für die Regenwassernutzung ausklammert. Dann lag der Gesamtverbrauch 2007 bei ca. 3.500 m³. Pro Quadratmeter und Tag wären dies 0,44 Liter, pro Mitarbeiter und Tag 16,7 Liter.

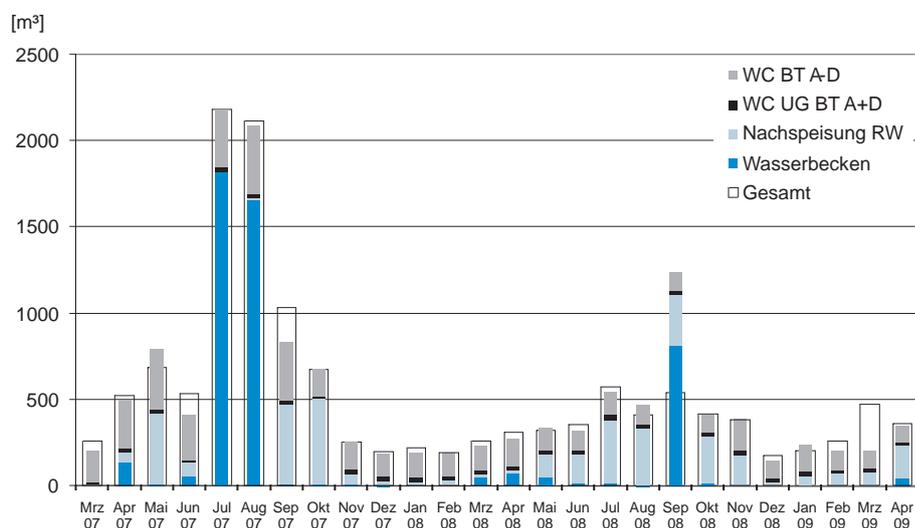


Abbildung 138: Monatlicher Wassergesamtverbrauch und Aufteilung auf verschiedene Verbraucher

Die Zisternenpumpe 1 ist nicht in Betrieb. Bei der Zisternenpumpe 2 werden nur sporadisch Stromverbräuche registriert.

4.8. Thermischer Komfort

Einerseits sind der geringe Verbrauch von Energie und der effiziente Betrieb der haustechnischen Anlagen für einen nachhaltigen Gebäudebetrieb sehr wichtig, andererseits darf die Reduktion des Energieverbrauchs nicht auf Kosten der Nutzer geschehen. Raumlufttemperatur und Luftqualität wirken am unmittelbarsten auf den Nutzer ein und sollten innerhalb bestimmter Grenzen liegen. Die Luftqualität wurde im Kapitel 4.3.3 behandelt, dieses Kapitel befasst sich mit dem thermischen Komfort, also der Messung von Temperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit. Lufttemperaturen wurden in sechs exemplarischen Büros über speziell installierte Temperatursensoren kontinuierlich aufgezeichnet. Zusätzlich liegen die über die Raumbedienelemente gemessenen Temperaturen vor. Auch die relative Luftfeuchte wurde kontinuierlich aufgezeichnet.

Die Aufzeichnung von operativer Temperatur und Luftgeschwindigkeit konnte nur temporär anhand des Einsatzes eines Raumklimaanalytators durchgeführt werden.

4.8.1. Komfortmessungen

Messungen mit dem Raumklimaanalytator wurden sowohl im Winter als auch im Sommer durchgeführt. Die ersten Messungen fanden am 12.1.2007 in sechs Räumen statt. Je ein Raum war ein Zweiachserbüro (hier mit H bezeichnet) bzw. ein Besprechungsraum (G), die restlichen Räume waren Dreiachserbüros (R,S,T,U). Anhand des zu diesem Zeitpunkt noch selten genutzten Besprechungsraums wurde bei der Inbetriebnahme und Optimierung der Einzelraumregelung das Verhalten von Temperatur und Luftgeschwindigkeit über längere Zeiträume gemessen und zusammen mit Protokollen der GLT-Firma ausgewertet. Es zeigte sich, dass die Schaltzeiten der Heizkörperregelventile noch verbessert werden mussten, um ein häufiges Schwanken der Raumtemperatur zu vermeiden. Zusätzlich zum 12.1.2007 wurden weitere Messungen am 20.2., 3.4. und 5.6. des gleichen Jahres durchgeführt. Abbildung 139 zeigt exemplarisch die Messung vom 12.1. bis zum 13.1.2007. Die Raumsolltemperaturen während der Nutzungszeit waren zu dieser Zeit noch sehr hoch eingestellt, so dass man am Ende der Messung Temperaturen zwischen 25 und 26 °C erkennen kann. Die deutlichen kurzfristigen Rückgänge der Temperatur sind auf ein geöffnetes Fenster zurückzuführen, was sich auch in der erhöhten Luftgeschwindigkeit abbildet.

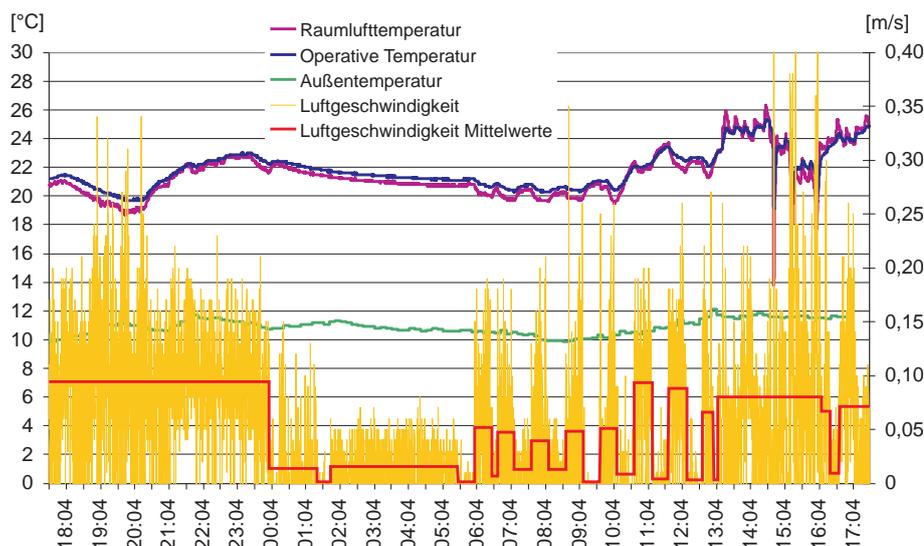


Abbildung 139: Komfortmessungen vom 12.1.2007 17:30 Uhr bis 13.1.2007 17:30 Uhr im Besprechungsraum G

Deutlich zu erkennen sind die unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten bei den diversen Regelungs-zuständen der Raumlüftung. Zur besseren Lesbarkeit des Diagramms wurden für die entsprechenden Zeiten die Mittelwerte der Luftgeschwindigkeit eingeblendet. Die Lüftung wurde per Tastendruck zu Beginn der Messung eingeschaltet und blieb daher bis 0 Uhr eingeschaltet. Bis zum Beginn der Nutzungszeit um 5:30 Uhr ist die Lüftung ausgeschaltet, mit der Nutzungszeit beginnt die Intervalllüftung. Bis 0 Uhr war auch die Heizung eingeschaltet, wie an den Raumtemperaturen zu erkennen ist. Dann ging der Raum in den Nachtabsenkungsmodus, die Temperatur fiel stetig um insgesamt ca. 1,5 K. Mit Beginn der Nutzungszeit ist sehr gut der Einfluss der Lüftung auf die Raumtemperatur zu erkennen. Insbesondere zwischen 5:30 und 10:00 Uhr schwanken die Temperaturen mehrmals um 1 Kelvin. Um 13 Uhr wurde die Lüftungsanlage von Hand wieder eingeschaltet. Gut zu erkennen ist außerdem, dass zwischen 14:30 Uhr und 16 Uhr dreimal das Fenster geöffnet wurde. Die Temperaturen sanken jeweils stark ab und die Luftgeschwindigkeit schnellte in die Höhe.

Die Kurzzeitmessung im Raum H ist in Abbildung 140 dargestellt. Es ist gut erkennbar, wie die operative Temperatur und die Lufttemperatur während der Lüftung auseinander driften.

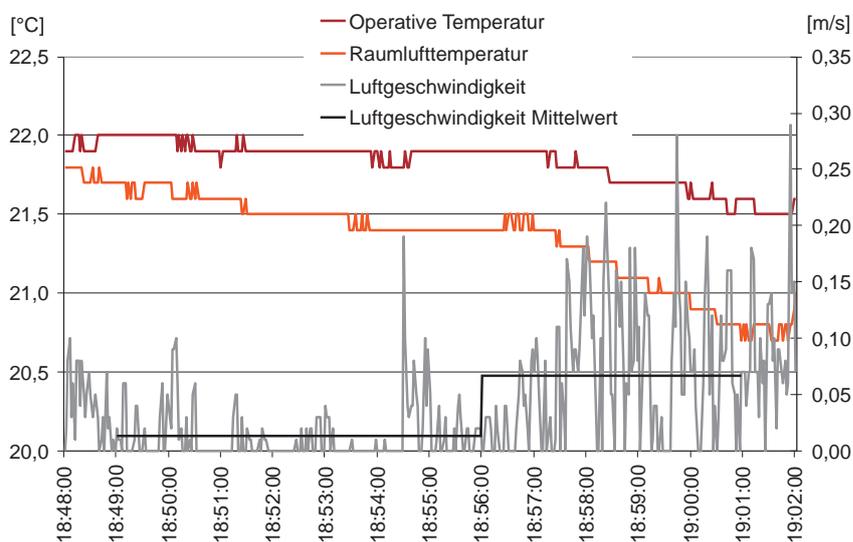


Abbildung 140: Raumtemperatur im Raum H bei Komfortmessung im Winter am 12.1.2007

In Abbildung 141 sind die Mittelwerte der Kurzzeitmessungen am 12.1.2007 in den sechs Räumen dargestellt. Dabei ist Raum G der Besprechungsraum. Während die Büros in Benutzung waren, war dieser zum Zeitpunkt der Messung leer. Gut zu erkennen sind im Besprechungsraum die deutlich höheren Raumtemperaturen. Mit der Begründung, der Raum solle bei Benutzung nicht kalt sein, wurde hier eine entsprechend hohe Solltemperatur eingestellt.

In den übrigen Büros liegen die Temperaturen in einem ähnlichen Bereich. Die Luftgeschwindigkeiten bewegen sich auf einem unproblematischen Niveau, die ermittelten PMV-Indizes bewerten die Raumtemperaturen zwischen neutral und leicht zu kühl.

Aufgrund von Aussagen durch einige Nutzer, ihnen sei im Sommer zu warm, wurden vier Büros im Sommer 2007 ebenfalls mit dem Raumklimaanalysator untersucht. Die Messungen wurden hier jeweils über die Dauer einer Woche durchgeführt. Die Messzeiträume zeigt Tabelle 33.

Abbildung 142 zeigt den gemessenen Temperaturverlauf im Büro L. Zusätzlich zum Raumklimaanalysator, der am Arbeitsplatz aufgestellt wurde, war ein Datenlogger zur Temperaturmessung in der Nähe des Raumbedienelementes positioniert. Dieses ist weiter vom Heizkörper entfernt, weshalb sich tags-

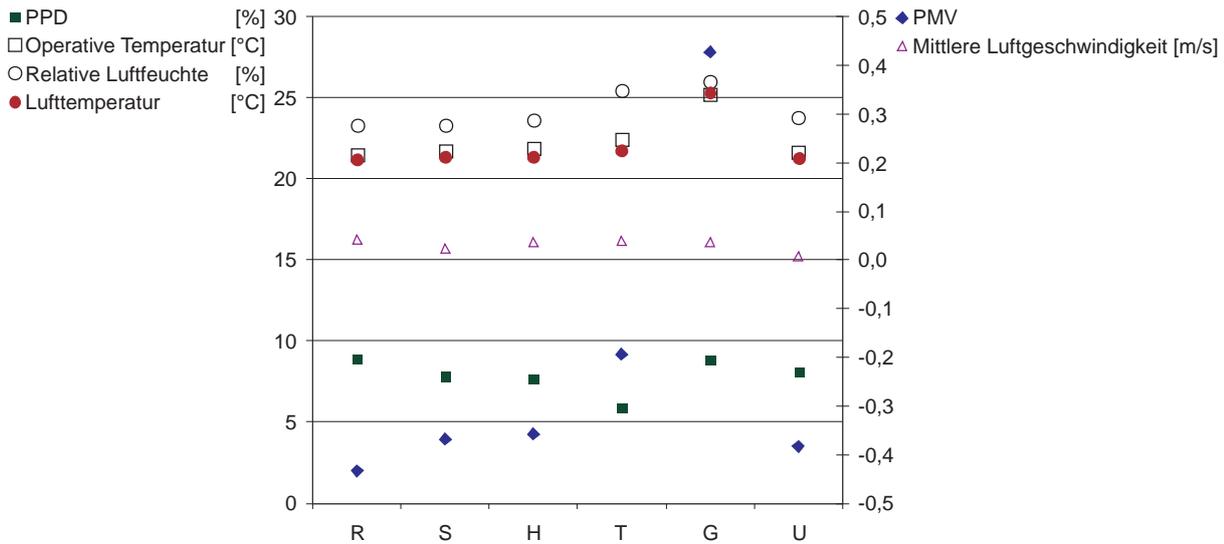


Abbildung 141: Mittelwerte der Raumklimamessungen am 12.1.2007

Raum I	19.7.2007 - 24.7.2007
Raum K	24.7.2007 - 31.7.2007
Raum L	31.7.2007 - 07.8.2007
Raum M	07.8.2007 - 13.8.2007

Tabelle 33: Messzeiträume der Sommerkomfortmessungen

über Temperaturdifferenzen von bis zu einem Kelvin ergeben. In der Nacht während der Nachtlüftung gleichen sich diese Temperaturen an. Die Nachtlüftung und deren Einfluss ist gut zu erkennen, teilweise sinken die Temperaturen um bis zu 5 K. Während der Arbeitszeit stellen sich akzeptable Raumtemperaturen ein.

In Abbildung 143 wurde der gemessene Komfortindex PMV in Abhängigkeit von der Außentemperatur dargestellt. Man erkennt, dass das thermische Empfinden oberhalb einer Außenlufttemperatur von ca. 20°C während der meisten Zeit eher als zu warm ermittelt wurde. Werte zwischen -0,5 und +0,5 gelten als komfortabel. Raum A und B überschreiten diese Werte bei schon verhältnismäßig niedrigen Außenlufttemperaturen, Raum C und D erst deutlich später.

4.8.2. Überschreitungsstunden von Komfortbereichen

Da in sechs Büros dauerhaft mit sehr genauen Sensoren nahe des jeweiligen Arbeitsplatzes die Raumtemperaturen erfasst wurden, konnten Überschreitungsstunden von verschiedenen Komfortbereichen sehr gut untersucht werden. Dabei wurde die Norm DIN ISO 7730 zu Bewertung herangezogen, die für klimatisierte Gebäude gilt.

Die ISO 7730 geht von einer festen Richttemperatur aus, die unabhängig von der jeweiligen Außentemperatur nur nach Winter (22°C) und Sommer (24,5°C) unterschieden wird. Für die Angabe der Akzeptanz durch den Nutzer werden verschiedene Komfortklassen genannt. Für 94% Akzeptanz (Klasse A) darf die Abweichung nur +/- 1°C betragen, für 90% Akzeptanz (B) +/- 1,5°C und für 85% Akzeptanz (C) +/- 2,5°C. Für die vorliegende Bewertung wurde Klasse B gewählt, Abbildung 144 zeigt die jeweiligen Überschreitungsstunden. Dabei wird zwischen den gesamten Stunden und den Stunden bei Anwesen-

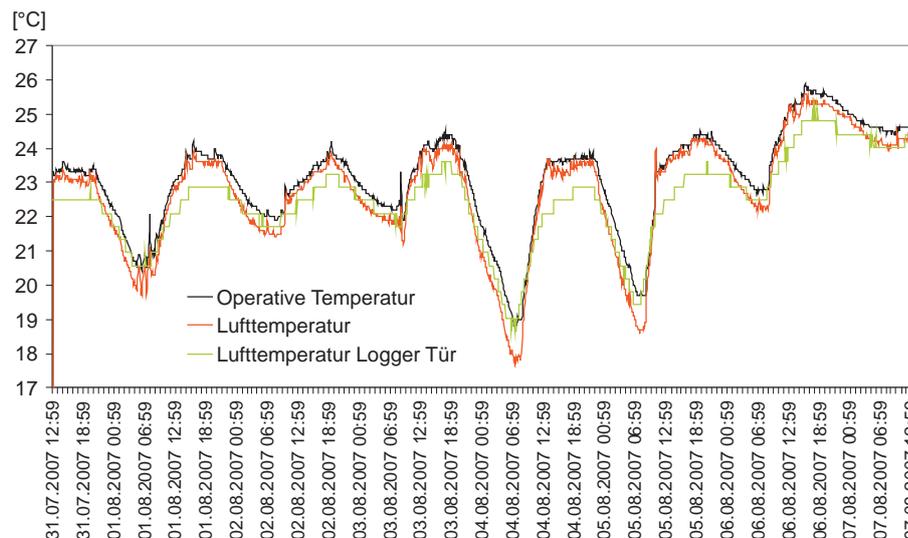


Abbildung 142: Temperaturen im Raum 305 vom 31.7.-7.8.07

heit des Nutzers unterschieden. Zusätzlich wird zwischen gewichteten und ungewichteten Überschreitungsstunden unterschieden. Bei der ungewichteten Betrachtung wird jede Überschreitungsstunde mit 1 bewertet, unabhängig davon, wie groß die Überschreitung ist. Durch die gewichteten Überschreitungsstunden wird das Maß der Überschreitung miteinbezogen, indem die entsprechende Überschreitungszeit mit der jeweiligen Überschreitungsdifferenz in Kelvin multipliziert wird.

In Abbildung 145 sind die Überschreitungsstunden gemäß DIN 1946 Teil 2 dargestellt. Diese Norm ist heute zwar nicht mehr gültig, sie wurde jedoch bei der Planung als Bewertungsmaßstab für den thermischen sommerlichen Komfort herangezogen. Man sieht, dass in drei der untersuchten Räume die festgelegte maximale Überschreitungsdauer von 60 h beinahe eingehalten wird. In drei Büroräumen - insbesondere Büro F - ergeben sich höhere Überschreitungsstunden.

Abbildung 146 stellt die zeitliche Verteilung der Raumlufttemperaturen während der Arbeitszeit (wochentags von 8 bis 18 Uhr) auf die entsprechenden Komfortklassen gemäß Anhang I der DIN EN 15251 in den Jahren 2007 und 2008 dar. Trotz einer Anpassung der Kühldeckenregelung haben sich die Werte im Jahr 2008 verschlechtert. Während 2007 im Mittel 94,8 % der Arbeitszeit in Kategorie A und B lagen, waren es 2008 noch 89,9 %. Der Anteil der Stunden außerhalb von Kategorie C lag 2007 bei 2,1 %, im Jahr 2008 bei 4,1 %. Es zeigt sich, dass bezüglich der Kühldeckenregelung in Kombination mit der Lüftungsfunktion weiteres Optimierungspotenzial besteht.

Abbildung 147 zeigt detailliert die Stundenmittelwerte der Raumlufttemperaturen mit den dazugehörigen Außenlufttemperaturen. Dargestellt sind alle Stunden, in denen der Nutzer mehr als 20 Minuten anwesend war. Zusätzlich zu den bisher erwähnten zwei Bewertungskriterien ist hier noch die als 32/6-Regel bezeichnete Grenze eingezeichnet. Sie leitet sich aus dem sogenannten Bielefelder Urteil [24] zum sommerlichen Komfort an Arbeitsstätten ab.

Zusätzlich zu den Raumtemperaturen in den sechs exemplarischen Büros wurde auch die Temperatur der Abluft in der zentralen Abluftanlage des Bauteils B gemessen. Da sie sich aus der abströmenden Luft aller Büros und der Flure zusammensetzt, kann sie als eine mittlere Gebäudetemperatur betrachtet werden. In Abbildung 148 sind jeweils Tageswerte der Ablufttemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur dargestellt.

Bis 13 °C Außentemperatur sieht man nur einen leichten Anstieg der Ablufttemperaturwerte, die im

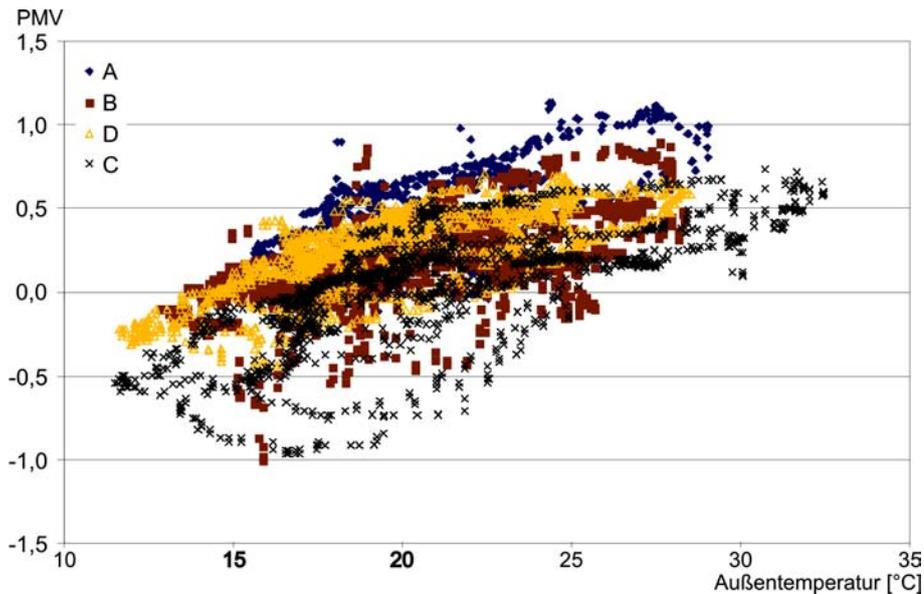


Abbildung 143: Komfortindex PMV in Anhängigkeit von der Außentemperatur, 5-Minuten-Werte im Sommer 2007 in vier gemessenen Büros (A-D)

Mittel bei 22 °C liegen. Ab 13 °C steigt die Ablufttemperatur deutlich an und erreicht bei mittleren Außentemperaturen von 30 °C Werte um die 27 °C.

4.8.3. Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass für einen Teil der Büroräume die angestrebten Überschreitungsstunden der Temperaturen im Sommer nur geringfügig überschritten wurden, die restlichen Büros lagen jedoch deutlich darüber. Trotz der Anpassung der Kühldeckenregelung vor dem Sommer 2008 hat die thermische Behaglichkeit eher abgenommen. Die Stunden außerhalb von Kategorie C haben sich von 2,1 % im Jahr 2007 mit 4,1 % im Jahr 2008 fast verdoppelt.

Die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Unstimmigkeiten bei der Regelung der zentralen Abluftanlage und hier besonders der Nacht- und Morgenlüftungsfunktion beeinflussen ihrerseits den sommerlichen Komfort. Eine Optimierung der Lüftungsregelung wird den thermischen Komfort verbessern.

Messungen mit dem Raumklimaanalysator haben gezeigt, dass die Luftgeschwindigkeit am Arbeitsplatz signifikant ansteigt, wenn die Lüftung eingeschaltet ist. Zugserscheinungen an bestimmten Arbeitsplätzen während der kalten Jahreszeit waren der Anlass, dass die automatische Intervalllüftung in den Büros mit positiver Stufe in der Decke außer Betrieb gesetzt wurde. Die Lüftungsfunktion in den betroffenen Büros erhält seitdem nur dann eine Freigabe, wenn der Nutzer nicht anwesend ist oder selbst über das Bedienelement die Lüftung aktiviert.

Aufgrund der beschriebenen Situation soll der thermische Komfort im Rahmen einer fortgesetzten Optimierung weiter verbessert werden.

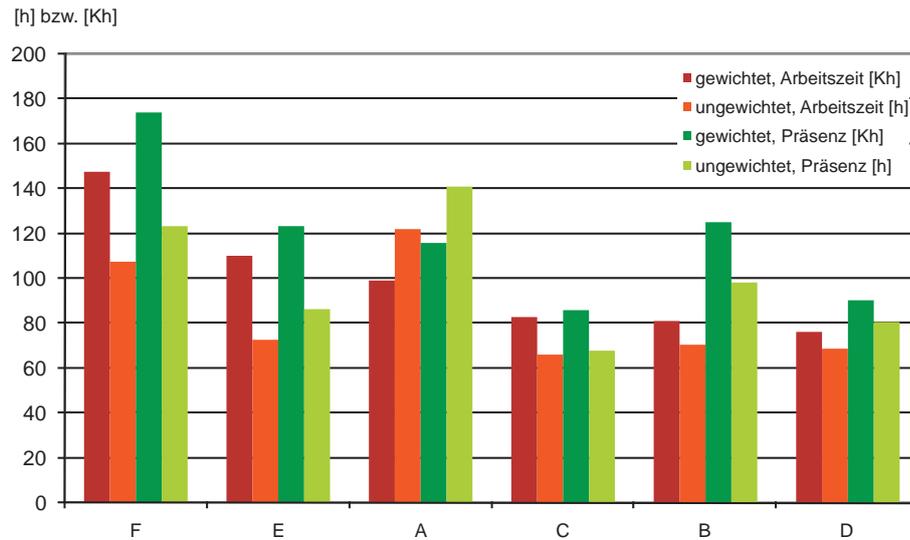


Abbildung 144: Überschreitungsstunden während einer Arbeitszeit von wochentags 8 bis 18 Uhr und bei tatsächlicher Anwesenheit des Nutzers nach ISO 7730 Klasse B im Jahr 2007

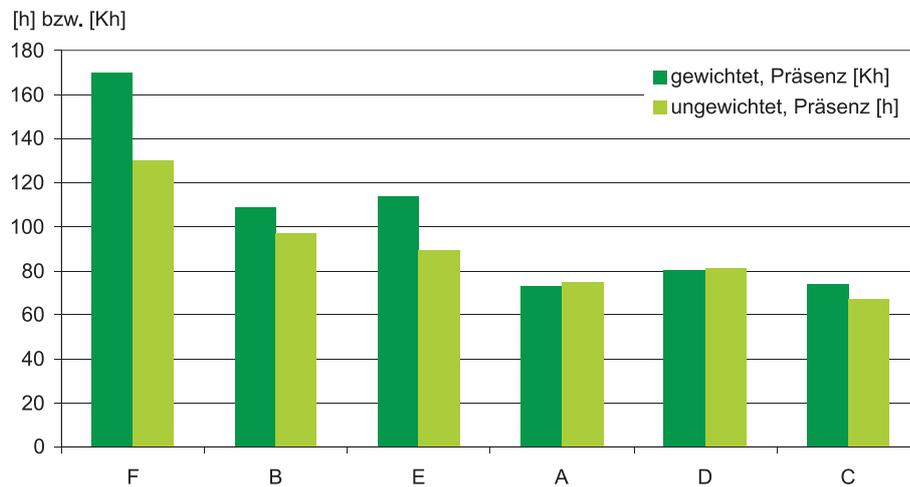


Abbildung 145: Überschreitungsstunden nach DIN 1946-2 im Jahr 2007 (Kriterium, das im Planungsprozess als Maßstab für den thermischen Komfort herangezogen wurde)

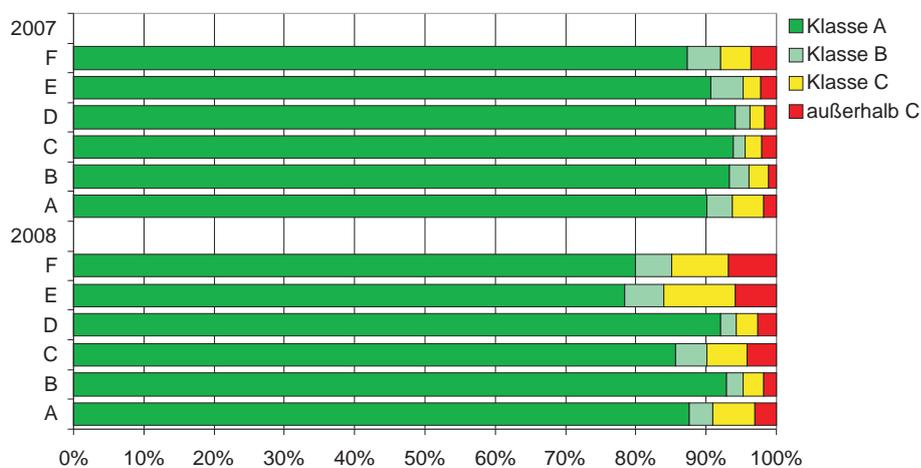


Abbildung 146: Erzielte Komfortbereiche während einer Arbeitszeit von wochentags 8 bis 18 Uhr in Klassen nach DIN EN 15251 für die Jahre 2007 und 2008

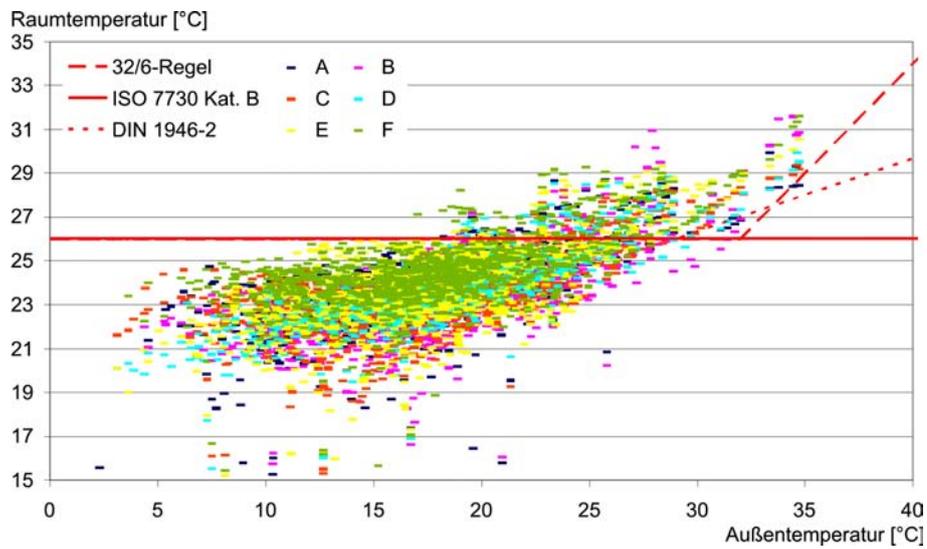


Abbildung 147: Raumlufttemperaturen 2007 in Abhängigkeit von der Außentemperatur mit eingezeichneten Grenzkriterien

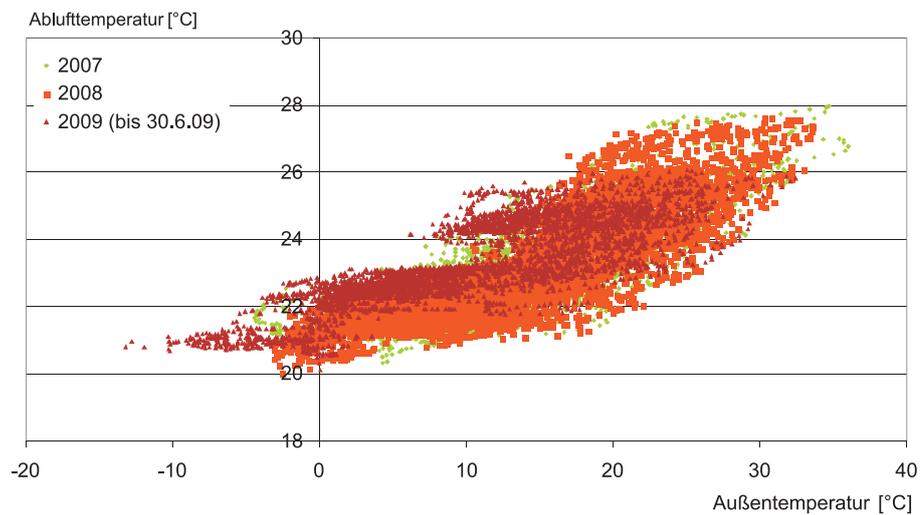


Abbildung 148: Temperatur der zentralen Abluft während der gesamten Messperiode, Stundenmittel über der Außentemperatur

4.9. Akustischer Komfort

4.9.1. Nachhallzeiten

Am 17.8.2006 wurden in noch nicht bezogenen Räumen Nachhallzeitmessungen durchgeführt. Die Nachhallzeiten (siehe Tabelle 34) liegen in sehr guten Bereichen, was aufgrund des Teppichs als Bodenbelag und der abgehängten Decke zu erwarten war. Durch die Ausstattungsgegenstände und Arbeitsmittel der jeweiligen Nutzer werden sich die Nachhallzeiten nach Bezug der Räume weiter verbessern.

Raum	Achsen	Bürotyp	Bauteil	Nachhallzeit [s]	Empfohlene Nachhallzeit [s]
Raum N	2	Einzelbüro	B	0,55	0,4
Raum O	3	Zweierbüro	B	0,63	0,4-0,5
Raum P	4	Besprechungsraum	B	0,66	0,6
Raum Q	4	Dreierbüro	B	0,57	0,5

Tabelle 34: Ermittelte Nachhallzeiten in Büroräumen vor dem Bezug des Bauteils B

Tabelle 35 zeigt zum Vergleich die damals im Neubau Ostarkade gemessenen Werte. Die Werte waren bei den Zwei- und Dreiachser-Büros der Ostarkade etwas besser. Zwar war die Betondecke dort freiliegend und daher schallhart ausgeführt, jedoch wies jedes der pro Achse installierten Deckenelemente eine 1,3 m² große Schallabsorptionsfläche auf. Die Raumtrennwände waren ebenfalls schalldämmend ausgeführt.

Gemessener Raum	Position	Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]	Nachhallzeit [s]	Empfohlene Nachhallzeit [s]
Büro 2-achsig		5,6	2,5	3,0	0,37	0,4
Büro 3-achsig		5,6	3,8	3,0	0,42	0,5
Besprechungsraum	Mitte	7,1	3,9	2,7	0,65	0,6
	Links				0,72	
	Rechts				0,73	

Tabelle 35: Nachhallzeiten gemessener Räume vor Bezug durch die Nutzer im Neubau Ostarkade sowie empfohlene Nachhallzeiten nach DIN 18041

4.9.2. Schallpegelmessungen an Vakuumtoiletten

Im vorangegangenen Projekt, dem Neubau Ostarkade, wurde die Umsetzung von Vakuumtoiletten im Rahmen eines Wassersparkonzeptes rege diskutiert. Anhand von Messungen des Schallpegels konnte damals gezeigt werden, dass zwar die Lautstärke etwas höher, dafür aber die Dauer des Spülvorgangs wesentlich kürzer war. Mittlerweile finden die Vakuumtoiletten bei den Nutzern gute Akzeptanz, was dazu führte, dass bei den Toiletten im Haupthaus abermals Vakuumtoiletten installiert wurden.

Allerdings wurde anhand von Messungen festgestellt, dass der Schallpegel hier über dem der Toiletten in der Ostarkade lag. Abbildung 149 zeigt, dass der Schallpegel bei nahezu 100 dB lag. Das subjektive Empfinden des Bauherrn wurde durch diese Messungen bestätigt, die ausführende Firma handelte, indem sie einen Schalldämpfer einbaute (siehe Kapitel 2.8.1).



Abbildung 149: Schallpegelmessung an den Vakuumtoiletten im Haupthaus verglichen mit den Messungen in der Ostarkade

4.10. Nutzerverhalten

Gebäudesimulationen können ein Gebäude sehr detailliert entsprechend der Modellgenauigkeit abbilden. Ein wichtiger Einflussfaktor bleibt jedoch der Nutzer, dessen Verhalten ungleich schwerer vorauszusagen ist. Der Analyse des Nutzerverhaltens kommt daher in der Forschung eine ebenso wichtige Rolle zu. Das tatsächlich beobachtete Nutzerverhalten kann zudem Rückschlüsse auf die Einhaltung der vom Nutzer bewusst oder unbewusst geforderten Ansprüche an das Gebäude geben.

Da immer mehr Bürogebäude mit aufwändiger Gebäudeleittechnik und oft auch mit einer Einzelraumregelung, die über einen zentralen BUS realisiert wird, ausgestattet sind, bieten sich für die Analyse des Nutzerverhaltens und daraus zu ziehende Rückschlüsse für eine Regelungsoptimierung neue Möglichkeiten.

In den folgenden Kapiteln werden unterschiedliche Aspekte des Nutzerverhaltens untersucht.

4.10.1. Anwesenheitszeiten

Über die Präsenzmelder in den sechs exemplarisch untersuchten Büros können verschiedene Nutzungsprofile erstellt werden. Dies kann separat für einzelne Räume, für unterschiedliche Zeiträume und unterschiedlich gemittelt geschehen. In der Abbildung 150 ist ein 24-Stunden-Profil als Jahresmittel für alle sechs Räume dargestellt. Im ersten Fall (grüne Linie) wurden nur Wochentage berücksichtigt, im zweiten Fall (orange Linie) wurde das Wochenende miteinbezogen. Die hellgrüne Linie stellt das Tagesprofil nur am Wochenende dar. Die Prozentzahl gibt an, wieviel Prozent der Nutzer im Mittel zu der entsprechenden Uhrzeit anwesend waren.

Man erkennt einen kleinen Peak in den Morgenstunden, der auf das Putzpersonal zurückzuführen ist. Erkennbar ist auch die Delle zur Mittagszeit, wenn der Nutzer aufgrund der Mittagspause sein Büro verlässt.

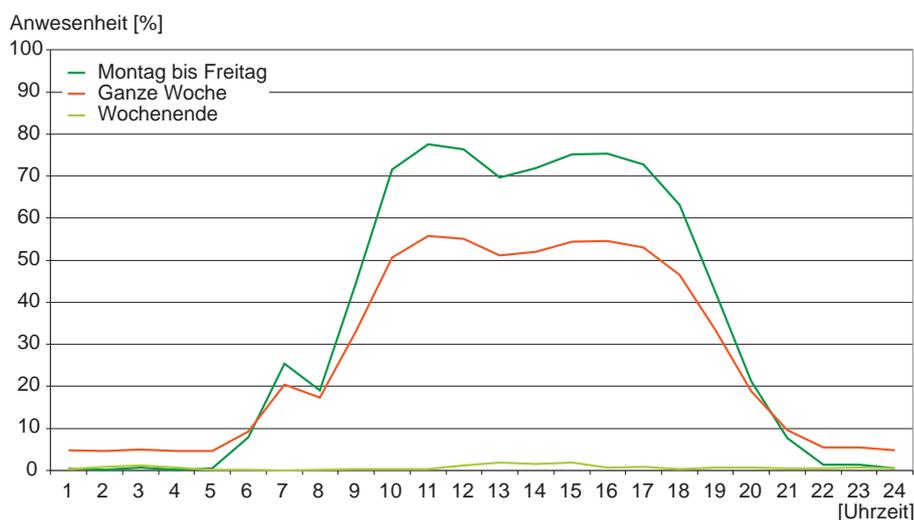


Abbildung 150: Tagesprofil der Anwesenheit im Jahresmittel: wochentags, die ganze Woche und nur das Wochenende berücksichtigend

Bei der Ermittlung der Anwesenheit ist wichtig festzulegen, wann eine Stunde als Stunde mit Nutzeranwesenheit gewertet wird und wann nicht. Abbildung 151 zeigt den Hintergrund. Die Prozentzahl auf der Y-Achse stellt dar, wie lange pro Stunde der Nutzer anwesend war. Berücksichtigt man nur die Stunden, an denen ein Büro während der ganzen Stunde besetzt war, lag die mittlere Anwesenheitszeit in den

sechs Büros im Jahr 2007 bei 2.123 Stunden. Berücksichtigt man allerdings jede Stunde, in denen überhaupt jemand anwesend war, liegt der Mittelwert bei 3.260 Stunden. Dieser Wert gewichtet allerdings die tatsächliche Anwesenheit zu hoch, da der Mittelwert der absoluten Anwesenheitsdauer (also das Integral der jeweiligen Dauerlinie) im Jahr 2007 bei 2.732 Stunden lag.

Es erscheint logisch, nur die Stunden zu berücksichtigen, bei denen die Anwesenheit über 30 Minuten lag und in der Tat erreicht man damit (2.799 h) fast eine Übereinstimmung mit der absoluten Anwesenheitsdauer.

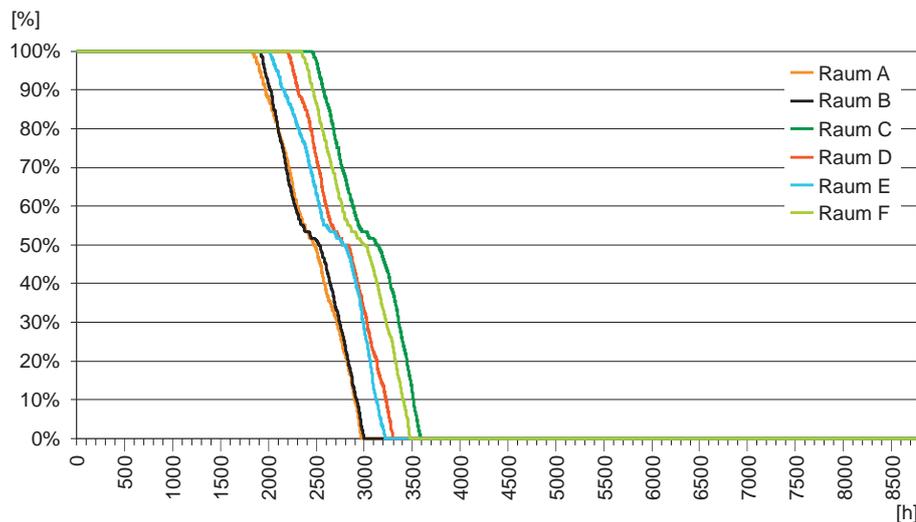


Abbildung 151: Dauerlinien der Nutzerpräsenz in Prozent der jeweiligen Stunde, Werte der sechs exemplarisch aufgezeichneten Büros

4.10.2. Sonnenschutz

Die Betätigung des Sonnenschutzes durch den Nutzer konnte nicht separat erfasst werden, da der verfügbare Datenpunkt sowohl den Steuerbefehl der Gebäudeleittechnik (automatischer Sonnenschutz) als auch den Steuerbefehl des Nutzers über das Bedienelement beinhaltet.

Zusätzlich zu einem Herabfahren des Sonnenschutzes ist ein Ausstellen möglich (siehe Kapitel 2.2). Dieses kann jedoch allein durch den Nutzer ausgelöst und damit ausgewertet werden. Allerdings wird diese Möglichkeit - zumindest in den untersuchten sechs Büroräumen - vergleichsweise selten genutzt, wie in Abbildung 152 anhand der Nutzungsdauer in einem Jahr gezeigt wird.

4.10.3. Fensteröffnungszeiten

Abbildung 153 zeigt für den Zeitraum eines Jahres (Juni 2007 bis Mai 2008) die mittlere Fensteröffnungsdauer über die Stunden eines Tages getrennt nach Monaten. Die Nutzer öffnen die Fenster in den warmen Monaten deutlich mehr als in den kalten. Einzige Ausnahme bildet in dieser Grafik der Januar, der ungewöhnlich hohe Fensteröffnungszeiten aufweist. Hier ist nicht klar, ob dies auf Messfehler oder tatsächlich auf das Nutzerverhalten zurückzuführen ist. Dass zwischen 22 und 7 Uhr Fensteröffnungszeiten angezeigt werden, liegt daran, dass in einigen der sechs gemessenen Büros Fenster teilweise über mehrere Tage dauerhaft geöffnet waren. In den kalten Monaten geschieht dies nicht, mit Ausnahme des schon erwähnten Januars.

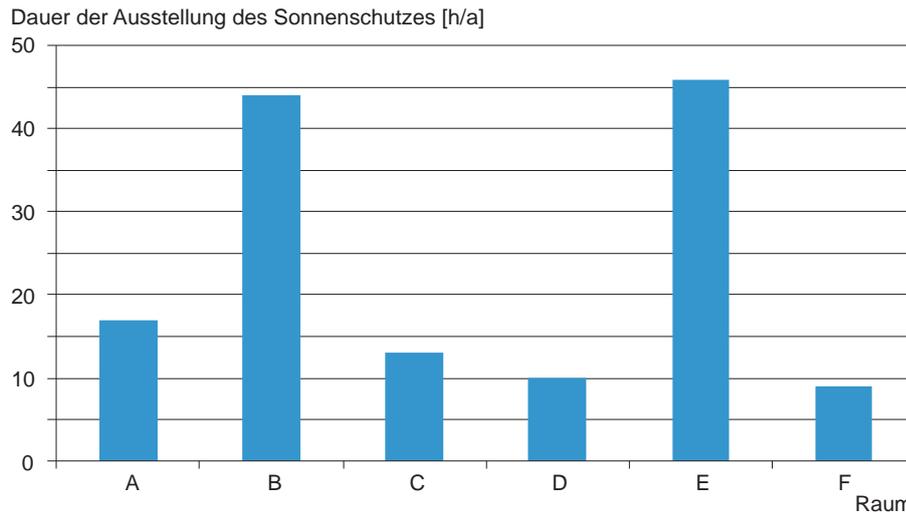


Abbildung 152: Gesamtnutzungsdauer der Ausstellfunktion des Sonnenschutzes in Stunden pro Jahr für sechs Büroräume

Leichte Peaks sind in den Morgenstunden und nach der Mittagspause zu erkennen. Diese sind darauf zurückzuführen, dass der Nutzer, wenn er morgens oder nach dem Mittagessen wieder ins Büro kommt, zunächst einmal durchlüftet.

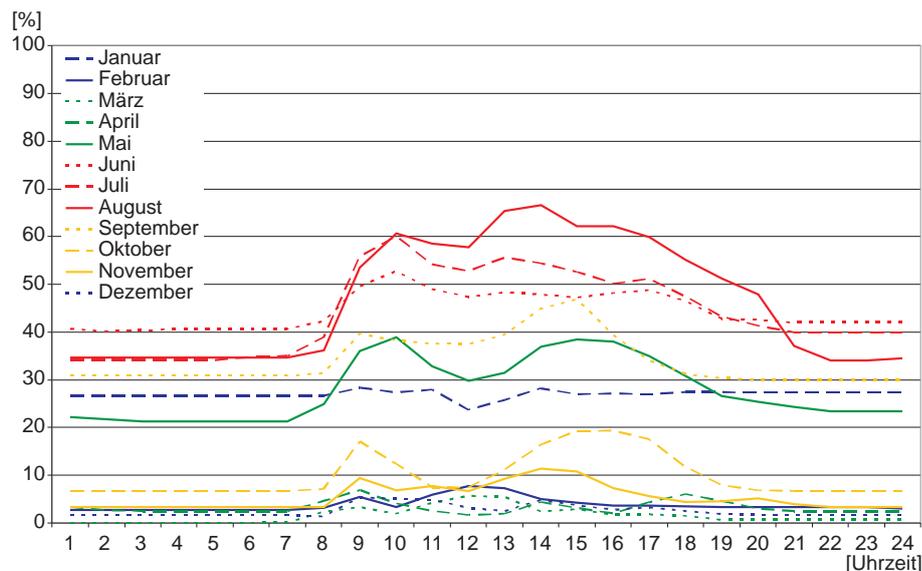


Abbildung 153: Tagesprofil von Fensteröffnungszeiten über den Tag (als mittlerer Anteil an der jeweiligen Stunde) monatsweise unterschieden, Zeitraum vom 1.6.2007 bis 31.5.2008

In den sechs Räumen wurde neben den Raumtemperaturen auch die CO₂-Konzentration aufgezeichnet. So konnte überprüft werden, ob die Veranlassung des Nutzers, ein Fenster zu öffnen, von der jeweils auftretenden CO₂-Konzentration abhängt. In Büros mit zwei Fenstern wurde das Öffnen von mindestens einem Fenster als Ereignis gewertet, als Bewertungsmaßstab wurde jeweils die Raumluftqualität in der Stunde vor der Fensteröffnung herangezogen. Abbildung 154 zeigt, dass die Annahme, bei schlechterer Raumluftqualität - also höherer CO₂-Konzentration - würde häufiger das Fenster geöffnet, in diesen sechs Räumen teilweise bestätigt wird. In manchen Räumen steigt die Häufigkeit deutlich an, im Mittelwert ist nur eine geringe Zunahme zu erkennen. Die große Häufigkeit der Fensteröffnungen im Bereich von

500 ppm lässt sich dadurch erklären, dass Nutzer morgens beim Betreten häufig das Fenster öffnen, wenn jedoch die CO₂-Konzentration niedrig ist.

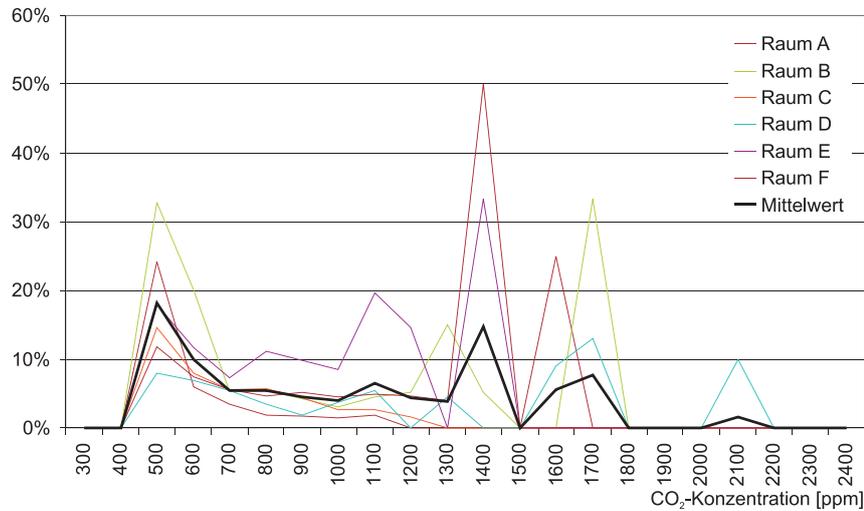


Abbildung 154: Häufigkeit bzw. daraus abgeleitete Wahrscheinlichkeit, dass bei einer bestimmten CO₂-Konzentration ein Fenster geöffnet wird, Datenbasis: 2 Jahre, bezogen auf Anwesenheitszeiten des Nutzers

Setzt man aber die Fensteröffnungsvorgänge in Bezug zur Tageszeit, lassen sich deutliche Ausschläge erkennen. Abbildung 155 zeigt einen starken Peak zwischen 7 und 8 Uhr, d.h. beim Betreten der Büros am Morgen öffnen die Mitarbeiter oft das Fenster. Die Häufigkeit, dass in diesem Zeitraum das Fenster geöffnet wird, beträgt in diesen sechs Büros im Mittel mehr als 30 Prozent. Danach fällt der Wert im Mittel auf unter 5 Prozent und steigt bis zur Mittagszeit wieder auf fast 10 Prozent an.

Die im Büro herrschende Raumtemperatur (Abbildung 156) hat keinen deutlichen Einfluss auf die Veranlassung, ein Fenster zu öffnen.

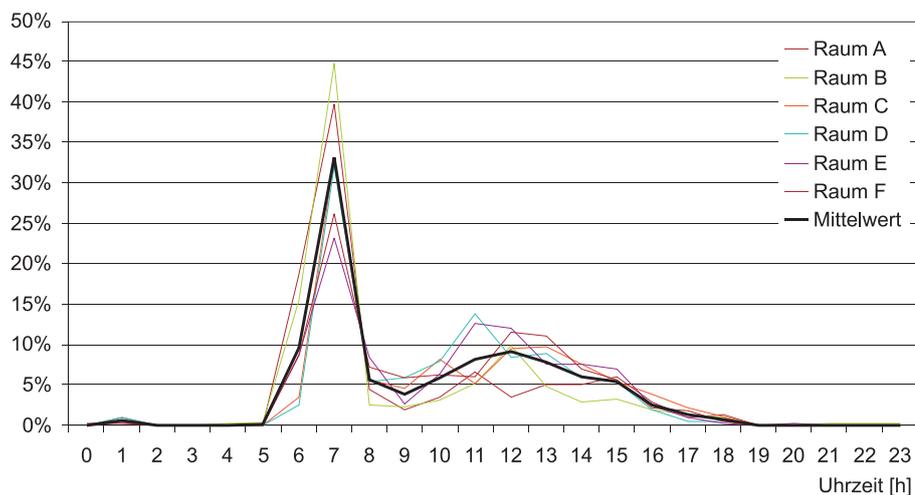


Abbildung 155: Häufigkeit bzw. daraus abgeleitete Wahrscheinlichkeit, dass zu einer bestimmten Uhrzeit ein Fenster geöffnet wird, Datenbasis: 2 Jahre, bezogen auf Anwesenheitszeiten des Nutzers

Während sich zeigte, dass die Häufigkeit des Öffnens eines Fensters weder erkennbar von der Raumtemperatur noch von der Außentemperatur abhängt, so ist die Dauer, die ein Fenster geöffnet bleibt, deutlich von der Außentemperatur abhängig. Abbildung 157 zeigt, dass die Häufigkeit eines geöffneten Fensters

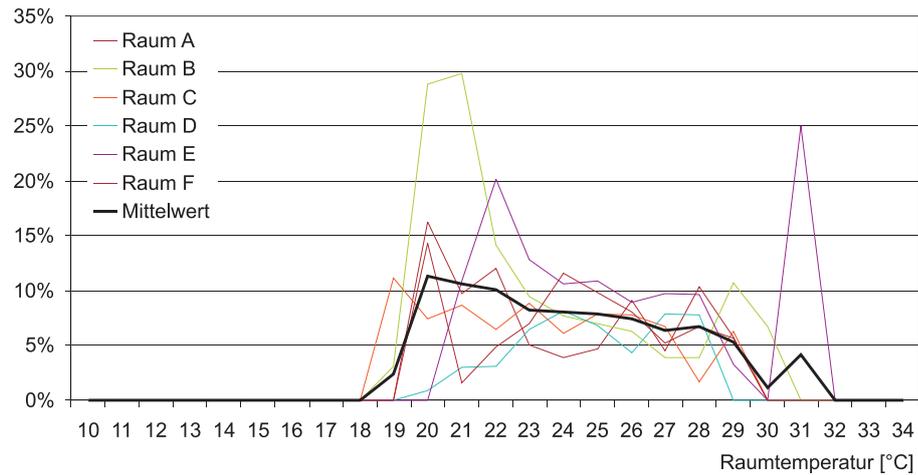


Abbildung 156: Häufigkeit bzw. daraus abgeleitete Wahrscheinlichkeit, dass bei einer bestimmten Raumtemperatur ein Fenster geöffnet wird, Datenbasis: 2 Jahre, bezogen auf Anwesenheitszeiten des Nutzers

bei Anwesenheit eines Nutzers bis ca. 26°C auf 50 Prozent ansteigt und danach wieder abnimmt. Die Ausschläge der Kurven an den Rändern hängen damit zusammen, dass nur wenige Außentemperaturen in diesen Bereichen vorkommen und damit das Auftreten eines geöffneten Fensters gegebenenfalls überbewertet wird.

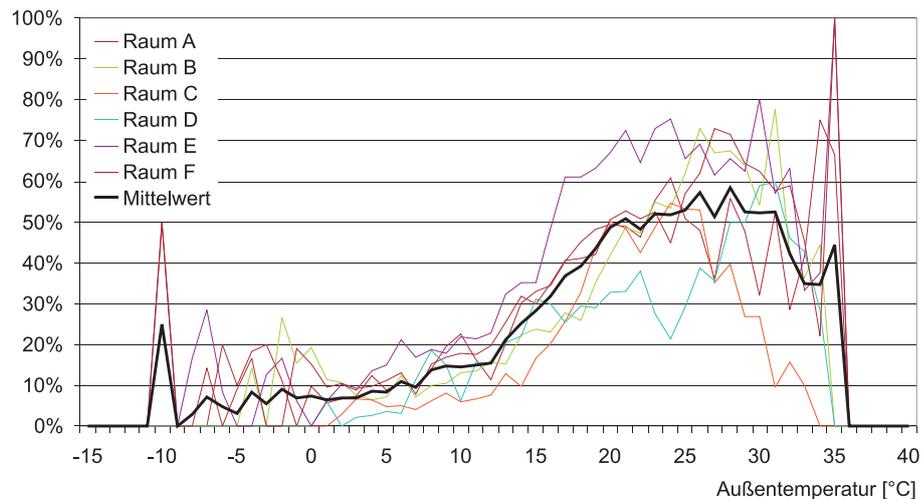


Abbildung 157: Häufigkeit bzw. daraus abgeleitete Wahrscheinlichkeit, dass bei einer bestimmten Außentemperatur ein offenes Fenster vorgefunden wird, Datenbasis: 2 Jahre, bezogen auf Anwesenheitszeiten des Nutzers

4.10.4. Kunstlichtnutzung

Über die Datenpunkte der Gebäudeleittechnik lassen sich auch die Betriebszeiten des Kunstlichts in den Büros ermitteln. Diese sind hauptsächlich abhängig vom Nutzerverhalten, da sich das Kunstlicht nicht automatisch einschaltet, sondern lediglich bei Verlassen des Raums nach 15 Minuten ein automatischer Eingriff der GLT zum Ausschalten der künstlichen Beleuchtung erfolgt. Ob allerdings der Nutzer das Licht selbst ausschaltet oder die GLT dies übernimmt, kann nicht anhand der Daten unterschieden werden.

In Abbildung 158 sind die Monatssummen der Einschaltdauer in den sechs exemplarischen Büros dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die saisonalen Unterschiede. Im Raum F wurde ab Oktober 2007 die Beleuchtung wesentlich länger genutzt als in den übrigen Büros. Im Sommer 2008 war außerdem die Einschaltzeit der Beleuchtung im Raum E gegenüber den übrigen Monaten vergleichsweise höher.

Die Dauer der Betriebszeit hängt eindeutig vom Tageslichtangebot ab, was die Abbildung 159 unterstreicht. Im Winter ist die Beleuchtung drei- bis fünfmal länger in Betrieb.

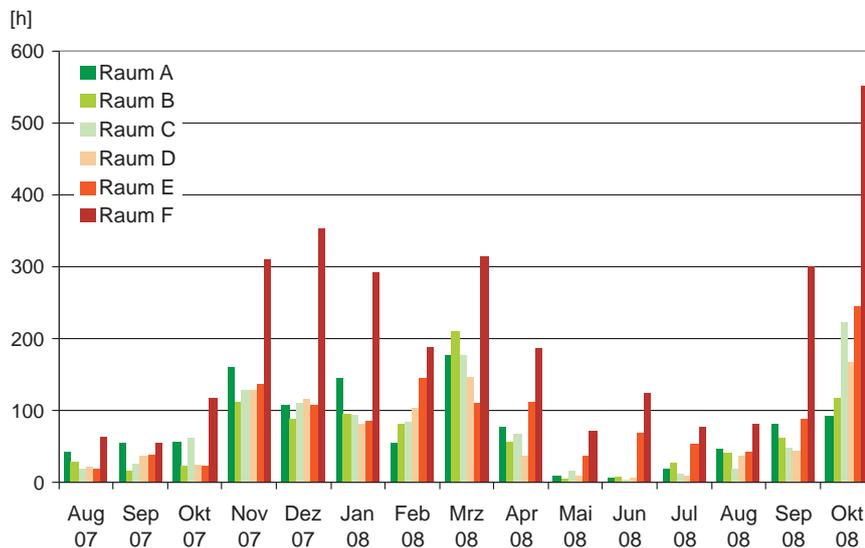


Abbildung 158: Monatliche Betriebszeiten der Beleuchtung, getrennt nach den sechs exemplarisch erfassten Büroräumen

Über die Gebäudeleittechnik konnte außerdem auf die Sollwerteneinstellung der Beleuchtung zugegriffen werden. In Abbildung 160 kann man gut erkennen, dass der Nutzer das Licht im Winter heller einstellt als im Sommer und dass die Einstellmöglichkeit von -3 bis +3 in vollem Umfang ausgenutzt wird. Die Einstellung -3 entspricht dabei einer Beleuchtungsstärke von 300 lx, die Stufe 0 entspricht 500 lx und der Wert +3 750 lx. Außerdem sieht man, dass die Einstellung in der dunkleren Jahreszeit deutlich öfter angepasst wird als im Sommer. Im Jahresschnitt bleibt die Einstellung der Sollbeleuchtungsstärke für 113 Stunden unverändert, im Zeitraum von Oktober bis April sind es nur 77 Stunden im Zeitraum von Mai bis September dagegen 276 Stunden.

Abbildung 161 zeigt den Zusammenhang zwischen der Einstellung durch den Nutzer und der Globalstrahlung und belegt so die jahreszeitliche Abhängigkeit der Sollwerteneinstellung.

Vergleicht man die zeitliche Häufigkeitsverteilung der Kunstlichteinstellung im Haupthaus (Abbildung 162) mit jener der Ostarkade [13], erkennt man, dass das Vorkommen der Dimmstufen gleichmäßiger verteilt ist. In der Ostarkade war eine Konzentration auf die Randwerte und die Nullstellung zu erkennen, Zwischenwerte kamen quasi nicht vor.

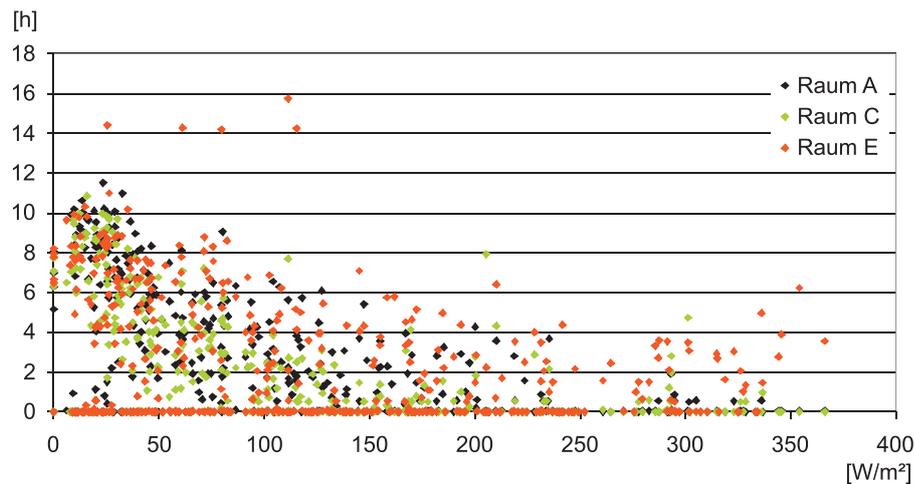


Abbildung 159: Tägliche Betriebszeiten der Büro-Beleuchtung in Abhängigkeit von der Globalstrahlung (Tagesmittelwerte)

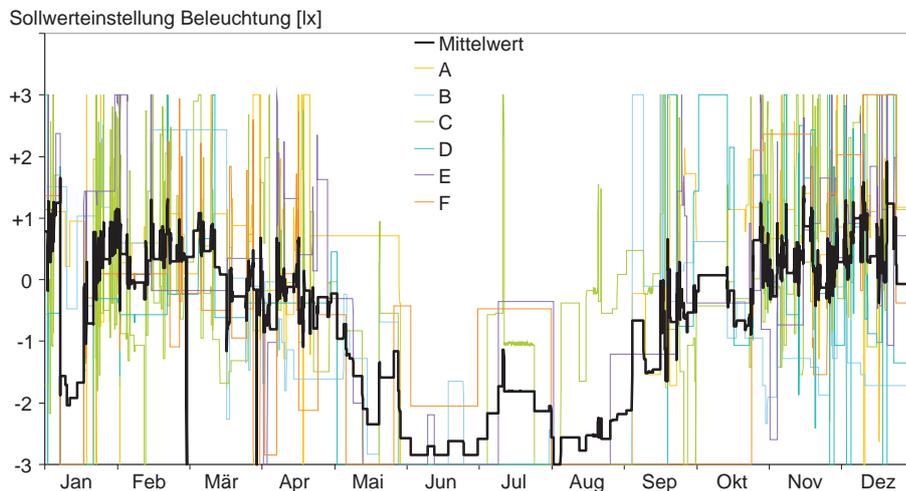


Abbildung 160: SollwertEinstellung des Kunstlichts durch den Nutzer, Stundenwerte der Einzelräume und Mittelwert aus den sechs Räumen, Zeitraum Januar 2008 bis Dezember 2008

Hier ist zwar ebenfalls eine häufige Einstellung der untersten Dimmstufe (hauptsächlich im Sommer) erkennbar, die übrige Verteilung ähnelt jedoch einer Normalverteilung mit der Nullstellung in der Mitte, bei welcher der vorgegebene Wert von 500 lx durch den Nutzer unverändert bleibt. Der Nutzer kann Zwischenstufen der SollwertEinstellung hier besser erkennen als bei der Bürobeleuchtung in der Ostarkade und nutzt diese entsprechend häufiger.

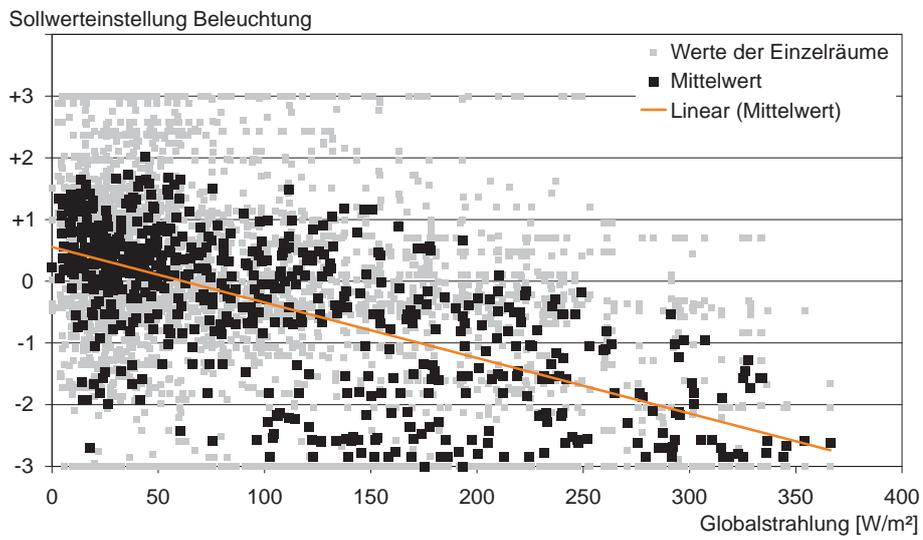


Abbildung 161: Sollwerteinstellung des Kunstlichts durch den Nutzer, Tageswerte der Einzelräume und Mittelwert aus den sechs Räumen mit Regressionsgerade, Zeitraum August 2007 bis Mai 2009

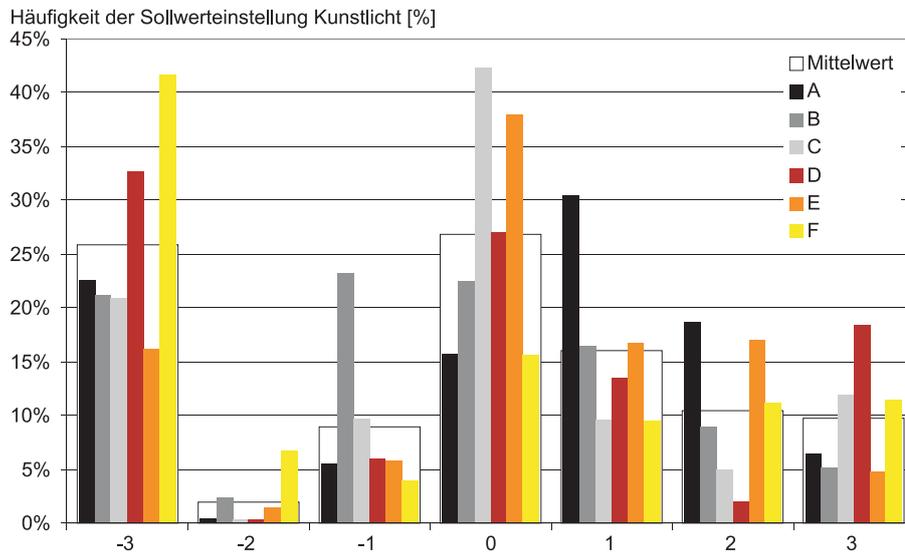


Abbildung 162: Häufigkeitsverteilung der Sollwerteinstellung Kunstlicht, Zeitraum August 2007 bis Mai 2009

4.10.5. Temperatureinstellung

Über die Gebäudeleittechnik wurden in den sechs exemplarischen Räumen sowohl die eingestellte Heizsolltemperatur als auch die Kühlsolltemperatur aufgezeichnet. Je nach Status des Raumes ändert die Gebäudeleittechnik allerdings den Basiswert, von dem aus der Nutzer seine gewünschte Temperatur um jeweils 3 Kelvin nach oben oder nach unten verschieben kann. Abbildung 163 stellt demnach die überlagerten Vorgabewerte durch die GLT und den Nutzer dar.

Eine Schwankung während der Wochentage ergibt sich für Raum B durch die Nachtabsenkung um 2 Kelvin. Die Wochenenden sind ebenso gut zu erkennen, weil hier komplett um 2 Kelvin abgesenkt wird. Ausschläge nach unten ergeben sich immer dann, wenn der Nutzer das Fenster öffnet, weil dann die Solltemperatur auf nur 7°C gesenkt wird, um die Heizung quasi abzuschalten, aber gleichzeitig die Frostfreiheit bzw. zu tiefe Abkühlung des Raumes zu vermeiden. Ist das Fenster während einer ganzen Stunde geöffnet, ist auch der in der Grafik dargestellte Mittelwert 7°C. Der Nutzer dieses Raumes lüftet sowohl im Winter als auch im Sommer sehr häufig im Vergleich zu seinem Kollegen aus Raum D, Abbildung 164. Im März 2008 hatte er z.B. eine Solltemperatur von 22,5°C eingestellt, was für die Solltemperatur bei Abwesenheit (Absenkung) 20,5°C bedeutete.

Abbildung 164 zeigt die Solltemperaturen im Raum D. Die Schwankung der Solltemperatur ist wesentlich beeinflusst durch die Absenkung und den Wechsel zwischen Heiz- und Kühlperiode.

Auch die Kühlung über die Kühldecken wird beim Öffnen des Fensters unterbrochen, sprich der Kühlsollwert wird auf 35°C gesetzt. In Abbildung 165 ist wiederum Raum B dargestellt, die häufigen Fensteröffnungen lassen den Sollwert oft auf 35°C springen. Die Differenz des Sollwertes liegt zwischen Anwesenheit des Nutzers und seiner Abwesenheit bei 3 Kelvin. Deutlich erkennt man, dass der Nutzer im Sommer den Sollwert auf den niedrigst möglichen Wert eingestellt hat. Der Vorgabewert bei Nullstellung des Bedienelements im Raum liegt bei 26°C (bei Anwesenheit des Nutzers). Über das Bedienelement kann der Sollwert zwischen 23°C und 29°C eingestellt werden.

Auch der Nutzer in Raum D hat im Sommer den niedrigst möglichen Wert eingestellt (Abbildung 166).

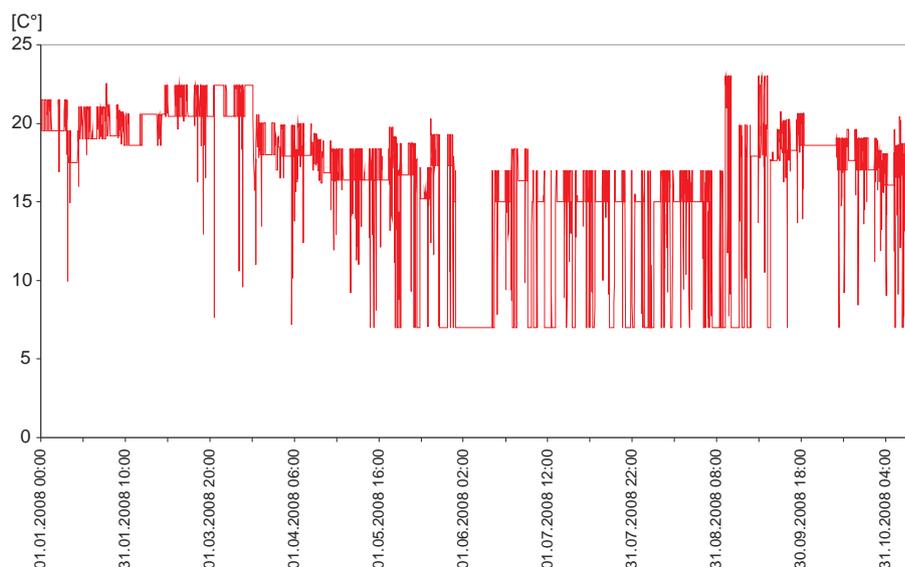


Abbildung 163: Sollheiztemperaturen im Raum B als Stundenmittelwerte im Verlauf des Jahres 2008

Betrachtet man nur diejenige Solltemperaturen, die bei Präsenz des Nutzers gelten, und trägt diese im Jahresverlauf auf, kann man die Veränderung der Nutzereinstellung gut erkennen. Abbildung 167 zeigt



Abbildung 164: Sollheiztemperaturen im Raum D als Stundenmittelwerte im Verlauf des Jahres 2008

diese Heizsolltemperaturen für die 6 exemplarisch aufgezeichneten Räume und deren Mittelwert. Abbildung 168 stellt auf gleiche Weise die Kühlsolltemperaturen dar. Dabei ist zu beachten, dass in der Heizperiode die Kühlsolltemperatur und in der warmen Jahreszeit die Heizsolltemperatur ohne Einfluss bleibt.

Die Untersuchung der einzelnen Räume zeigt, dass das Band zwischen Heizsolltemperatur und Kühlsolltemperatur wie geplant 6 Kelvin breit ist.

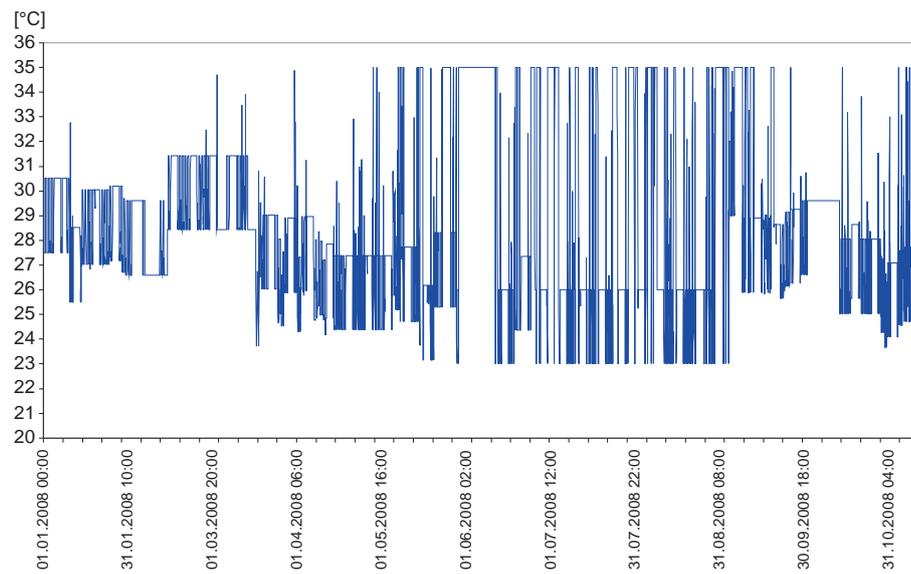


Abbildung 165: Sollkühltemperaturen im Raum B als Stundenmittelwerte im Verlauf des Jahres 2008

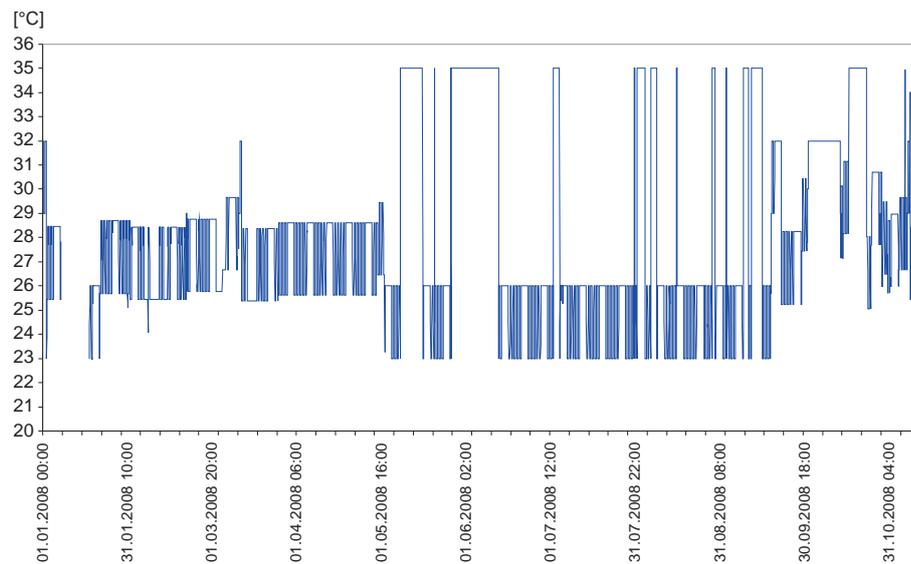


Abbildung 166: Sollkühltemperaturen im Raum D als Stundenmittelwerte im Verlauf des Jahres 2008

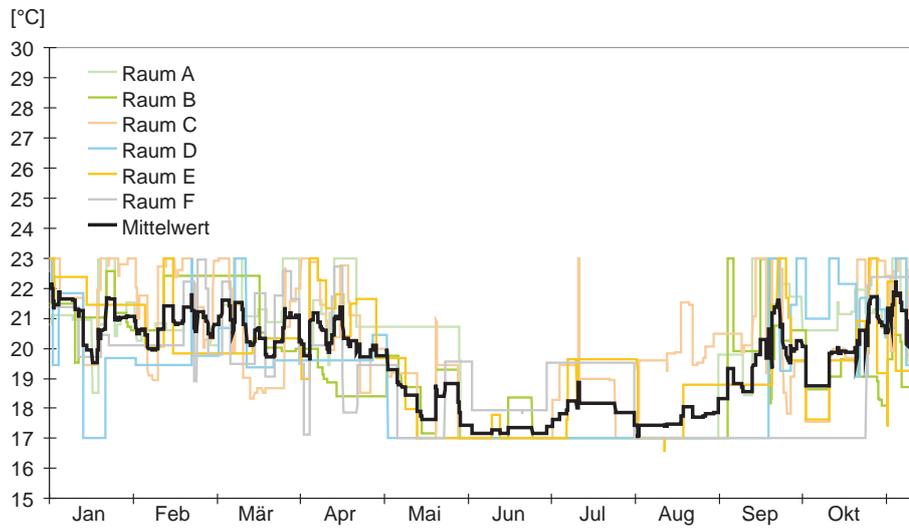


Abbildung 167: Sollheizwerte bei Anwesenheit im Jahr 2008

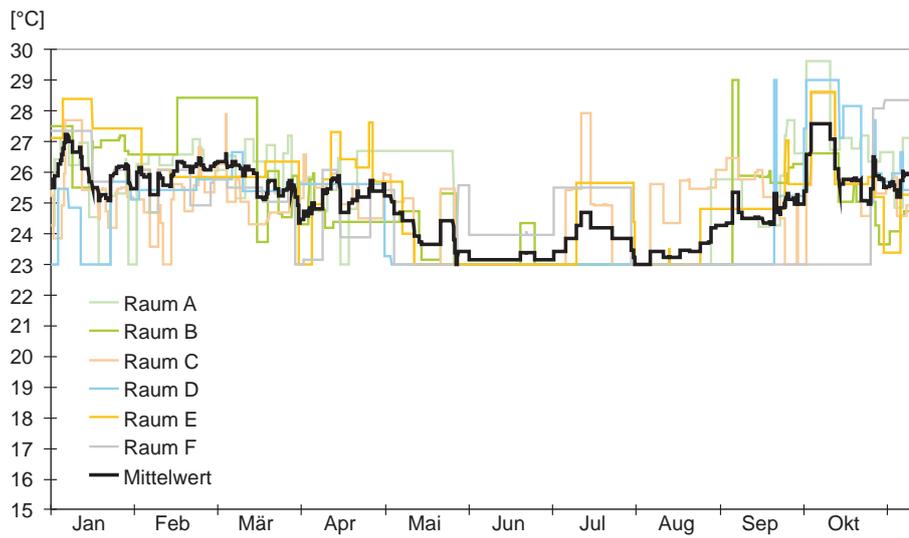


Abbildung 168: Sollkühlwerte bei Anwesenheit im Jahr 2008

4.11. Statistische Modelle zur Verbrauchsprognose

Für die Kontrolle und Optimierung des Energieverbrauchs werden Vergleichswerte benötigt. Diese können anhand aufwändiger dynamischer Gebäudesimulationen oder modellbasierter Berechnungsprogramme berechnet werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, vereinfachte mathematische oder statistische Modelle zu verwenden.

Anlehnend an Untersuchungen zu linearen Regressionsmodellen auf Basis statistischer Auswertungen im Projekt ModBen [5] wurde untersucht, inwieweit sich tägliche Verbrauchsdaten anhand verschiedener Parameter, die im Gebäude erfasst werden, voraussagen lassen, um so gravierende Abweichungen (sei es nach oben oder nach unten) schnell erkennen und wenn nötig darauf reagieren zu können.

Eingesetzt wurden dazu statistische lineare Regressionsmodelle, die sich je nach untersuchtem Wärmezähler oder Anlagentyp mehr oder weniger gut eignen. Zunächst wurde versucht, anhand möglichst weniger Abhängigkeitsfaktoren eine Übereinstimmung von real gemessenen Werte mit den vorausgesagten Werten zu erzielen.

Als ein wichtiger Parameter floss der Gesamtstromverbrauch des Gebäudes in die Modellbildung mit ein. Wie das Lastprofil in Kapitel 4.6.1 zeigt, eignet sich dieser Wert gut für eine Aussage darüber, ob das Gebäude an diesem Tag genutzt wurde oder nicht, also ob es ein regulärer Wochentag oder ein Wochenende bzw. Feiertag war.

4.11.1. Automatisierte Verbrauchsüberwachung

Aus den abgeleiteten Formeln wurde im Sommer 2008 ein webbasiertes Kontrollwerkzeug für die entsprechenden Wärme-, Kälte- und Stromzähler im Haupthaus programmiert. Bei Datenpunkten, bei denen die statistischen Voraussagen keine gute Übereinstimmung brachten, wurden in Abhängigkeit lediglich eines Parameters (beim Heizen und Kühlen die Außentemperatur) lineare Funktionen als Ober- und Untergrenze definiert.

Das Werkzeug leitet aus gemessenen Daten (wie z.B. Außentemperatur, Globalstrahlung, Laufzeit einer Anlage) die erwarteten Verbräuche für die drei vorangegangenen Tage ab und vergleicht sie mit den real gemessenen Werten. Eine farbliche Markierung in der Übersichtstabelle (Abbildung 169) zeigt an, ob der tatsächliche Wert vom berechneten kaum (grün), wenig (gelb) oder stark (rot) abweicht. Bewegt man die Maus über einen der Werte, werden zusätzliche Informationen angezeigt.

Ein solcher Verbrauchsalarm, der die sonst üblichen Funktionsalarme der GLT ergänzen sollte, kann bei Bedarf mit einer Benachrichtigung per E-Mail oder SMS gekoppelt werden. So wird es möglich, gravierende Änderungen im Verbrauch zeitnah zu erkennen.

Wird der Betrieb einer Anlage optimiert, so ist mit einer dauerhaften Unterschreitung des berechneten Wertes zu rechnen. Die hinterlegte Formel für die Voraussage muss dann entsprechend angepasst werden. Tabelle 36 zeigt die hinterlegten Formeln. Dabei wird in der statistischen Analyse oft zusätzlich ein sogenannter Change point vorausgesetzt, ein Punkt, an dem sich das Verhalten einer Anlage stark verändert. Das wäre bei der Heizung z.B. die Heizgrenztemperatur. In der Tabelle ist dieser Punkt jeweils mit angegeben, die Formel wird für den Bereich unterhalb des Change points (CP) und oberhalb getrennt ermittelt. Außerdem wird zwischen Werktag und Wochenende unterschieden. Das Bestimmtheitsmaß (auch Determinationskoeffizient) R^2 gilt als Qualitätsmerkmal, wie gut die berechneten Werte mit den tatsächlich eingetretenen Werten übereinstimmen. Je näher R^2 dem Wert 1 ist, desto besser.

Die entsprechende Formel für die Anwendung der ermittelten Zahlen lautet:

$$y = a_1 * \text{Parameter 1} + a_2 * \text{Parameter 2} + \text{Offset}$$

Ta gestern: 19.281667
 Ta vorgestern: 20.600000
 Ta vorgestern: 18.926667

Achtung, Wert wurde mithilfe des Haupthauses geschätzt: Iglob gestern: 207.117154928
 Achtung, Wert wurde mithilfe des Haupthauses geschätzt: Iglob vorgestern: 189.646630665
 Achtung, Wert wurde mithilfe des Haupthauses geschätzt: Iglob vorgestern: 223.381705136

Legende:
■ = Alles OK, Wert liegt im richtigen Bereich.
■ = Wert liegt NICHT im richtigen Bereich.
■ = Ein Parameter fehlt für die Formel.
■ = Es wurde kein Messwert gefunden.
■ = Für den Messwert wurde kein gültiger Bereich festgelegt - Formel fehlt.

Sensor	Beschreibung	Wert gestern	Wert vorgestern	Wert vorgestern
Wärme				
W01	Wärmemenge Erzeuger gesamt - Heizzentrale	12200 (-0%)	12800 (-7%)	14000 (3%)
W02	Wärmemenge RLTs (inkl Warmwasserbereitung) komplett	310	300	860
W03	Wärmemenge Fußbodenheizung EG Bauteil A	0	0	0
W04	Wärmemenge Statische Heizung komplett	4 (92%)	5 (86%)	10 (84%)
W05	Wärmemenge Warmwasser Duschen	40	30	60
W06	Wärmemenge Warmwasser Küche	40	30	80
W07	Wärmemenge RLT Küche	1	1	10 (92%)
W08	Wärmemenge Klimaboden Konferenz	0	0	0
W09	Wärmemenge Fußbodenheizung EG Bauteil B+C	0	0	0
W10	Wärmemenge Fußbodenheizung EG Bauteil D	1	0	2
W11	Wärmemenge BHKW gesamt - Heizzentrale	0	0	30
W12	Wärmemenge RLT Halle	0	0	10
W13	Wärmemenge RLT Vorstand	0	0	0
W14	Wärmemenge Abgang Nordarkade	12	12.4	13.1
Kälte				
K01	Kältemengen Kühldecken gesamt (A-D)	770	780	1380
K02	Kältemenge RLT Halle EG	0	0	260
K03	Kältemenge RLT Catering	0	0	46

Abbildung 169: Kontrollwerkzeug für tägliche Verbrauchswerte

Anhand der Untersuchung des Wärmeverbrauchs des Heizkreises Statische Heizung zeigte sich, dass die Voraussage des Verbrauchs noch einmal erheblich genauer wird, wenn jeder einzelne Wochentag unterschieden wird. So ist z.B. die Heizlast am Montag nach dem Absenkbetrieb des Wochenendes eine andere als am Dienstag. Abbildung 170 zeigt, welche gute Übereinstimmung mit einer solchen Differenzierung erreicht werden konnte.

Eine Umsetzung dieses prototypisch eingesetzten Prüf-Werkzeuges in die vom fbta entwickelte Monitoring-Software (siehe Kapitel 5.1) ist geplant.

	Werktag?	> CP?	Offset	a ₁	a ₂	
W01 - Wärmemenge Erzeuger gesamt						
R^2	0.92	Nein	Nein	33.630	-176.055	
Changepoint:	10.574	Nein	Ja	8.208	184.159	
Parameter1:	WE01	Ja	Nein	36.497	-1675.195	
Parameter2:	-	Ja	Ja	15.840	-146.713	
W02 - Wärmemenge Abgang RLTs gesamt						
R^2	0.912		Nein	2573.67	-284.467	60.551
Changepoint:	10.574		Ja	1552.17	-40.452	3.249
Parameter1:	WE01					
Parameter2:	S04					
W03 - Wärmemenge Fußbodenheizung EG Bauteil A						
R^2	0.9487	Nein	Nein	549.469	-38.640	
Changepoint:	8.540551	Nein	Ja	482.112	-1.763	
Parameter1:	WE01	Ja	Nein	34.556	-42.202	
Parameter2:	-	Ja	Ja	53.189	-2.619	
W04 - Wärmemenge Statische Heizung komplett						
R^2	0.947		Nein	3619.611	-431.684	0.514
Changepoint:	10.586		Ja	2283.34	-129.730	0.087
Parameter1:	WE01					
Parameter2:	S03					
W09 - Wärmemenge Fußbodenheizung EG Bauteil B+C						
R^2	0.949	Nein	Nein	262.606	-18.566	
Changepoint:	8.541	Nein	Ja	289.915	-3.398	
Parameter1:	WE01	Ja	Nein	247.519	-17.722	
Parameter2:	-	Ja	Ja	85.837	-4.153	
W10 - Wärmemenge Fußbodenheizung EG Bauteil D						
R^2	0.800	Nein	Nein	171.253	-6.633	
Changepoint:	9.389	Nein	Ja	81.379	-4.027	
Parameter1:	WE01	Ja	Nein	158.406	-9.556	
Parameter2:	-	Ja	Ja	53.150	-2.582	
W12 - Wärmemenge RLT Halle						
R^2	0.7996	Nein	Nein	-48.622	7.412	-0.431
Changepoint:	15.70076	Nein	Ja	-0.111	-4.280	0.279
Parameter1:	S06	Ja	Nein	8.992	6.329	-0.386
Parameter2:	S06*WE01	Ja	Ja	19.178	0.7183	-0.021
W13 - Wärmemenge RLT Vorstand						
R^2	0.6101		Nein	-134.633	2.232	5.026
Changepoint:	17.553		Ja	-613.603	9.615	10.761
Parameter1:	S49					
Parameter2:	WE02					

Tabelle 36: Parameter der linearen Regressionsmodelle für die Vorhersage des jeweiligen Wärmeverbrauchs

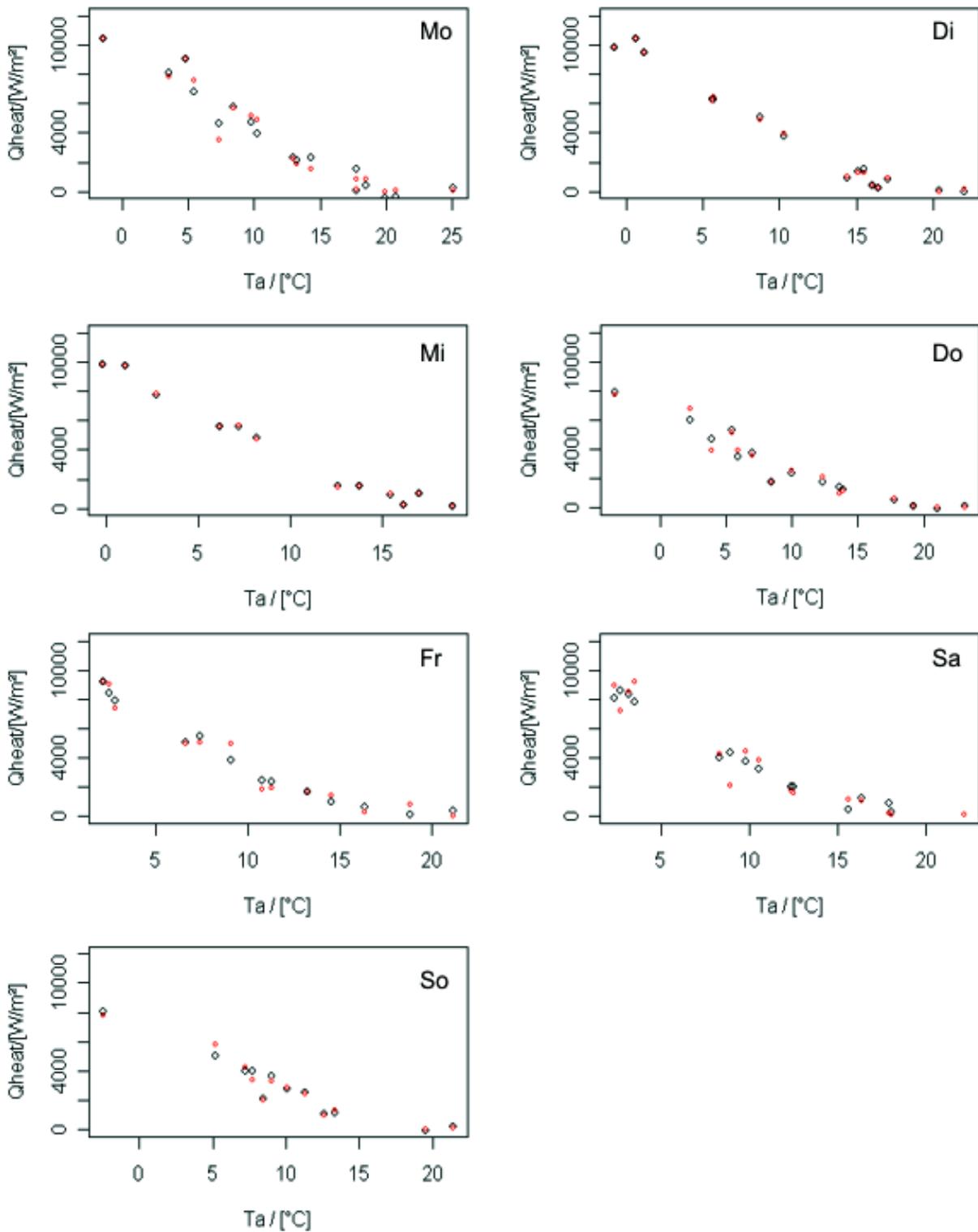


Abbildung 170: Übereinstimmung der Formel mit Messergebnis am Beispiel des Zählers „Statische Heizung“. Jedes Einzelbild stellt chronologisch die Wochentage dar, berechnete Werte sind schwarz dargestellt

5. Softwareentwicklung

5.1. Messdatenvisualisierung

Das bisher vom fbta entwickelte server- und skriptbasierte Visualisierungswerkzeug wurde in eine eigenständige Software überführt, die momentan im Beta-Stadium automatisiert Linien-, Balken-, XY-, Carpet- und Dauerliniendiagramme darstellen kann und speziell auf Fragestellungen beim Monitoring zugeschnitten ist. Diese Software wird nun in allen Monitoring-Projekten am Fachgebiet eingesetzt und stetig weiterentwickelt. Mittlerweile wird diese Software auch in weiteren EnOB-Projekten zur Visualisierung der Daten eingesetzt.

Wurde bisher in den Monitoring-Projekten des fbta jeweils mit unterschiedlichen, projektspezifischen Datenbankstrukturen gearbeitet, wurde nun eine vereinheitlichte Datenbankstruktur entwickelt, die in Zukunft Daten beliebiger Gebäude aufnehmen und verarbeiten kann. Auf dieser Datenbank setzt die Software auf, die in Java programmiert wurde und momentan den Arbeitstitel „MoniSoft“ trägt. Abbildung 171 stellt die Funktionen der Software sowie die möglichen Ausgaben der Software übersichtlich dar. In der Software können verschiedene Gebäude und die Gebäudedaten selbst verwaltet werden. Außerdem steht die Nachbearbeitung von Messdaten zur Verfügung, da erfahrungsgemäß die Erfassung von Messdaten nie völlig fehlerfrei geschieht.

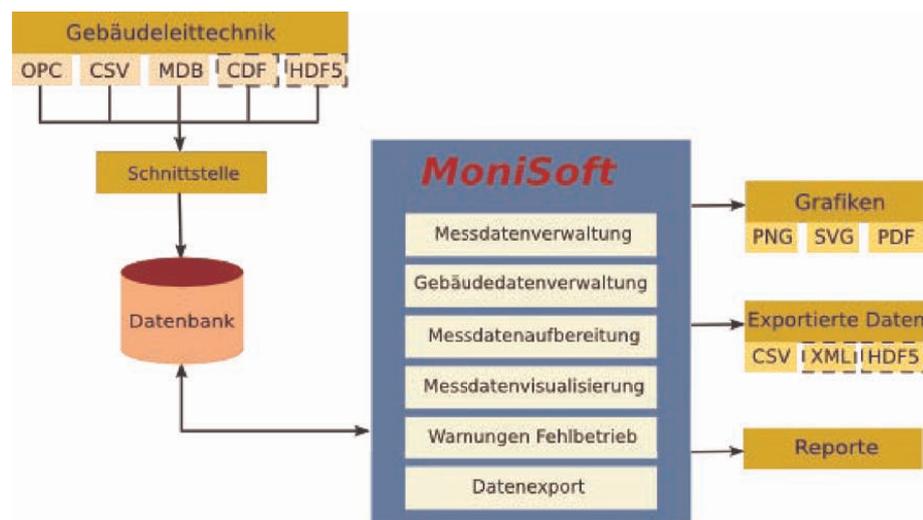


Abbildung 171: Schema der Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung durch die Software „MoniSoft“

Falsche Werte und Ausfallzeiträume erschweren die Auswertung, da abgeleitete Größen verfälscht werden können. Um bei der Vielzahl von Messpunkten einen Überblick zu erhalten, kann deren Qualität über einen gewissen Zeitraum farbig codiert dargestellt werden (Abbildung 172). Die Qualität wird sowohl anhand von Parametern, die jeder Messpunkt als Eigenschaft besitzt, als auch durch statistische Methoden überprüft. Im Falle fehlerhafter Daten können diese über einen Dateneditor gelöscht, verändert oder für ungültig erklärt werden. Die Originaldaten bleiben dabei immer erhalten, sie werden lediglich mit entsprechenden Änderungsattributen versehen. Werden fehlerhafte oder geänderte Daten für eine Auswertung verwendet, ist ein Benachrichtigungsmodus geplant, welcher solche Informationen automatisch in Grafiken einblendet oder den Nutzer anderweitig darauf aufmerksam macht.

Kernpunkt der Software sind unterschiedlichste Möglichkeiten, die Großzahl der gesammelten Daten zu visualisieren. Einige der Darstellungsarten sind auf die speziellen Anforderungen im Gebäudemonitoring zugeschnitten, wie z.B. das XY-Diagramm zur Darstellung eines Temperatur-Komfortbereichs

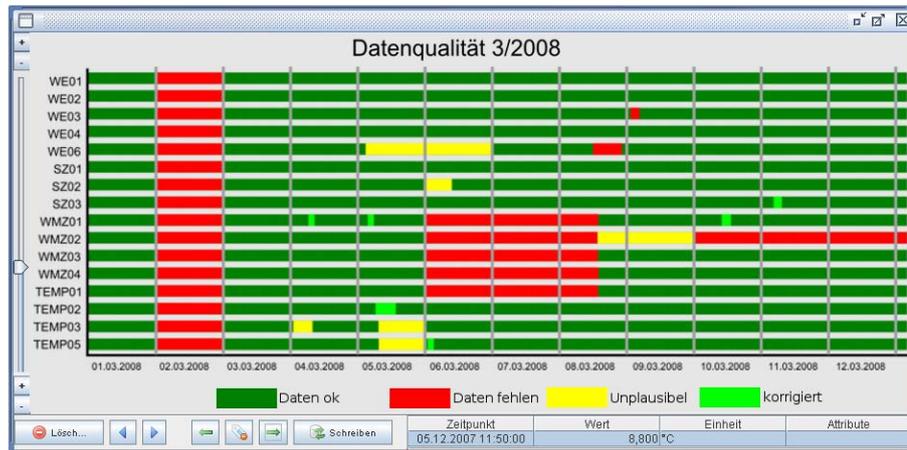


Abbildung 172: In MoniSoft integriertes Modul zur Darstellung der Datenqualität

(Abbildung 173). Grundlage für eine zielgerichtete Gebäudeanalyse sind neben den üblichen grafischen Darstellungsformen wie Linien-, Balken- oder XY-Diagrammen vor allem Grafiken, die es erlauben, Messdaten in ihrem Zusammenhang zu sehen, Regelmäßigkeiten und Abhängigkeiten zu erkennen sowie die Daten nach Zeit (z.B. „Regelarbeitszeit ohne Wochenenden“) und Zustand (z.B. „nur bei eingeschalteter Zuluftanlage“) zu filtern. So sorgen z.B. Carpet-Plots für einen Überblick über Unregelmäßigkeiten im Gebäudebetrieb und Dauerlinien helfen u. a. bei der Abschätzung von Anlagenlaufzeiten. Immer wiederkehrende Zusammenstellungen von Messdaten, wie etwa für Heizkennlinien, können im Kontext mit der Darstellung gespeichert und mit immer neuen Zeiträumen „beladen“ werden. Dadurch können z.B. Optimierungen überprüft oder Verbrauchsdaten mit dem gleichen Zeitraum des Vorjahres verglichen werden. Zur Beurteilung der Daten können in vielen Grafiken bestimmte Werte oder selbst definierbare Wertebereiche markiert werden, um z.B. Grenzwerte oder Zielbereiche hervorzuheben.

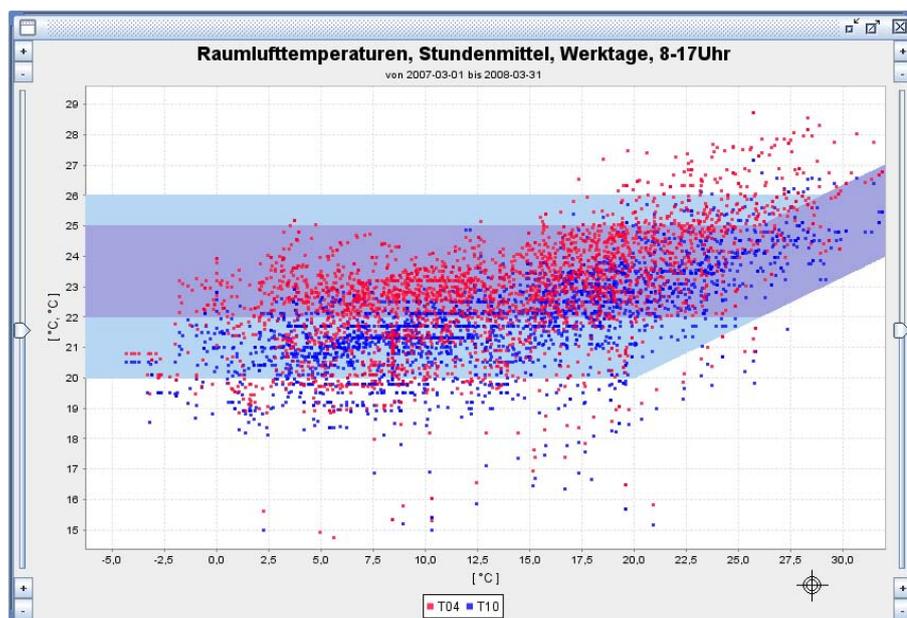


Abbildung 173: Darstellung von Komfortbereichen bei der Raumtemperaturdarstellung in MoniSoft

5.2. Tagesaktuelle Jahresenergiebilanz

Mit den bisher verwendeten Visualisierungen, sei es webbasiert oder als eigenständige Software, konnten nur einzelne Datenpunkte ausgewertet werden. Mittlerweile ist es in MoniSoft allerdings auch möglich, virtuelle Datenpunkte anzulegen, welche z.B. die Summe oder die Differenz aus mehreren Datenpunkten darstellen. Auch die Hinterlegung komplizierterer Formeln ist möglich. Somit kann nun auch eine tages- oder gar stündlich aktuelle Gesamtbilanz eines Gebäudes realisiert werden.

Innerhalb dieses Projektes wurde prototypisch (und noch getrennt von MoniSoft) die tagesaktuelle Primärenergiebilanz des Haupthauses für jeweils 365 Tage im Rückblick umgesetzt (Abbildung 174). Man kann also von einer gleitenden Jahresbilanz sprechen. Dabei wurden alle fortlaufend verfügbaren Zählerdaten mit fixen Daten aus temporären Messungen und Abschätzungen kombiniert, so dass eine vergleichsweise sehr genaue Gesamtbilanz erzeugt werden konnte.

In der Abbildung sind die Primärenergieverbrauchswerte für Heizen, Warmwasser, Lüften, Kühlen und Beleuchten nach oben hin aufgetragen, als negativ wurde die Stromgutschrift vermerkt. Durch die Aneinanderreihung von täglichen Werten ist schnell eine Tendenz ablesbar. Die Werte für Heizen und Kühlen können absolut oder klimabereinigt dargestellt werden.

Allerdings ist diese Visualisierung stark von der Verfügbarkeit der Messdaten abhängig, da immer alle relevanten Datenpunkte gemeinsam verfügbar sein müssen. Die fehlenden Balken in der Abbildung zeigen Datenausfälle. Die Berechnung im Beispiel wurde allerdings bereits optimiert, da fehlende Daten bis zu einer Ausfallzeit von einem Tag aus den benachbarten Daten interpoliert werden. Diese Algorithmen machen die Erzeugung der Energiebilanzwerte momentan noch recht langsam. Bei einer eventuellen Implementierung in MoniSoft muss die Schnelligkeit der Berechnung noch verbessert werden.

Energiekennzahlen

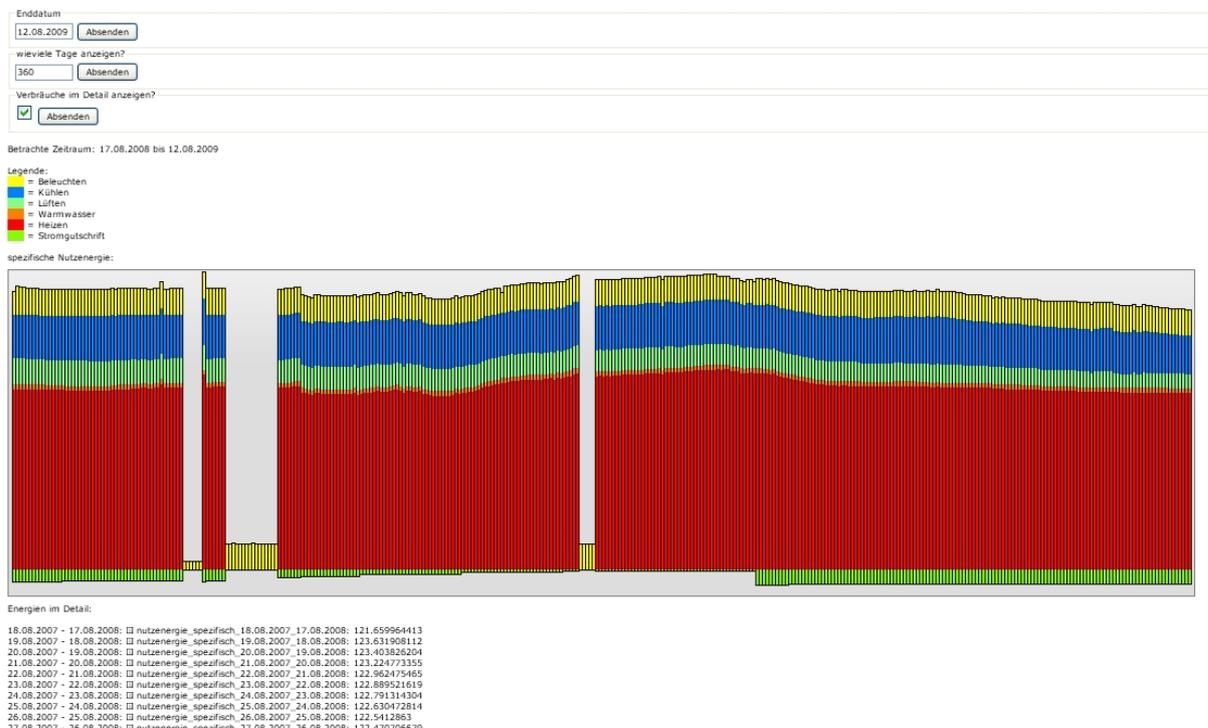


Abbildung 174: Täglich fortlaufende Jahresenergiebilanz zur Überprüfung der mittelfristigen Entwicklung

5.3. „Laiensystem“

Die fortgeschrittenen Möglichkeiten einer verbesserten und vereinfachten Visualisierung helfen bei der Auswertung von Messdaten und auch der Optimierung von Gebäuden. Das notwendige Wissen, um die richtigen Fragen an die Gebäudeleittechnik und deren Funktion sowie an die energetische Effizienz eines Gebäudes zu stellen und damit eine sinnvolle Optimierung des Betriebs zu ermöglichen, kann eine Software nicht ersetzen.

Sie kann aber Hilfestellung leisten, und so entstand die Idee, die Erfahrungen aus diesem und vergangenen Monitoring-Projekten anders als in einem gedruckten Endbericht zu speichern und nachfolgenden Mitarbeitern im Monitoring oder auch den Facility Managern in einem Gebäude vor Ort zur Verfügung zu stellen. Dazu wurde ein webbasierter Prototyp entwickelt, der noch unabhängig funktioniert, aber zukünftig integrierter Bestandteil der Visualisierungs-Software sein soll.

In der Web-Oberfläche erhält der Nutzer eine Aufstellung von möglichen Datenpunkten, die in einem Gebäude zu Verfügung stehen können. Daraus wählt er die in seinem Gebäude real verfügbaren Datenpunkte aus und erhält sofort Vorschläge für Auswertungen, die anhand dieser Datenpunkte durchgeführt werden können. Diese Vorschläge enthalten Beispielgrafiken, Erläuterungstexte, übliche spezifische Zielkennwerte sowie Querverweise zu Normen und Richtlinien, die zu diesem Thema Aussagen treffen.

Abbildung 175 zeigt auf der linken Seite die Auswahl für die Messpunkte, oben rechts werden die Vorschläge für Auswertungen gezeigt. Sobald man eine Auswertung auswählt, öffnet sich in einem neuen Fenster die Beschreibung mit Beispielgrafiken und Verweisen zu anderen Dokumenten oder Internetseiten.

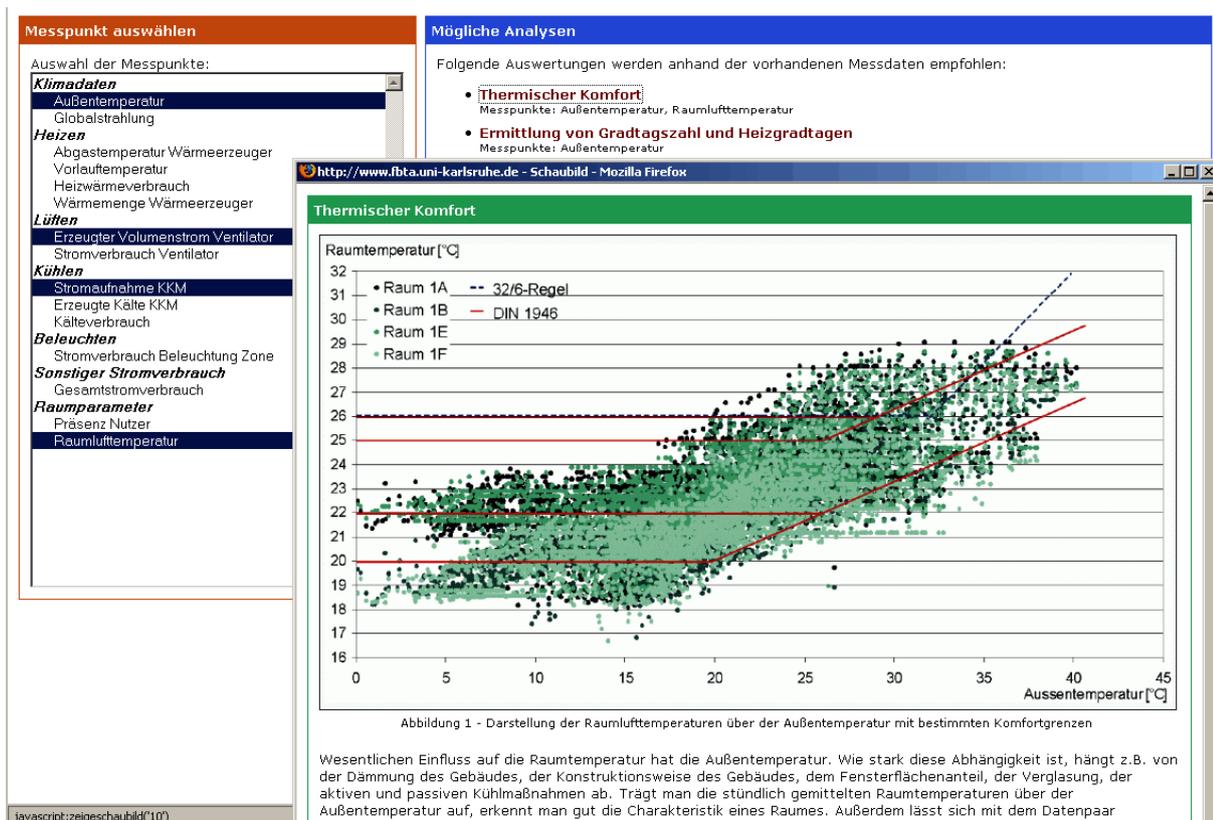


Abbildung 175: Auswahl von beispielhaften Auswertungen im „Laiensystem“ mittels vorhandener Messpunkte

6. Wissenstransfer

Im Dezember 2008 ist das BINE-Info „Gebäude sanieren - Bürohochhaus der sechziger Jahre“ erschienen (Abbildung 176). Der BINE Informationsdienst stellt in seinen Broschüren Konzepte und Energietechnologien für heute und morgen vor und hat bereits BINE-Infos über einige EnOB-Demonstrationsprojekte sowie Energieeffizienztechnologien veröffentlicht. In diesem Projektinfo wurde das Sanierungskonzept des Haupthauses ausführlich vorgestellt und erste Messergebnisse wurden aufgezeigt.



Bürogebäude der sechziger und siebziger Jahre sind oft in vielerlei Hinsicht nicht mehr zeitgemäß. Weder das äußere Erscheinungsbild noch der Arbeitsplatzkonfort entsprechen heutigen Anforderungen und Möglichkeiten. Auslöser für eine Sanierung sind häufig allerdings erst Bauschäden oder gesetzliche Auflagen. Stehen Raummaßnahmen an, sollte nicht allein Wert auf Äußerlichkeiten gelegt werden: Eine grundlegende Modernisierung kann durch eine engagierte Planung optimale Lösungen für die energetische Qualität, den Nutzerkomfort und die Gestaltung miteinander vereinen. Ein Beispiel dafür bietet das Hauptgebäude der KfW Bankengruppe in Frankfurt am Main. Das Büroturm-Ensemble entstand Ende der sechziger Jahre. Man sah den Gebäuden an, dass außer an der Haustechnik seitdem keine größeren Änderungen vorgenommen worden waren. Neue Auflagen zum Brandschutz machten eine Sanierung zwingend erforderlich. Der Bauherr wollte dabei von Anfang an nicht nur eine Verbesserung der gestalterischen und räumlichen Qualität erreichen, sondern im Rahmen einer integralen Planung auch ein Beispiel für seine Förder-

ziele im Bereich Umwelt- und Klimaschutz setzen. Die wichtigsten Eckpfeiler des Energiekonzeptes sind eine innovative Fassade mit deutlich verbesserten winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz, Kälte- bzw. Wärmeerzeugung über Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Belüftung und sommerliche Nachlüftung über eine Abluftanlage, eine optimierte Tageslichtnutzung sowie eine preis- und tageslichtabhängige Kunstlichtregelung. Im Zuge der Sanierung wurden auch der Innenraum umstrukturiert und alle Möglichkeiten für eine Erweiterung ausgeschöpft: Ein Gebäudeteil wurde um drei Etagen aufgestockt und im Erdgeschoss ein repräsentativer Eingangsbereich mit Sitzungs- und Veranstaltungsräumen geschaffen. Nach vierjähriger Bauzeit wurden die Räume ab Herbst 2006 wieder schrittweise bezogen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) fördert im Rahmen seines Forschungsbereichs „Energetische Sanierung der Bausubstanz“ (EnSan) die detaillierte Erfassung und Auswertung von Messdaten des Projektes. Sie läuft seit Februar 2007, erste Rückschlüsse lassen sich bereits ziehen.

Abbildung 176: Das Deckblatt des 4-seitigen BINE-Infos über das Haupthaus

Im Februar 2009 wurde in der österreichischen Zeitschrift „Erneuerbare Energie“ Ausgabe 1/2009 ein Artikel über das Energiekonzept, das Monitoring sowie Messergebnisse veröffentlicht.

Während und nach der Projektlaufzeit wurde das Projekt auf verschiedenen Veranstaltungen und Symposien vorgestellt. Besonders zu erwähnen sind hier der Energieberater im Rahmen der Messe „Light and Building“ in Frankfurt 2008 und der „dena Zukunft Haus Kongress“ in Berlin ebenfalls 2008.

Im Juni 2009 wurden das Energiekonzept sowie Ergebnisse im Zusammenhang mit der entwickelten Monitoring-Software auf der internationalen Bauphysikkonferenz in Istanbul vorgestellt.

Präsentationen über das Energiekonzept, Messergebnisse und Optimierungsmaßnahmen wurden außerdem immer wieder in Vorlesungen am Karlsruher Institut für Technologie im Rahmen der Architektenausbildung sowohl im Grund- als auch Hauptstudium gezeigt. Zu erwähnen seien an dieser Stelle noch Gastvorträge an der Universität Stuttgart und der ETH Zürich.

Im Jahr 2006 wurde mit freundlicher Unterstützung der KfW Bankengruppe im Gebäude selbst der EnOB-Workshop „Konzepte zur optimierten Betriebsführung in Gebäuden“ ausgerichtet. Der Bauherr selbst führt im Gebäude immer wieder Veranstaltungen zum Thema Energieeffizienz durch und inlän-

dische sowie ausländische Delegationen besuchen die KfW-Gebäude in Frankfurt. Im November 2009 wurden Haupthaus und Ostarkade mit dem öffentlichkeitswirksamen „Green Building“-Preis der Stadt Frankfurt ausgezeichnet.

Gemessene Lastprofile des Haupthauses wurden einem Diplomanden der Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen zur Verfügung gestellt. Die Untersuchung diente als Vorarbeit für das MERegio Projekt [6] und sollte die möglichen Vorteile einer dezentralen Energieerzeugung im Großraum Stuttgart / Karlsruhe näher betrachten. Hier wurden Lastprofile von Nichtwohngebäuden verwendet, um ein Planungsmodell zur optimalen Dimensionierung von Mikroenergienetzen anzuwenden und zu bewerten. Es handelt sich hierbei um ein Optimierungsmodell zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von verschiedenen dezentralen Energieerzeugungsanlagen. Einer der wichtigsten hierfür benötigten Inputs ist der Lastgang der Gebäude in dem betrachteten Mikroenergienetz. Hierbei wird zwischen Heizwärme, Warmwasserbereitung, Kühlung und Stromlast (alles in kW) unterschieden. Der Betrachtungszeitraum erstreckt sich hierbei über ein Jahr.

Im Herbst 2009 wird sich ein indischer Austauschstudent im Rahmen seiner Masterarbeit mit der weiteren Auswertung von Messdaten der KfW-Gebäude befassen.

Dieser Abschlussbericht wird außerdem komplett im EnOB-Lernnetz als ILIAS-Modul zu finden sein.

Im Tabelle 37 sind einzelne Veröffentlichungen, in Tabelle 38 Vorträge und Vorlesungen aufgeführt:

Publikationen		
14.06.2009	Monitoring Low-Energy Buildings by a self-developed Software-Tool	Proceedings of 4th International Building Physics Conference, Istanbul, ISBN 978-975-561-350-5
27.03.2009	Revitalisierung des Haupthauses der KfW Bankengruppe in Frankfurt a.M. – Energiekonzept und Messergebnisse	Tagungsband zum OTTI Anwenderforum Energetische Sanierung, Kloster Banz, Bad Staffelstein
01.03.2009	Revitalisierung des Haupthauses der KfW Bankengruppe in Frankfurt a.M. Energiekonzept und Messergebnisse	Erneuerbare Energie 1/2009, Österreich
28.10.2008	Revitalisierung des Haupthauses der KfW in Frankfurt a.M. – Energiekonzept und Messergebnisse	Tagungsband zum dena Zukunft haus Kongress 2008

Tabelle 37: Publikationen

Vorträge		
25.06.2009	Vorlesung Hauptstudium Architektur, Karlsruhe	Die KfW-Gebäude in Frankfurt: Energiekonzepte und Ergebnisse des Monitorings
16.06.2009	4th International Building Physics Conference, Istanbul	Monitoring Low-Energy Buildings by a self-developed Software-Tool
27.03.2009	OTTI Anwenderforum Energetische Sanierung, Kloster Banz, Bad Staffelstein	Revitalisierung des Haupthauses der KfW Bankengruppe in Frankfurt a.M. – Energiekonzept und Messergebnisse
29.10.2008	dena Zukunft haus Kongress 2008, Berlin	Revitalisierung des Haupthauses der KfW in Frankfurt a.M. – Energiekonzept und Messergebnisse
01.10.2008	EnOB-Symposium: Auf dem Weg zu Nullenergie-Gebäuden, Dresden	Revitalisierung des Haupthauses der KfW Bankengruppe in Frankfurt a.M. - Postervortrag
03.07.2008	Vorlesung Hauptstudium Architektur, Karlsruhe	Monitoring und Betriebsoptimierung von Nichtwohngebäuden
09.04.2008	Deutscher Energieberaterntag der Bundesarchitektenkammer im Rahmen der Messe Light+Building in Frankfurt a.M.	Energiemonitoring des Haupthauses der KfW Bankengruppe in Frankfurt
18.12.2007	Gastvorlesung im Seminar Simulation Klimagerechtes Bauen, Universität Stuttgart	Passive Kühlung, Freie Lüftung und Simulation
30.11.2007	Gastvorlesung in Vorlesungsreihe Spezialfragen der Bauphysik, ETH Zürich, Schweiz	Komfortuntersuchungen an Bürobauten mit passiver Kühlung
18.09.2007	TAC Seminar, Liverpool, England	Monitoring and Optimizing the Operation of Non-residential Buildings

Tabelle 38: Vorträge und Vorlesungen

7. Fazit und Ausblick

Die wissenschaftliche Begleitung im Rahmen dieses Projektes umfasste die kontinuierliche und temporäre Erfassung von Messdaten für die Bildung von Energiebilanzen und Kennwerten zur Überprüfung und Optimierung des Gebäudebetriebs.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass beim Haupthaus der KfW Bankengruppe in Teilbereichen, insbesondere beim Energieverbrauch für das Kunstlicht, gute Ergebnisse erzielt wurden. Im Bereich der Kühlung konnte im zweiten Betriebsjahr der Energieverbrauch deutlich gesenkt werden. Dennoch liegt der Primärenergieverbrauch für Kühlen und die Hilfsenergie hier noch ca. ein Drittel über dem prognostizierten Wert, was zum Teil auf erhöhte Betriebszeiten der Zuluftkonditionierung zurückzuführen ist. Allerdings ist auch der Primärenergiefaktor für die Kälte aus dem Verbund nicht so niedrig wie erwartet, da zwei von vier Absorptionskältemaschinen nicht in Betrieb waren. Außerdem kam die Wärme zum Betrieb der Absorptionskältemaschinen nur im Jahr 2007 von den Blockheizkraftwerken, im Jahr 2008 standen diese still. Die Antriebsenergie wurde in diesem Zeitraum hauptsächlich von den Brennwertkesseln bereitgestellt.

Der Nichtbetrieb der Blockheizkraftwerke aufgrund eines Defekts führte auch auf der Seite der Wärmeerzeugung während der Heizperiode zu einem höheren Primärenergiefaktor. Gemeinsam mit dem durch die Gebäudeundichtigkeit und die nicht optimal eingestellte zentrale Abluftregelung hervorgerufenen erhöhten Nutzenergieverbrauch führte dies zu deutlich erhöhten Heizwärmeverbrauchswerten sowohl im Jahr 2007 als auch 2008. Obwohl bereits Maßnahmen ergriffen wurden, besteht besonders hier noch immer Handlungsbedarf.

Im Bereich der Lüftung führten auf der Bedarfsseite erhöhte Betriebszeiten, insbesondere bei der Halle im EG und dem Sitzungssaal, zu erhöhten Energieverbrauchswerten. Verschiedene Lüftungsanlagen wurden nicht optimal betrieben, zusätzlich konnte aufgezeigt werden, dass die spezifischen Energiekennwerte der Zu- und Abluftanlagen nicht an die Richtwerte heranreichten.

Beim zentralen Abluftkonzept kann bei den Büros, in denen die Stufenausbildung in der abgehängten Decke die einströmende Luft bremst und deren Herabfallen über dem Arbeitsplatz bewirkt, von konzeptionellen Schwächen gesprochen werden. Allerdings wurde dies im integralen Planungsteam unter Kenntnis der möglichen Konsequenzen bewusst in Kauf genommen zugunsten einer architektonisch besseren Lösung. Dies führte dazu, dass in diesen Büros die automatische Zuluftströmung während der Anwesenheit des Nutzers unterbunden wurde. Eine negative Beeinflussung der Luftqualität ist in diesen Räumen nicht zu erkennen, zumal der Nutzer bei Bedarf die Nachströmöffnung über das Bedienelement im Raum einschalten kann.

Bei der Regelung der zentralen Abluftanlagen konnten Schwächen in der kalten Jahreszeit aufgezeigt werden. Die Lüftung fuhr nachts mit höherer Stufe als tagsüber und erhöhte damit unnötig die Lüftungswärmeverluste. Als Konsequenz wurde von Januar bis Mai 2009 die zentrale Abluft abgeschaltet. Der Heizwärmeverbrauch wurde signifikant positiv beeinflusst, eine negative Beeinflussung der Luftqualität konnte nicht festgestellt werden.

Zur Reduktion des Heizwärmebedarfs in den Büros wurde eine konsequente Einzelraumregelung umgesetzt, die während der Abwesenheit des Nutzers den Heizsollwert nach unten korrigiert und beim geöffneten Fenster das Heizkörperventil vollständig schließt. Durch Messungen wurde die Funktion dieser Regelung bestätigt. Auch in Hinblick auf eine Reduktion des Kühlbedarfs erfüllt die Einzelraumregelung ihren Zweck. Bei Abwesenheit des Nutzers wird der Kühlsollwert angehoben und bei geöffnetem Fenster die Kühldecke abgeschaltet.

In den Büroräumen wurde ein mäßiger sommerlicher Komfort festgestellt, die gemessene Kühlleistung

in den Kühldeckensträngen war vergleichsweise gering. Hier hat eine Anpassung der Regelung im Jahr 2008 noch nicht den gewünschten Erfolg gebracht, eine weitere Optimierung ist für die nächste Sommerperiode geplant. Die Auswertungen haben gezeigt, dass die automatische Regelung des Sonnenschutzes wie geplant funktioniert und damit zur gewünschten Reduktion der externen Wärmelasten beiträgt.

Es wurde mit der Fassadengestaltung und den geringen Raumtiefen ein gutes Tageslichtkonzept umgesetzt. Die Stromverbrauchswerte für das Kunstlicht in den Büroräumen belegen, dass die tageslicht- und präsenzabhängige Regelung ihren Zweck erfüllt.

Bei der Umsetzung des Konzeptes zur kontinuierlichen Datenerfassung wurde bei diesem Projekt mit der OPC-Schnittstelle konsequent auf einen Standard gesetzt. Leider stellte sich heraus, dass es auch bei diesem Standard kleine Abweichungen gibt, die zwischen Client und Server von jeweils unterschiedlichen Herstellern wiederholt zu Ausfällen führten. Die Analyse von Tages- oder Monatsdaten war dadurch nicht beeinträchtigt, durchgängige Stundendaten waren nur schwer zu ermitteln. Hier sollte bei zukünftigen Projekten geprüft werden, ob mit Produkten desselben Herstellers bessere Ergebnisse erzielt werden. Einige falsch eingebaute Energiezähler sowie teilweise nicht ausreichend lange Beruhigungsstrecken bei Zählern, die in Bestandsgebäuden manchmal schwer zu realisieren sind, führten zu Ungenauigkeiten bei der Verbrauchsermittlung.

Bezüglich der Betriebsoptimierung waren alle Beteiligten motiviert, doch verschiedene Umstände führten dazu, dass diese nicht immer konsequent und durchgängig verfolgt werden konnte. Bereits die Verzögerungen im Bauablauf führten zu Terminengpässen und dazu, dass der Einrichtung der Messtechnik nicht immer die geforderte Wichtigkeit eingeräumt wurde. Außerdem muss angemerkt werden, dass auf der Seite der externen Betreiberfirma aufgrund von geringer Besetzung, Vielfältigkeit von Aufgabenbereichen und z.T. Mangel an fachlichem Know-how die energetische Optimierung nicht optimal durchgeführt werden konnte. Erschwerend kam der komplette Betreiberwechsel während der Projektlaufzeit hinzu, der durch eine erforderliche Neuausschreibung des Facility Managements bewirkt wurde. Zum Teil wurden einmal erreichte Verbesserungen durch erneuten und unbewussten Eingriff in die Regelung von Anlagen wieder rückgängig gemacht, wie z.B. die unterschiedlichen Einstellungen der Hallen-Lüftungsanlage gezeigt haben. Es wurde offensichtlich, dass für das Erreichen eines energieeffizienten Gebäudebetriebs eine kontinuierliche Überwachung der Verbrauchsdaten und bestimmter Anlagenfunktionen unerlässlich ist.

Die angestrebten Energiekennzahlen wurden aufgrund der in diesem Bericht beschriebenen Umstände noch nicht erreicht. Es konnte gezeigt werden, dass die Gesamtenergiebilanz des Gebäudes bereits deutlich besser ausfiel, wenn die Energiebereitstellung aus dem Kraft-Wärme-Kälte-Verbund effizienter funktionieren würde. Die KfW Bankengruppe ist daher bestrebt, die Wiederinbetriebnahme der BHKW möglichst bald durchzuführen. Dies ist umso wichtiger, als der Neubau Westarkade Anfang 2010 bezogen werden soll.

Der Bauherr hat eine Fortführung des Monitorings über die Förderlaufzeit hinaus beauftragt. Das Facility Management wurde kürzlich durch zwei weitere Fachkräfte verstärkt. Die KfW Bankengruppe hat den Nutzen eines Monitorings erkannt und ein solches für den Neubau Westarkade unabhängig von einem Förderprogramm öffentlich ausgeschrieben und vergeben. Sie will für ihren Gebäudebestand und für Neubauten gleichermaßen das Erreichen von vorgegebenen Energiekennzahlen für Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchten konsequent verfolgen.

A. Anhang

A.1. Messpunkte

Uni-Nr.	Messpunkt/Messgröße	Einheit
WE01	Ausentemperatur	°C
WE02	Aussenfeuchte	%
WE03	Beleuchtungsstärke Nord	lx
WE04	Beleuchtungsstärke Süd	lx
WE05	Beleuchtungsstärke West	lx
WE06	Beleuchtungsstärke Ost	lx
WE07	Strahlungsangebot Fassade Nord	W/m ²
WE08	Strahlungsangebot Fassade Süd	W/m ²
WE09	Strahlungsangebot Fassade West	W/m ²
WE10	Strahlungsangebot Fassade Ost	W/m ²
WE11	Windgeschwindigkeit 1	m/s
WE12	Windgeschwindigkeit 2	m/s
WE13	Windrichtung	°
WE14	Niederschlag Status	ja/nein

Tabelle 39: Die Messpunkte/Messgrößen der Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes

Uni-Nr.	Messpunkt/Messgröße	Bauteil	Geschoss	Einheit
S01	Stromverbrauch Abluftventilator	B	14. OG	kWh
T01	Temperatur der Abluft	B	14. OG	°C
C01	CO ₂ -Konzentration der Abluft	B	14. OG	ppm

Tabelle 40: Die Messpunkte/Messgrößen des Abluftventilators in Bauteil B

Uni-Nr.	Messpunkt/Messgröße	Bauteil	Geschoss	Raumnr.	Einheit
T04	Raumtemperaturfühler	B	5. OG	A	°C
T05	Raumtemperaturfühler	B	5. OG	B	°C
T06	Raumtemperaturfühler	B	8. OG	C	°C
T07	Raumtemperaturfühler	B	8. OG	D	°C
T08	Raumtemperaturfühler	B	12. OG	E	°C
T09	Raumtemperaturfühler	B	12. OG	F	°C
RF01	Rel. Luftfeuchtigkeit	B	5. OG	A	%
RF02	Rel. Luftfeuchtigkeit	B	5. OG	B	%
RF03	Rel. Luftfeuchtigkeit	B	8. OG	C	%
RF04	Rel. Luftfeuchtigkeit	B	8. OG	D	%
RF05	Rel. Luftfeuchtigkeit	B	12. OG	E	%
RF06	Rel. Luftfeuchtigkeit	B	12. OG	F	%

C02	CO2-Konzentration	B	5. OG	A	ppm
C03	CO2-Konzentration	B	5. OG	B	ppm
C04	CO2-Konzentration	B	8. OG	C	ppm
C05	CO2-Konzentration	B	8. OG	D	ppm
C06	CO2-Konzentration	B	12. OG	E	ppm
C07	CO2-Konzentration	B	12. OG	F	ppm
DD01	Druckdifferenz (innen-außen) Ost	B	2. OG	W	Pa
DD02	Druckdifferenz (innen-außen) Ost	B	5. OG	A	Pa
DD03	Druckdifferenz (innen-außen) Ost	B	8. OG	C	Pa
DD04	Druckdifferenz (innen-außen) West	B	8. OG	D	Pa
DD05	Druckdifferenz (innen-außen) Ost	B	12. OG	E	Pa
DD06	Druckdifferenz (innen-außen) Ost	B	14. OG	X	Pa
z1,7,13	Stellung Lüftungsklappe	B	5. OG	A	0/1
z2,8,14	Stellung Lüftungsklappe	B	5. OG	B	0/1
z3,9,15	Stellung Lüftungsklappe	B	8. OG	C	0/1
z4,10,16	Stellung Lüftungsklappe	B	8. OG	D	0/1
z5,11,17	Stellung Lüftungsklappe	B	12. OG	E	0/1
z6,12,18	Stellung Lüftungsklappe	B	12. OG	F	0/1
P01	Präsenz	B	5. OG	A	0/1
P02	Präsenz	B	5. OG	B	0/1
P03	Präsenz	B	8. OG	C	0/1
P04	Präsenz	B	8. OG	D	0/1
P05	Präsenz	B	12. OG	E	0/1
P06	Präsenz	B	12. OG	F	0/1
SS01	Sonnenschutzstellung	B	5. OG	A	0/100
SS02	Sonnenschutzstellung	B	5. OG	B	0/100
SS03	Sonnenschutzstellung	B	8. OG	C	0/100
SS04	Sonnenschutzstellung	B	8. OG	D	0/100
SS05	Sonnenschutzstellung	B	12. OG	E	0/100
SS06	Sonnenschutzstellung	B	12. OG	F	0/100
F01,02	Fensterstellung	B	5. OG	A	0/1
F03,04	Fensterstellung	B	5. OG	B	0/1
F05	Fensterstellung	B	8. OG	C	0/1
F06,07	Fensterstellung	B	8. OG	D	0/1
F08	Fensterstellung	B	12. OG	E	0/1
F09,10	Fensterstellung	B	12. OG	F	0/1

Tabelle 41: Die Raumparameter-Messpunkte

Uni-Nr.	Messpunkt/Messgröße	Bauteil	Geschoss	Einheit
K01	Kühldecken gesamt (A-D)			kWh
K02	RLT Halle EG	A	UG	kWh
K03	RLT Catering			kWh
K04	RLT Sitzungssaal			kWh
K05	RLT Vorstand	D	UG	kWh
K06	RLT Küche	C	Dach	kWh
K07	RLT Teeküche			kWh
K08	RLT Besprechung			kWh
K09	RLT-Anlagen komplett (nur Sondernutzungen)	A	UG	kWh
K10	Klimageräte Server EDV Bauteil B	B	UG	kWh
K11	Klimageräte Server EDV Bauteil C	C	UG	kWh
K12	Kühldecken Bauteil D (nur Vorstandsbereich)	D	6.OG	kWh
K13	Kühldecken Bauteil C (nur Büros, oberhalb Sondernutzung)	C	1.OG	kWh
K14	Kühldecken Bauteil B (nur Büros, oberhalb Sondernutzung)	B	UG	kWh
K15	Kühldecken Bauteil A (nur Büros, oberhalb Sondernutzung)	A	UG	kWh
K16	Haupthaus aus Nordarkade	Nord-arkade	UG	kWh
K17	RLT aus Speiseräume Direktoren			kWh
K18	Klimaboden			kWh
K19	RLT Spülküche			kWh

Tabelle 42: Die Kälteenergiezähler

Uni-Nr.	Messpunkt/Messgröße	Bauteil	Geschoss	Einheit
S03	Haupthaus gesamt	A	UG	kWh
S04	RLT-Anlage Küche	C		kWh
S05	Küche komplett (Geräte)	C	9. OG	kWh
S06	RLT-Anlage Halle EG	A	UG	kWh
S07	RLT-Anlage Vorstand	D	UG	kWh
S08	Klimageräte Server/EDV exemplarisch	C	UG	kWh
S09	Klimageräte Server/EDV exemplarisch	C	UG	kWh
S10	Küche/Anrichte komplett (Geräte)	A	EG	kWh
S11	Küche/Warmküche komplett (Geräte)	A	EG	kWh
S12	Wandelhalle (Geräte)	A+B	EG	kWh
S15	Wandelhalle Beleuchtung	A+B	EG	kWh
S16	Beleuchtung Sitzungssaal	C	EG	kWh
S17	Lüftungsanlage Sitzungssaal Zuluft	C	UG	kWh
S18	Wandelhalle Beleuchtung	C	EG	kWh

S19	Wandelhalle Beleuchtung	D	EG	kWh
S20	Geräte Vorstandsküche	D	9.OG	kWh
S21	Speiseräume Beleuchtung	C	9.OG	kWh
S22	Abluftanlage WC 1 exemplarisch	A		kWh
S23	Abluftanlage WC 2 exemplarisch	B		kWh
S24	Durchlauferhitzer 1 exemplarisch	A	8.OG	kWh
S25	Durchlauferhitzer 2 exemplarisch	A	8.OG	kWh
S26	Durchlauferhitzer 3 exemplarisch	C	8.OG	kWh
S27	Durchlauferhitzer 4 exemplarisch	D	8.OG	kWh
S28	Klimagerät EDV auf Geschoß exemplarisch	B	6. OG	kWh
S29	Klimagerät EDV auf Geschoß exemplarisch	C	9. OG	kWh
S30	Grauwasseranlage	C	UG	kWh

Tabelle 45: Sonstige Stromzähler

Uni-Nr.	Messpunkt/Messgröße	Bauteil	Geschoss	Einheit
W01	Erzeuger gesamt - Heizzentrale	B	UG	kWh
W02	RLTs (inkl. Warmwasserbereitung) komplett	B	UG	kWh
W03	Fußbodenheizung EG Bauteil A	B	UG	kWh
W04	Statische Heizung komplett	B	UG	kWh
W05	Warmwasser Duschen	B	UG	kWh
W06	Warmwasser Küche	B	UG	kWh
W07	RLT Küche	B	UG	kWh
W08	Klimaboden Konferenz	B	UG	kWh
W09	Fußbodenheizung EG Bauteil B+C	B	UG	kWh
W10	Fußbodenheizung EG Bauteil D	B	UG	kWh
W11	BHKW gesamt - Heizzentrale	B	UG	kWh
W12	RLT Halle	A	UG	kWh
W13	RLT Vorstand	D	UG	kWh
W14	Abgang Nordarkade	B	UG	kWh

Tabelle 43: Die Wärmeenergiezähler

Uni-Nr.	Messpunkt/Messgröße	Bauteil	Geschoss	Einheit
S31	Beleuchtung Büro	A	8. OG	kWh
S32	Beleuchtung Büro	B	5. OG	kWh
S33	Beleuchtung Büro	B	8. OG	kWh
S34	Beleuchtung Büro	B	12. OG	kWh
S35	Beleuchtung Büro	C	8. OG	kWh
S36	Beleuchtung Büro	D	8. OG	kWh
S37	Beleuchtung Flur	A	8. OG	kWh
S38	Beleuchtung Flur	B	5. OG	kWh
S39	Beleuchtung Flur	B	8. OG	kWh
S40	Beleuchtung Flur	B	12. OG	kWh
S41	Beleuchtung Flur	C	8. OG	kWh
S42	Beleuchtung Flur	D	8. OG	kWh
S43	Arbeitsmittel	A	8. OG	kWh
S44	Arbeitsmittel	B	5. OG	kWh
S45	Arbeitsmittel	B	8. OG	kWh
S46	Arbeitsmittel	B	12. OG	kWh
S47	Arbeitsmittel	C	8. OG	kWh
S48	Arbeitsmittel	D	8. OG	kWh
S50	Lüftungsanlage Sitzungssaal Abluft	C	UG	kWh

Tabelle 44: Die Stromverbrauchsmessungen auf den Etagen

A.2. Planungswerte Lüftungsanlagen

	Typ Zu- Ab- luft	Betriebs- zeit [h/a]	Vol.- Strom [m ³ /h]	(4) Faktor 1	(5) Faktor 2	(6) Kenn- wert Wh/m ³	(7) El. Energiebe- darf kWh/a
Bauteil A							
Umkleide/ WC/ Duschen	Zu/Ab	2.750	2.900	1,0	-	0,60	6.221
Tresorraum	Zu/Ab	1.000	1.000	1,0	-	0,60	780
WCs/ Nassräume	Ab	2.750	4.200	1,0	-	0,25	3.754
Halle/Aus- stellungs- bereich/ Foyer ++	Zu/Ab	600	22.100	1,0	0,90	-	7.417
Spülküche	Zu/Ab	1.000	1.700	1,0	-	0,60	1.326
Innen- liegende Räume	Ab	2.750	5.000	1,0	-	0,25	4.469
Bürräume Regelge- schoss ++	Ab	4.250	24.200	0,9	0,75	-	7.316
Bauteil B							
Bürräume Regel- geschoss ++	Ab	4.250	31.900	0,9	0,75	-	15.780
WCs/ Nassräume	Ab	2.750	600	1,0	-	0,25	536
Technik- zentralen	Zu/Ab	2.000	3.200	1,0	-	0,60	4.992
Aufzug	Ab	2.750	9.600	1,0	-	0,25	8.580
Traforäume		2.000	10.000	1,0	-	0,30	7.800
Torluft- schleier	Zu/Ab	1.000	3.600	1,0	-	0,30	1.404

Bauteil C							
Bürräume Regel- geschoss ++	Ab	4.250	18.700	0,9	0,75	-	3.726
Lüftung/ Entrau- chung innenl. Räume UG	Zu/Ab	2.750	2.500	1,0	-	0,6	5.363
Innen- liegende Räume Kernbe- reich	Ab	2.750	3.200	1,0	-	0,25	2.860
Innen- liegende WCs/ Nassbe- reich	Ab	2.750	2.500	1,0	-	0,25	2.234
Vorstands- küchenbe- reich	Zu/Ab	2.000	10.600	1,0	-	0,60	16.536
Teeküchen	Zu	2.750	1.700	1,0	-	0,35	2.127
Bauteil D							
Vorstands- bereich und Konf.- räume EG ++	Zu/Ab	2.750	24.700	0,8	0,70	-	9.912
Bürräume Regel- geschoss ++	Ab	4.250	13.500	0,9	0,75	-	3.771
Innen- liegende WCs/ Nassräume	Ab	2.750	2.100	1,0	-	0,25	1.877
Aufzug	Ab	2.750	1.000	1,0	-	0,25	894

Tabelle 46: Planungswerte der Lüftungsanlagen, die mit ++ markierten sind bekannte Anlagen dort genauere Berechnung mit Druckverlusten und Wirkungsgraden, der Volumenstrom ist der Auslegungsvolumenstrom, Faktor 1 = Faktor auf Volllaststunden zur Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit, Faktor 2 = Faktor für tatsächlich geförderte Luftmenge, bezogen auf Auslegungswert, unbekannte Anlagen mit Ansatz 0,6 bzw. 0,25 Wh/m³ und Sicherheitszuschlag 30 % gerechnet (Quelle: ip5)

A.3.**Abbildungsverzeichnis**

1.	Kennzahlen für die Jahre 2007 und 2008	10
2.	Vergleich der Primärenergiebilanzen bei unterschiedlichen Primärenergiefaktoren	11
3.	Struktur des EnOB-Forschungsprogramms	13
4.	Grundriss des Regelgeschosses	15
5.	Längsschnitt durch das Gebäude	16
6.	Fassade des Bestandgebäudes	17
7.	Kältarbeit im Bestand	18
8.	Organigramm der Projektbeteiligten	19
9.	Das Sonnenschutzelement	23
10.	Schema Wärmeverteilung	26
11.	Schema zentrale Abluft im Grundriss	27
12.	Schema zentrale Abluft im Schnitt	28
13.	Das Überströmelement im Detail	29
14.	RLT-Anlage Vorstandsbereich	30
15.	Komfortmessungen 2001	32
16.	Schema Kälteverteilung	34
17.	Adiabate Kühlung	35
18.	Die bestehende Absorptionskältemaschine	37
19.	Die bestehende Kompressionskältemaschine	38
20.	Fassadenvariante 1	39
21.	Fassadenvariante 2	40
22.	Adaptive Kunstlichtregelung	41
23.	Grauwasseraufbereitungsanlage	42
24.	Schema Vakuumtoilette	43
25.	Exemplarisch erfasste Büros und Etagen	47
26.	Datenpunkte im Büro	48
27.	Sensoren im Büro	49
28.	Schema Datenübertragung	51
29.	Nicht korrekt eingebauter Kompaktwärmehähler	51
30.	Raumklimaanalysator	52
31.	Mobile Messgeräte für Schall, Temperaturen, Beleuchtungsstärke, Stromverbrauch	53
32.	Strommessgerät für die Steckdose	54
33.	Primärenergie Planung ip5	56
34.	Nachführung der Energiebilanz im Planungsverlauf	57
35.	Berechnung Energiebedarf nach DIN V 18599	60
36.	Energieausweis nach DIN V 18599	61
37.	Zoneneinteilung nach DIN V 18599 im Regelgeschoss	61
38.	Zoneneinteilung nach DIN V 18599 im Erdgeschoss	62
39.	Zoneneinteilung nach DIN V 18599 im 9. Obergeschoss	62
40.	Legende der Zoneneinteilung nach DIN V 18599	62
41.	Kennzahlen nach Energieausweis DIN V 18599	63

42.	Kennzahlen für die Jahre 2007 und 2008	64
43.	Vergleich der Primärenergiebilanzen bei unterschiedlichen Primärenergiefaktoren	65
44.	Vergleich Verbrauch mit Bedarfswerten	65
45.	Monatswärmeverbräuche	66
46.	Wärmeverteilerebene 1	67
47.	Sankey-Diagramm Heizen 2007	68
48.	Sankey-Diagramm Heizen 2008	68
49.	Spezifische Wärmeleistung	69
50.	Jahresvergleich Zähler Hauptebene	69
51.	Jahresvergleich Zähler Unterebene	70
52.	Infrarotbild Fassade außen	71
53.	Infrarotbild Fassade außen Erdgeschoß	72
54.	Infrarotbild Fenster innen	73
55.	Infrarotbild Fassade außen	73
56.	Anteile der Wärmeerzeuger	74
57.	Jahresanteil der BHKW	74
58.	Nutzungsgrad der Brennwertkessel	75
59.	Stromerzeugung BHKW	76
60.	Nutzungsgrad BHKW	77
61.	Summenhäufigkeit Leistung BHKW	77
62.	Statische Heizung	78
63.	Ermittlung Heizgrenze Statische Heizung	79
64.	Statische Heizung Stundenwerte	79
65.	Exemplarische Wochenprofile	80
66.	Fußbodenheizung Bauteil A	81
67.	Fußbodenheizung Bauteil B+C	82
68.	Fußbodenheizung Bauteil D	83
69.	Klimaboden Konferenzsaal Tageswerte	83
70.	Wärmeverteilerebene 2	84
71.	Wärme Zuluft gesamt	85
72.	Wärme RLT Küche	85
73.	Wärme RLT Halle	86
74.	Wärme Klimaanlage Vorstand	87
75.	Wärme Warmwasserbereitung zentral	88
76.	Entwicklung des Stromverbrauchs der gemessenen RLT-Anlagen	91
77.	Dauerlinie der Abluftanlage für Regelbüros	92
78.	Monatsstromverbräuche der Abluftanlage für Regelbüros	93
79.	Stromverbrauch des Abluftventilators über Außentemperatur	94
80.	Analyse der Abluftregelung in 6 Büros	94
81.	Lüftungsdauer Taglüftung	95
82.	Lüftungsdauer Nachtlüftung	95
83.	Messungen von Lufttemperaturen am Nachströmelement	96
84.	Häufigkeiten der CO ₂ -Konzentration	97
85.	Häufigkeiten der relativen Luftfeuchte	97
86.	Mittlere Stundenleistungen Zuluftventilator RLT Küche	99

87.	Monatsstromverbrauch RLT Küche	100
88.	Monatlicher Stromverbrauch RLT Halle	100
89.	Beispielhafte Regelung der RLT Halle	101
90.	onatlicher Stromverbrauch Zu-/Abluftanlage Vorstand	101
91.	Regelung RLT Vorstand	102
92.	Monatlicher Stromverbrauch RLT Sitzungssaal	103
93.	Monatlicher Stromverbrauch Abluftanlagen WCs	104
94.	Exemplarische Woche Abluft WC 1	105
95.	Exemplarische Woche Abluft WC 2	105
96.	Gemittelte Tagesprofile der Sonnenschutzstellung	107
97.	Tägliche Stundenzahl eines aktiven Sonnenschutzes	107
98.	Jährliche Kälteverbräuche	108
99.	Gesamtkälteverbrauch über Außentemperatur	109
100.	Monatliche Gesamtkälteverbrauchswerte	109
101.	Sankey Diagramme Gesamtkälte 2007 und 2008	110
102.	Monatliche Kältemengen Kühldecken	111
103.	Klimaboden Heizen und Kühlen	112
104.	Kühlen und Heizen des Klimabodens im Winter	113
105.	Monatliche Kältemengen Lüftungen	113
106.	Kälteverbrauch Zuluft Vorstand 2009	114
107.	Kälteleistung RLT Vorstand	114
108.	Kälteleistung RLT Halle	115
109.	Mittlere Kühlleistung der RLT Sitzungssaal pro Tag	116
110.	Kälteverbrauch RLT Catering	116
111.	Kälteverbrauch RLT Küche	117
112.	Kälteverbrauch RLT Besprechung	118
113.	Tageslichtquotienten in Raum V	121
114.	Fassade von innen in Raum V	121
115.	Tageslichtquotienten in Raum D	122
116.	Fassade von innen in Raum D	122
117.	Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Arbeitsoberfläche	124
118.	Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Arbeitsoberfläche	125
119.	Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Arbeitsoberfläche	125
120.	Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Arbeitsoberfläche	126
121.	Überprüfung der Kunstlichtregelung	126
122.	Beleuchtungsstromverbrauch Büro	127
123.	Beleuchtungsstromverbrauch Büro	128
124.	Jahreswerte Beleuchtung Büroetagen	128
125.	Flurbeleuchtung 8. OG Bauteil A	129
126.	Flurbeleuchtung 5. OG Bauteil B	130
127.	Flurbeleuchtung 8. OG Bauteil D	130
128.	Jahreswerte Beleuchtung Flure	131
129.	Treppenhausbelleuchtung Bauteil D	132
130.	Beleuchtung Halle EG	134
131.	Jahreswerte Beleuchtung Halle und Speiseräume	134

132. Monatsmittlere Leistungsaufnahme der Beleuchtung des Sitzungssaales	135
133. Abhängigkeit Gesamtstrom von Außentemperatur	136
134. Typische Wochenprofile des Gesamtstromverbrauchs	137
135. Lastgang des Gesamtstroms an Feiertagen	138
136. Aufteilung Gesamtstromverbrauch im Jahr 2007 und 2008	142
137. Aufteilung Stromverbrauch Sonstige Geräte 2007	142
138. Monatliche Wasserverbräuche	143
139. Komfortmessungen Besprechungsraum	144
140. Raumtemperatur bei Komfortmessung im Winter	145
141. Mittelwerte der Raumklimamessungen am 12.1.2007	146
142. Temperaturen im Raum 305 vom 31.7.-7.8.07	147
143. Komfortindex PMV in Anhängigkeit von der Außentemperatur	148
144. Überschreitungsstunden nach ISO 7730 Klasse B im Jahr 2007	149
145. Überschreitungsstunden nach DIN 1946-2 im Jahr 2007	149
146. Erzielte Komfortbereiche nach DIN EN 15251 2007 und 2008	149
147. Raumtemperaturen 2007	150
148. Temperatur der zentralen Abluft	150
149. Schallpegelmessung Vakuumtoiletten	152
150. Tagesprofil der Anwesenheit im Jahresmittel	153
151. Dauerlinien Nutzerpräsenz	154
152. Nutzung der Ausfahrfunktion des Sonnenschutzes	155
153. Wochenprofil von Fensteröffnungen	155
154. Fensteröffnung und CO ₂ -Konzentration	156
155. Fensteröffnung und Uhrzeit	156
156. Fensteröffnung und Raumtemperatur	157
157. Geöffnetes Fenster und Außentemperatur	157
158. Monatliche Betriebszeiten der Büro-Beleuchtung	158
159. Tägliche Betriebszeiten der Büro-Beleuchtung	159
160. SollwertEinstellung des Kunstlichts durch den Nutzer im Jahr 2008	159
161. SollwertEinstellung des Kunstlichts durch den Nutzer	160
162. Häufigkeitsverteilung der SollwertEinstellung Kunstlicht	160
163. Sollheiztemperaturen im Raum B	161
164. Sollheiztemperaturen im Raum D	162
165. Sollkühltemperaturen im Raum B	163
166. Sollkühltemperaturen im Raum D	163
167. Sollheizwerte bei Anwesenheit	164
168. Sollkühlwerte bei Anwesenheit	164
169. Kontrollwerkzeug für tägliche Verbrauchswerte	166
170. Übereinstimmung der Formel mit Messergebnis	168
171. Schema MoniSoft	169
172. Tool zur Darstellung der Datenqualität	170
173. Darstellung von Temperaturbereichen in MoniSoft	170
174. Täglich fortlaufende Jahresenergiebilanz	171
175. Beispielanwendung Laientool	172
176. BINE Info Deckblatt	173

A.4.

Tabellenverzeichnis

1.	Projektphasen	14
2.	U-Werte und Schichtaufbauten der Bauteile vor Sanierung	16
3.	Kälteerzeuger	17
4.	Fachfirmen	20
5.	U-Werte der Bauteile nach der Sanierung	22
6.	Anlagenkomponenten	24
7.	Fußbodenheizung	24
8.	Die zentralen Abluftanlagen pro Bauteil	27
9.	Lüftungsanlagen im Gebäude	30
10.	Anlagenkomponenten Kühlen	33
11.	Leistungszahl der Kälteerzeuger	36
12.	Die Wärmeerzeuger im Kraft-Wärme-Kälte-Verbund vor der Sanierung	38
13.	Messgenauigkeit	49
14.	Kennzahlen gemäß EnEV-Nachweis	55
15.	U-Werte der Bauteile nach EnEV 2002	56
16.	Primärenergiebedarf vom März 2003	59
17.	Primärenergiebedarf vom August 2006	59
18.	PE-Kennzahlen	59
19.	Gemessene Jahreswärmeverbräuche	70
20.	Ermittelte jährliche Vollbetriebsstunden der Wärmeumwälzpumpen	89
21.	Gemessene Hilfsenergie Lüftung	90
22.	Stromverbrauch EDV-Klimageräte	106
23.	Gemessene Jahreswärmeverbräuche	119
24.	Ermittelte jährliche Vollbetriebsstunden der Kälteumwälzpumpen	120
25.	Gemessene Jahreswärmeverbräuche	123
26.	WC-Beleuchtung mit und ohne Präsenzmelder	133
27.	Jahresstromverbrauch sonstige Haustechnik	139
28.	Jahresstromverbrauch nutzerspezifischer Verbraucher	139
29.	Gemessene Jahreswärmeverbräuche	140
30.	Stromverbrauch Kopierer	140
31.	Stromverbrauch Drucker	141
32.	Stromverbrauch sonstige Geräte	141
33.	Messzeiträume der Sommerkomfortmessungen	146
34.	Nachhallzeiten in Büroräumen	151
35.	Nachhallzeiten in der Ostarkade	151
36.	Parameter für lineare Regressionsmodelle	167
37.	Publikationen	174
38.	Vorträge	175
39.	Messpunkte Wetterstation	178
40.	Messpunkte Abluftventilator Bauteil B	178
41.	Die Raumparameter-Messpunkte	179

42.	Die Kälteenergiezähler	180
45.	Sonstige Stromzähler	181
43.	Die Wärmeenergiezähler	182
44.	Die Stromverbrauchsmessungen auf den Etagen	182
46.	Planungswerte Lüftungsanlagen	184

A.5.**Literatur**

- [1] Das Bundesamt für Bauordnung und Raumwesen veröffentlicht auf seiner Website aktuelle jährliche Klimafaktoren zur Bereinigung von Verbrauchswerten in Energieausweisen
- [2] Fanger, P.O. (1972): Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering. USA: McGraw-Hill
- [3] DIN EN ISO 7730:2006-05, Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit
- [4] Leitfaden Elektrische Energie, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2001
- [5] BMWi gefördertes Forschungsprojekt "ModBen", www.modben.de
- [6] Internetseite des Projektes MEREGIO <http://www.im.uni-karlsruhe.de/Default.aspx?PageId=470>
- [7] Abschlussbericht zum SolarBau-Projekt ZUB Kassel, Förderkennzeichen 0335006Z, Gerd Hauser, Jan Kaiser, Martin Rösler, Dietrich Schmidt
- [8] Kaiser, J. ; Maas, A. ; Oppermann, J. : Energetische Analyse und Bewertung von SynergieHäusern : Abschlußbericht. Fraunhofer IRB Verlag, 2000.
- [9] DIN 5032-7, Ausgabe: 1985-12, Lichtmessung; Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräten
- [10] DIN 5034: Tageslicht in Innenräumen, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [11] DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Beuth-Verlag, Berlin, 2005
- [12] Abschlussbericht „DB Hamm“ Niedrigenergie-Verwaltungsgebäude in Hamm (Westfalen) für die Deutsche Bahn AG - Geschäftsbereich Netz, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Gropp, Dipl.-Ing. Harry Schindler, Dipl.-Ing. Mathias Wambsgaß, Dr.-Ing. Martina Klingele, Juni 2003
- [13] Abschlussbericht „Neubau Ostarkade der KfW Bankengruppe, Frankfurt a.M.“ Monitoring und Betriebsoptimierung im Rahmen von SolarBau, Teilkonzept 3, Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Gropp, Dipl.-Ing. Michael Kleber, Juni 2006
- [14] Local Operating Network, 1990 von der Firma Firma Echolon Corporation entwickelt, heute Teil der Norm ISO/IEC 14908-1 bis 4
- [15] www.opcfoundation.org
- [16] EnOB - Forschung für energieoptimiertes Bauen, www.enob.info
- [17] Energieeinsparverordnung - Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, 2009

- [18] DIN 1946: Raumluftechnik, Teil 2 Gesundheitstechnische Anforderungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Januar 1994, mittlerweile ersetzt durch die DIN EN 13779
- [19] TRNSYS - Transient System Simulation Program, www.trnsys.com
- [20] Radiance - Raytracing Lichtsimulationssoftware, <http://radsite.lbl.gov/radiance/>
- [21] Monitoring Low-Energy Buildings by a self-developed Software-Tool, Tagungsband zur 4. Internationalen Bauphysik-Konferenz in Istanbul, Türkei, Dipl.-Ing. Michael Kleber, Prof. Andreas Wagner
- [22] Über den Luftwechsel in Wohngebäuden, Pettenkofer von M (1858), Literarisch artistische Anstalt der Cotta'schen Buchhandlungen, München
- [23] Dezentrale Lüftung großer Nichtwohngebäude - Mikroklimatische Einflüsse der Fassadengestaltung und -konstruktion auf die thermodynamischen Zustandsgrößen der angesaugten Luft, 2005-2009
- [24] Landgericht Bielefeld, Urteil des Landgerichts Bielefeld, 16. April 2003

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags unter dem Förderkennzeichen 0335007S gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Auftraggeber: BMWi, Forschungsvorhaben 0335007S

Auftragnehmer: Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau
Karlsruher Institut für Technologie

Fachgebietsleitung: Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner

Autoren: Dipl.-Ing. Michael Kleber
Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner (Koautor)

Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta)
Karlsruher Institut für Technologie, Campus Süd
Englerstraße 7
76131 Karlsruhe

Telefon: +49 721 608 2178
Telefax: +49 721 608 6092
Internet: www.fbta.uni-karlsruhe.de