

# **Energieoptimiertes Bauen: Neubau FH Erfurt, Grüner Campus - Vorbereitung und Durchführung des Intensivmonitorings für den Neubau der FH Erfurt Abschlussbericht I. Kurzdarstellung**

M.Eng. Klaus Weber, Prof. Dr.-Ing. Michael Kappert

Energieoptimiertes Bauen: Neubau FH Erfurt, Grüner Campus - Vorbereitung und Durchführung des Intensivmonitorings für den Neubau der - FH Erfurt  
Abschlussbericht

Antragsteller: FH Erfurt

Ausführende Stelle: FH Erfurt - Fakultät Gebäudetechnik und Informatik –  
Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik - IBIT Institut für  
bauwerksintegrierte Technologien der FH Erfurt  
Altonaer Straße 25, 99085 Erfurt

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Michael Kappert

Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie  
FKZ 03274310

Stand: 31.03.2016 (Schlussbericht)

Das Vorhaben wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegen bei den Autoren.

**Gefördert durch:**



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>4</b>
1.1 Gebäude.....	4
1.2 Projekt .....	4
1.3 Bezug zum Förderkonzept.....	5
1.4 Eckdaten.....	5
<b>2 Voraussetzungen</b>	<b>6</b>
<b>3 Planung und Ablauf des Vorhabens,</b>	<b>6</b>
<b>4 Wissenschaftlichem und technischem Stand</b>	<b>7</b>
4.1 Einleitung.....	7
4.2 Wärme- und Kälteschutz .....	7
4.3 Lüftungskonzept und Wärmerückgewinnung .....	7
4.4 Wärme- und Kälteversorgung .....	8
4.5 Verschattung und Beleuchtung.....	9
4.6 Energiespeicherung und Energieerzeugung.....	9
4.7 Gebäudeautomation und Einzelraumregelung .....	10
4.8 Energetische Gebäudekennwerte.....	10
<b>5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen</b>	<b>13</b>

# 1 Aufgabenstellung

## 1.1 Gebäude

Die Fachhochschule Erfurt erweiterte ihren traditionsreichen „Grünen Campus“ um ein modernes Lehr- und Laborgebäude. Damit wird auch architektonisch die Fusion der Fachrichtungen Gartenbau und Landschaftsarchitektur (entstanden aus der Ingenieurschule für Gartenbau "Christian Reichart" an diesem Standort) mit den Fachrichtungen Forstwirtschaft und Ökosystemmanagement (aus der Fachhochschule für Forstwirtschaft Schwarzburg) vollzogen. Die Stadt Erfurt als „Wiege des modernen Gartenbaus“ erhält mit dem Gebäude eine Betätigungsstätte für die Lehre und Forschung mit dem Ziel der zukunftsorientierten Fortführung dieser Traditionen.

Auch das Gebäude selbst will sich an diesen Maßstäben messen. Sowohl durch Einbindung der modernen Ästhetik in die bestehenden Gärten und Gebäude, als auch durch Verwirklichung des Nachhaltigkeitsziels (ein Begriff, der aus der Forstwirtschaft heraus für die gesamte Gesellschaft Bedeutung erlangte).

Das Konzept des Gebäudes beinhaltet neben dem äußerst geringen Nutzenergiebedarf vor allem auch die konsequente Reduktion des Primärenergiebedarfs durch den Einsatz von Fernwärme in Kombination mit einer Absorptionswärmepumpe und mit einem Brunnen und einer Zisterne als Wärmequelle und –senke. Der Einsatz innovativer Technik soll den Demonstrationscharakter des Gebäudes im Sinne der Nachhaltigkeit realisieren. Der Grüne Campus der FH Erfurt soll sich langfristig, nicht zuletzt auch durch verschiedene Forschungsprojekte, als CO<sub>2</sub>-neutraler Campus etablieren. Das neue Gebäude ist dazu ein erster wesentlicher Schritt.

## 1.2 Projekt

Gegenstand des Projektes ist die wissenschaftliche Begleitung des Demonstrationsvorhabens Neubau FH Erfurt, Leipziger Straße. Dazu gehören neben den zusätzlichen Planungsleistungen (Integrale Planung) vor allem die ergänzenden Berechnungen und die Optimierung des Gebäudes während der Planung.

Ebenso wird die Bauausführungsüberwachung von wissenschaftlicher Seite durchgeführt und schließlich sollten zusammen mit den Planern Regelungskonzepte für die neuartigen Techniken erstellt und bei der Inbetriebnahme implementiert werden.

Zur Vorbereitung des anschließenden Monitorings sollte entsprechend des Monitoring-Konzeptes die Messtechnik implementiert werden.

Im Rahmen der Phase II sollte ein umfassendes Monitoring durchgeführt werden. Dazu sollten alle wesentlichen Stoff- und Energieströme bilanziert werden. Die damit gebildeten energetischen Kennzahlen werden mit den Planungswerten verglichen. Untersuchungen zum Raumklima ergänzen diese Messungen. Mit den gewonnenen Betriebsdaten werden die Simulationsmodelle kalibriert und validiert.



### 1.3 Bezug zum Förderkonzept

Der innovative Charakter des Demonstrationsvorhabens „Neubau der FH Erfurt“ zeigt sich neben den geringen Nutzenergieanforderungen vor allem in der Bereitstellung der Energie: die Beheizung erfolgt mittels fernwärmegetriebener Absorptionswärmepumpe, die Kühlung über eine Brunnenanlage und eine Zisterne, so dass insgesamt eine sehr hohe Energieproduktivität, also deutlich verminderter Kohlendioxidausstoß gegenüber konventionellen Lösungen erreicht wird.

### 1.4 Eckdaten

#### Technologien

- Vakuumdämmung an Wärmebrücken
- fernwärmegetriebene Absorptionswärmepumpe
- Nutzung Regenwasserzisterne als Wärmequelle und -senke
- Brunnenwasser zur Spitzlastdeckung der Kühlung RLT
- mechanische Lüftung mit WRG
- großflächige Deckenelemente zur Kühlung
- Flächenheizung in allen Räumen
- Einzelraumregelung

#### Gebäudekenndaten

$H_T$	0,40 W/m <sup>2</sup> K
$A/V_e$	0,43
$NF_{DIN\ 277}$	1.200 m <sup>2</sup>
NGF	1.805 m <sup>2</sup>
BGF	2.240 m <sup>2</sup>
BRI	8.890 m <sup>3</sup>
PE Bedarf	<50 kWh/m <sup>2</sup> a

## **2 Voraussetzungen**

In Vorbereitung des Bauvorhabens mit dem Anspruch der Fakultät Landschaftsarchitektur – Gartenbau – Forst den Standort CO<sub>2</sub>-frei zu betreiben stimmte der Freistaat Thüringen zu, ein energetisch beispielhaftes Gebäude zu bauen.

Nach dieser Zusage begannen die Mitarbeiter des IBIT der FH Erfurt mit ersten Berechnungen und der Entwicklung des Energiekonzeptes. In mehreren Abstimmungsrunden mit den beteiligten Partnern und insbesondere mit dem Landesamt für Bau und Verkehr des Freistaates Thüringen wurde die Baumaßnahme vorbereitet und durchgeführt.

## **3 Planung und Ablauf des Vorhabens,**

Das Vorhaben gliederte sich in zwei Phasen. In der ersten Phase erfolgte die Planung und der Bau des Gebäudes. Durch die Mitarbeiter des IBIT wurden Berechnungen und Simulationen durchgeführt, sowie das Messkonzept für die zweite Phase entwickelt.

Durch die Mitarbeiter wurde die Planung begleitet und insbesondere auf die Einhaltung des Energiekonzeptes geachtet, sowie mit dem Gebäudeautomationsplaner das Steuerungs- und Regelungskonzept festgeschrieben.

Während der Bauphase wurden durch die Mitarbeiter des IBIT auf die Einhaltung der Planungsvorgaben geachtet.

Die zusätzlich erforderliche Messtechnik wurde geplant und im Rahmen der Gebäudeautomationsinstallation implementiert.

In der zweiten Phase erfolgte das Intensivmonitoring. Nach Auffinden von Mängeln in der Installation erfolgte eine Optimierung des Energieverbrauches durch Aufdecken und Beseitigen von Mängeln, fehlerhafter Programmierung im Gebäudeautomationssystem, Bauteilausfällen. Sowie einer Optimierung der Parameter der Gebäudeautomationsoftware.

## 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

### 4.1 Einleitung

Aufgrund umfassender Vorarbeiten wird das folgende Konzept als derzeitiger Stand der Technik (2010) für das Projekt angesehen und als besonders innovative und energieeffiziente Lösung angesehen. Dieses Konzept wurde vom Landesamt für Bauwesen bestätigt und sollte vorbehaltlich der weiteren Detailplanung auch umgesetzt werden.

### 4.2 Wärme- und Kälteschutz

Um einen geringen Heizenergiebedarf zu erreichen, sollten folgende U-Werte beim Gebäude für opake Wände umgesetzt werden:

- Außenwände:  $0,166 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Kellerwand:  $0,166 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Kellerboden:  $0,132 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Fußboden Durchgang:  $0,166 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Dach:  $0,133 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Grundlage für die Vorgabe der U-Werte sind die Ergebnisse einer Optimierung mittels dynamischer Gebäudesimulation der Wärmeleitwiderstände der äußeren Bauteile. Zielwert ist ein möglichst geringer Nutzheizenergiebedarf des Gebäudes.

Für alle transparenten Flächen, also auch die mit nördlicher Ausrichtung, wurde ein g-Wert von 0,58 und ein flexibler außenliegender Sonnenschutz mit einem resultierenden gesamt g-Wert von 0,145 vorgesehen. Für die U-Werte soll gelten:

- Fenster:  $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Türen: 1,5 (bzw. 1,0 falls möglich)  $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

Da die verstärkte Dämmung in einigen Bereichen architektonisch negative Auswirkungen haben würde, sollten vor allem im Bereich der Dachterrasse und an den Fenstern lokal VIPs eingesetzt (vgl. z.B. Stölzel, 2007) werden. Als wesentliche Herausforderung wird hier die Kombination von kostengünstiger konventioneller Dämmung mit VIPs im Bereich von Schwachstellen gesehen.

### 4.3 Lüftungskonzept und Wärmerückgewinnung

Der Einsatz von Wärmerückgewinnung in Zu- und Abluftanlagen entspricht dem Stand der Technik. Für die zentrale raumluftechnische Anlage wurde daher eine Wärmerückgewinnung mit einer Rückwärmezahl von 0,7 vorgesehen.

Das Lüftungskonzept zeichnet sich durch ein an den tatsächlichen Lüftungsbedarf angepasstes Gesamtkonzept aus. Es wird davon ausgegangen, dass die Präsenzzeiten der Professoren in den Arbeits- und Vorbereitungsräumen, im Vergleich zu einer üblichen Büronutzung und der Nutzung der übrigen Räume im Gebäude, gering sind.

Daher werden diese nicht mechanisch belüftet, was verringerte Investitionskosten, einen geringeren Energiebedarf sowie höhere Auslastung und damit verbunden besserer Regelbarkeit nach sich zieht.

Diese These sollte durch vergleichende Simulationsrechnungen bewiesen werden. Der Nachweis der tatsächlichen Nutzungszeit sowie die Unbedenklichkeit hinsichtlich der Lufthygiene werden im Rahmen des Monitoring belegt werden.

Eigene Arbeiten zeigen, dass zwar der Energiebedarf durch den Verzicht auf mechanische Lüftung in Seminarräumen deutlich gesenkt werden kann, leider geschieht dies allerdings auf Kosten der Hygiene. Daher wurde hier in allen studentisch genutzten Räumen eine mechanische Lüftung vorgesehen, nicht jedoch in den Büros.

Die Einhaltung der Raumluftqualität sollte durch CO<sub>2</sub>-/VOC-Sensoren in den Abluftkanälen der Raumluftanlage sichergestellt werden. Über die Erfassung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Abluft kann der Zuluftvolumenstrom und der Außenluftanteil an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden. Gegenüber einem durchgehenden Betrieb der Lüftungsanlage, ohne Anpassung an den Bedarf, sind Einsparung um bis zu 50% möglich (vgl. Fisch et al. (2008)<sup>1</sup>, Hecker (2009)<sup>2</sup> Bei geeigneten Außentemperaturen wird die Lüftungsanlage zur Nachtauskühlung genutzt.

#### 4.4 Wärme- und Kälteversorgung

Die oben erwähnten Maßnahmen führen bereits zu einem deutlich verminderten Heizenergiebedarf von etwa **21 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Mittels der Versorgungstechnik kann der Primärenergieaufwand aber deutlich reduziert werden. Da an die Liegenschaft Fernwärme anliegt, soll diese genutzt werden: Es soll eine mit Fernwärme angetriebene Absorptionswärmepumpe (auf Wasser/Lithiumbromid-Basis) zum Einsatz kommen, die zusätzliche Wärme aus der Umgebung gewinnt. Dabei stehen zwei alternative Möglichkeiten als Wärmequellen zur Verfügung: zum einen die vorhandenen Bewässerungszisternen für den Gartenbau (maximal 2000 m<sup>3</sup>, garantiert 250 m<sup>3</sup>), zum anderen ein zusätzlicher Brunnen. Dieser Brunnen und die Zisterne dienen bei Kühlbedarf auch direkt der Kühlung.

Ähnliche Konzepte zur Absorptionswärmepumpennutzung finden sich unter anderem auch im Enbau-Projekt Museum Ritter (vgl. Knapp, 2008) wieder. Allerdings wird hier die Wärmepumpe von Holzpellets, Solarthermie und Energiepfählen gespeist und erzeugt Kälte und Wärme. Die ursprünglich schlechten Ergebnisse und Erfahrungen dieses Projektes lassen für den hier betrachteten Neubau eine deutliche einfachere Anlagenkonfiguration als sinnvoll erachten: Es wird auf die Holzpelletfeuerung, die Solarthermie und die Kälteerzeugung verzichtet. Stattdessen steht als Hochtemperatur-Wärme nur die KWK-Fernwärme der Stadtwerke Erfurt zur Verfügung. Der zertifizierte Primärenergiefaktor beträgt 0,483. Für die Kühlung des Gebäudes wird gänzlich auf aktive Kälteerzeugung verzichtet. Dafür wird die Regenwasserzisterne und der Brunnen

---

<sup>1</sup> Fisch et al.; EVA, Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude, 2008 BMWI: 0327346A

<sup>2</sup> Hecker in: Energieeffiziente Gebäudeklimatisierung Raumluft in A++ Qualität, 2009

direkt als Wärmesenke genutzt. Die Zisternennutzung entspricht in etwa dem Gebrauchsmuster von Vögerl (2004). Die optimale Aufteilung der beiden Wärmesenken sollte im Zuge der weiteren Planung festgelegt werden.

Wegen der über die Wärmepumpe erzeugten und von den Kältequellen erreichten geringen wirksamen Über- und Untertemperaturen müssen die Wärmeübertragungsflächen in entsprechender Größe gestaltet werden. Es wird hier aber nicht eine schwerfällig regelbare Betonkernaktivierung eingesetzt, sondern spezielle flächige Heiz- und Kühldecken in allen Bereichen des Gebäudes; damit kann zwar auch auf die klassischen Heizkörper verzichtet werden, zugleich wird aber eine entsprechend der Nutzung benötigte Regelungsgeschwindigkeit sichergestellt.

Mit Hilfe der Absorptionswärmepumpe wird eine weitere Reduktion des Primärenergieaufwandes für die Heizung um etwa 30% möglich. Der dafür nötige hohe Deckungsgrad der Wärmepumpe am Heizenergiebedarf wird durch einen Speicher gewährleistet. Um die Unwägbarkeiten dieser neuen Technik sicher beherrschen zu können, wird eine direkte Beheizung mit Fernwärme, also ein Bypass der Absorptionswärmepumpe, vorgesehen (fail safe).

Um eine bedarfsgerechte Bereitstellung der Energie zu gewährleisten, ist eine Einzelraumregelung die Voraussetzung. Die dazugehörige Gebäudeleittechnik, in der die Nutzungszeiten und Nutzungsanforderungen vom Nutzer vorgegeben werden können, ist zu integrieren.

Ferner ist die Einzelraumregelung für ein effektives Monitoring und die weitere wissenschaftliche Verwendung und Evaluation des Konzeptes erforderlich, weil nur so Nutzereinflüsse dokumentiert und ihre Auswirkungen ermittelt werden können.

## **4.5 Verschattung und Beleuchtung**

Für die Verschattung der Räume sollten an allen transparenten Außenflächen außenliegende, geteilte Jalousien mit bedarfsabhängiger Tageslichtsteuerung zum Einsatz kommen.

Neben der Wärme-, Kälte- und Luftversorgung ist die Beleuchtung ein weiterer Bestandteil des Gebäudeenergiekonzeptes. Hier gilt, dass Kunstlicht nur dann bereitgestellt werden sollte, wenn es einer Sehaufgabe oder einem sonstigen (beispielsweise ästhetischen) Zweck dient. Dies geschieht in einer Kombination aus Tageslichtsteuerung und Nutzerbedarf. Für ausgewählte Gebäudebereiche wurde die Beleuchtung mittels LED-Technik vorgesehen.

## **4.6 Energiespeicherung und Energieerzeugung**

Zum Glätten des Bedarfsprofils und damit zur Reduzierung der Nennleistungen sind sowohl für die Kälte- als auch für die Wärmeversorgung Speicherkapazitäten vorgesehen. Wichtig ist dabei die thermisch aktivierte Masse durch die schwere Bauweise. Aus diesem Grund wurde in der Ausführung auf die Vermeidung unnötiger Decken- und Fussbodenverkleidung Wert gelegt.

Daneben soll auch die Niedertemperatur-Wärme gespeichert werden, um so einen möglichst hohen Nutzungsgrad der Wärmepumpe zu erreichen und effektives Demand-Management betreiben zu können. Schließlich wurde angestrebt, auf dem Dach eine PV-Anlage zu installieren. Diese ist allerdings nicht Gegenstand der Finanzierung während der Bauphase und müsste von einem Investor betrieben werden.

## 4.7 Gebäudeautomation und Einzelraumregelung

In der Gebäudeautomation soll – vor allem im Hinblick auf das Monitoring – eine detaillierte Einzelraumregelung verfolgt werden. Hierarchisch werden demnach die Bedarfe dezentral ermittelt und entsprechend der Verteilungen bedient. Dieser Einzelraumautomationsanspruch ist für das Monitoring und für die später durchzuführenden Messungen und Versuche notwendig. Die Einzelraumautomation beinhaltet neben der Heizung und Kühlen auch die Beleuchtung und Verschattungsansteuerung.

Neben der Einzelraumregelung sollte im Gebäude die Methode der zeitgesteuerten diskontinuierlichen Energieströme, also der Pulsbetrieb von wärme- und kältetechnischen Anlagen eine besondere Bedeutung haben.

## 4.8 Energetische Gebäudekennwerte

### Nutzenergiebedarf

Die Förderrichtlinie gibt Zielwerte für Gesamt-Primärenergiebedarf und Heiz-Nutzenergiebedarf des Gebäudes vor. Zur Bestimmung dieser Kennwerte stehen prinzipiell verschiedene Berechnungsmethoden zur Verfügung. Zur Erreichung des Zielwertes für den Nutzenergiebedarf Heizen wurden mittels dynamischer Gebäudesimulation<sup>3</sup> die U-Werte der verschiedenen Bauteile optimiert. Mit den Nutzungsprofilen der DIN V 18599, hinsichtlich interner Wärmequellen und Solltemperatur aber unter Annahme des Wetterdatensatzes<sup>4</sup> für Erfurt, wurde der Nutzenergiebedarf für die Beheizung auf weniger als **24 kWh/m²a** reduziert. Dieser niedrige Heizenergiebedarf ist neben den Transmissionswärmeverlusten von der Güte der Wärmerückgewinnung sowie den Betriebszeiten der Lüftungsanlage abhängig. Die Rückwärmezahl wurde für die Berechnungen mit 0,7 angenommen. Es wird jedoch angestrebt eine höhere Rückwärmezahl zu erreichen.

Den Nutzungsprofilen der DIN V 18599, zur Berechnung des Energiebedarfs der mechanischen Lüftung, liegt ein durchgehender, nicht an den Bedarf angepasster, Betrieb zugrunde. Verschiedene Arbeiten bsp. (Fisch et al (2008)<sup>5</sup>) zeigen auf, dass durch einen bedarfsgerechten Betrieb eine Energieeinsparung hinsichtlich des Betriebes der Lüftungsanlage um bis zu 50% möglich ist. Zur Abbildung des

---

<sup>3</sup> Zur Simulation wurde TAS (Thermal Analysis Software) von edsl.net in der Version 9.0.9e verwendet.

<sup>4</sup> TRY Erfurt; Erstelldatum: Mai 2003 von Meteonorm

<sup>5</sup> Fisch et al. ;EVA, Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude, 2008 BMWI: 0327346A

bedarfsgerechten Betriebes in der Simulation wird der Auslegungsvolumenstrom nach EnEV um nachfolgend beschriebene Faktoren verringert.

Für die Bestimmung des Energiebedarfes der künstlichen Beleuchtung sind im Teil 10 der DIN V 18599 Faktoren für die relative Abwesenheit gegeben. Nach Auffassung von Hecker<sup>6</sup> ist eine Anwendung dieser Faktoren auf den Betrieb von Lüftungsanlagen zulässig, wenn der Luftvolumenstrom in Abhängigkeit der Raumluftqualität geregelt werden kann. Darüberhinaus können laut Hecker, nach einer noch unveröffentlichten Ergänzung zum Rechenverfahren der DIN V 18599, Teilbetriebsfaktoren für RLT-Anlagen, in Abhängigkeit von der Nutzungsart, zur Reduzierung des Volumenstroms angesetzt werden.

Die Ergebnisse der thermischen Gebäudesimulation zeigen, dass unter Berücksichtigung dieser Abwesenheits- und Teilbetriebsfaktoren der Heizenergiebedarf des gesamten Gebäudes um 3 kWh/m<sup>2</sup>a gesenkt werden kann.

In der Tabelle 1 sind die Simulationsergebnisse des Nutzenergiebedarfs für Kühlen und Heizen, berechnet mit TAS Version 9.0.9e und dem Wetterdatensatz für Erfurt (TRY von Meteororm) unter Annahme verschiedener Betriebsszenarien der mechanischen Lüftung dargestellt. In der ersten Spalte (EnEV Standard) sind die Simulationsergebnisse eines Lüftungsprofils ohne Berücksichtigung von Abwesenheits- und Teilbetriebsfaktoren, in der zweiten Spalte mit Anwendung von Abwesenheitsfaktoren und in der dritten Spalte mit Abwesenheits- und Teilbetriebsfaktoren angegeben.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse des Jahresnutzenergiebedarfs für Kühlen und Heizen

	EnEV Standard	EnEV C <sub>RLT</sub>	EnEV C <sub>RLT</sub> ; F <sub>RLT</sub>
<b>Heizen</b>	24 kWh/m <sup>2</sup> a	22 kWh/m <sup>2</sup> a	21 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Kühlen</b>	5 kWh/m <sup>2</sup> a	6 kWh/m <sup>2</sup> a	7 kWh/m <sup>2</sup> a

Neben der Gebäudesimulation wurde mittels Berechnungsverfahren gemäß EnEV<sup>7</sup> ein Nutzenergiebedarf für Heizen von 45,1 kWh/m<sup>2</sup>a ermittelt (vgl. Tabelle 2). Der Unterschied zwischen Simulation und EnEV ist vor allem durch die vorgegebenen Randbedingungen. Bei der Wahl freier Randbedingung, welche der Nutzung als Hochschulgebäude entsprechen, kann im Rahmen der DIN V 18599 ein Nutzenergiebedarf Heizen von **30 kWh/m<sup>2</sup>a** ausgewiesen werden.

### Primärenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf des Gebäudes im Sinne der EnEV setzt sich aus der aufzuwendenden Energie für Heizen, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung und Hilfsantriebe zusammen. Dazu stellt die DIN 18599 einen Fundus an verschiedenen Anlagenkonfiguration zur Verfügung. Jedoch sind eine durch Fernwärme angetriebene

<sup>6</sup> Hecker in: Energieeffiziente Gebäudeklimatisierung, Raumluft in A++ Qualität, 2009

<sup>7</sup> Alle Berechnungen mit EPASS-HELENA® Version 5.0.0.103 18599

Absorptionswärmepumpe, sowie eine direkte Kühlung mittels Umweltenergien nicht darstellbar.

Aus diesem Grund wurde zur Ausweisung eines Primärenergiebedarfes im Berechnungsgang für den Heizenergiebedarf als Erzeuger eine direkte Beheizung mittels Fernwärme angenommen. Mit einem unterstellten Deckungsgrad von 0,9 und einer Jahresarbeitszahl von 1,5 der Wärmepumpe kann der Primärenergiebedarf für Heizen um bis zu 30% gesenkt werden (vgl. Tabelle 2). Zur Ermittlung des Primärenergiebedarfs zur Kühlung mittels Brunnen und Zisterne wird von einer Jahresarbeitszahl von 10 (vgl. Kalz et al (2008)) ausgegangen und mit dem Nutzenergiebedarf Kühlen zur Berechnung des Primärenergiebedarfs Kühlen in Ansatz gebracht (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Energetische Kennwerte nach DIN 18599 berechnet mit EPASS HELENA®  
Version: 5.0.0.103

	Bezeichnung	Berechnungen mit freier Eingabe der Randbedingungen [kWh/m²a]	Nachweis nach EnEV	
			[kWh/m²a]	% vom Referenzsollwert
berechnet mit EPASS HELNA®	Nutzenergiebedarf Heizen	30,4	45,1	50%
	Nutzenergiebedarf Kühlen	6,0	8,5	
	Endenergiebedarf Heizen	32,7	48,8	
	Primärenergiebedarf Heizen	16,6	24,7	
	Primärenergiebedarf Lüftung	18,7	25,2	
	Primärenergiebedarf Beleuchtung	8,8	12,9	
	Primärenergiebedarf gesamt	44,2	63,2	39%
Handrechnung	<i>Primärenergiebedarf Kühlen mit <math>JAZ_{Kühlen}=10 \text{ kWh}_{therm}/\text{kWh}_{el}</math></i>	0,6	0,9	
	<i>Primärenergiebedarf gesamt mit Absorptionswärmepumpe <math>JAZ_{WP}=1,5 \text{ kWh}_{therm}/\text{kWh}_{therm}</math> Deckungsgrad= 0,9</i>	39,1	55,4	34%
	<i>Primärenergiebedarf gesamt mit Absorptionswärmepumpe inklusive Kühlung</i>	39,7	56,25	35%



## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Direkte Partner für die integrale Planung des Gebäudes sind:

- Gerber Architekten, Dortmund
- Ingenieurbüro Dr. Krämer, Weimar
- HKL Ingenieurgesellschaft, Erfurt und Aachen
- Ingenieurgesellschaft SBS, Apolda
- Freistaat Thüringen vertreten durch Landesamt für Bau und Verkehr, Erfurt

Weitere potenzielle Partner für spezielle Studien sind:

- ILK Dresden (Absorptionssimulation- und monitoring)
- EAW, Westenfeld (Anpassungskonzeption einer Absorptionsmaschine)
- FITR, Weimar (geologische Gutachten, Ergiebigkeitstests und Langzeitmonitoring von geothermischen Anlagen)

# **Energieoptimiertes Bauen: Neubau FH Erfurt, Grüner Campus - Vorbereitung und Durchführung des Intensivmonitorings für den Neubau der FH Erfurt Abschlussbericht – II. Eingehende Darstellung**

M. Eng. Klaus Weber, Prof. Dr.-Ing. Michael Kappert

Energieoptimiertes Bauen: Neubau FH Erfurt, Grüner Campus - Vorbereitung und Durchführung des Intensivmonitorings für den Neubau der - FH Erfurt

Abschlussbericht

Antragsteller: FH Erfurt

Ausführende Stelle: FH Erfurt - Fakultät Gebäudetechnik und Informatik – Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik - IBIT Institut für bauwerksintegrierte Technologien der FH Erfurt

Altonaer Straße 25, 99085 Erfurt

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Michael Kappert

Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

FKZ 03274310

Stand: 31.03.2016 (Schlussbericht)

Das Vorhaben wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegen bei den Autoren.

**Gefördert durch:**



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen.</b>	<b>4</b>
1.1 Einleitung .....	4
1.2 Hochschulgebäude mit innovativem Energiesystem .....	5
1.3 Projektbeschreibung .....	6
1.4 Forschungsfokus .....	8
1.5 Gebäudekonzept / Sanierungskonzept .....	9
1.6 Energiekonzept .....	10
1.7 Performance .....	12
1.8 Optimierungsmaßnahmen und –möglichkeiten .....	13
<b>2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises</b>	<b>15</b>
<b>3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</b>	<b>16</b>
<b>4 Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses</b>	<b>17</b>
<b>5 Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen</b>	<b>18</b>
<b>6 Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.</b>	<b>19</b>

# 1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen.

## 1.1 Einleitung

Die Zuwendungsmittel wurden nur zum vorgegebenen Zweck verwendet. Aufgrund der kostenneutralen Verlängerung, geschuldet dem Bauverzug, ergaben sich Verschiebungen zu Gunsten der Personalkosten.

Folgende Technologien sollten zum Einsatz kommen:

- Vakuumdämmung an Wärmebrücken
- fernwärmegetriebene Absorptionswärmepumpe
- Nutzung Regenwasserzisterne als Wärmequelle und -senke
- Brunnenwasser zur Spitzlastdeckung der Kühlung RLT
- mechanische Lüftung mit WRG
- großflächige Deckenelemente zur Kühlung
- Flächenheizung in allen Räumen
- Einzelraumregelung

Folgende Gebäudekenndaten sollten realisiert werden:

$H_T$	0,40 W/m <sup>2</sup> K
$A/V_e$	0,43
$NF_{DIN\ 277}$	1.200 m <sup>2</sup>
NGF	1.805 m <sup>2</sup>
BGF	2.240 m <sup>2</sup>
BRI	8.890 m <sup>3</sup>
PE Bedarf	<50 kWh/m <sup>2</sup> a

Das wesentliche Ziel war ein Primärenergieverbrauch von weniger als 50 kWh/m<sup>2</sup>a. Das Ziel wurde nicht erreicht. Das angestrebte Ziel eines Primärenergieverbrauches von unter 50 kWh/m<sup>2</sup>\*a wurde nicht erreicht. Der Primärenergieaufwand für Strom und Wärme liegt bei 82,18 kWh/m<sup>2</sup>\*a. Gründe liegen im erhöhten Wärmeverbrauch, insbesondere auch durch Fehler bei der Absorptionswärmepumpe, im erhöhten Verbrauch der RLT-Anlagen durch längere Laufzeiten als geplant und im erhöhten Energieverbrauch der Beleuchtung, ebenfalls durch veränderte Nutzungszeiten. Im Nachgang zum Forschungsprojekt sollen noch weitere Analysen und Optimierungen erfolgen.

## 1.2 Hochschulgebäude mit innovativem Energiesystem



Abbildung 1-1: Der Neubau Des Hörsaal- und Laborgebäudes der Fachhochschule Erfurt: Blick vom Hof Auf das Hörsaalgebäude. © Thüringer Ministerium Für Bau, Landesentwicklung Und Verkehr, Jürgen Norwig

Mit dem Neubau erweitert die Fachhochschule Erfurt ihren traditionsreichen „Grünen Campus“ um ein modernes Lehr- und Laborgebäude für die Fakultät Gartenbau, Landschaftsarchitektur und Forst. Das Energiekonzept des Gebäudes zeichnet sich durch verschiedene innovative Ansätze aus, die einen besonders energieeffizienten Gebäudebetrieb erlauben sollen. Unter Nutzung von Fernwärme als Antrieb einer Adsorptionswärmepumpe gelingt die kombinierte Nutzung einer Regenwasserzisterne als regeneratives Wärme- und Kältereservoir und die Abwärmenutzung der zentralen EDV-Technik. Das Gebäude soll sehr wenig Energie brauchen, nicht zuletzt weil die Fachhochschule Erfurt einen CO<sub>2</sub>-neutralen Campus anstrebt. Das neue Gebäude ist der Auftakt hierfür. Auf einer Nutzfläche von fast 1.000 Quadratmetern nutzen 665 Studenten und Mitarbeiter der Fakultät das Gebäude. Ein hochwertiges Raumangebot mit Seminar- und Arbeitsräumen, zwei Hörsälen, zwei Laborräumen und einem Computer-Pool lädt an einen Ort ein, der mehr ist als ein Ort der Wissensvermittlung: Das Hochschulgebäude eignet sich bereits heute als Forschungsobjekt für Studierende im Sinne einer projektorientierten, den Prinzipien der Nachhaltigkeit verpflichtenden Lehre.

Tabelle 1-1: Gebäudesteckbrief

Standort	Leipziger Straße 77, 99085 Erfurt, Thüringen
Baufertigstellung	2012
Inbetriebnahme	2012
Bauherr	Freistaat Thüringen, Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur
Betreiber	Fachhochschule Erfurt, Dezerant Bau und Liegenschaften
Nutzer	Fachhochschule Erfurt, Fakultät Landschaftsarchitektur, Gartenbau und Forst
Investor	Freistaat Thüringen gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung
Bruttogrundfläche	2.237 m <sup>2</sup>
Beheizte Nettogrundfläche	1.844 m <sup>2</sup>
Bruttorauminhalt	8.889 m <sup>3</sup>
A/V	0,43 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Schwerpunkte:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeschutz</li> <li>• Lüftung + WRG</li> <li>• Aktive Kühlung</li> <li>• Regenerative + passive Kühlung</li> <li>• Thermisch aktivierte Bauteilsysteme</li> <li>• Wärmepumpe</li> <li>• Wärme-/Kältespeicherung</li> <li>• Regelungstechnik</li> <li>• Betriebsführung,</li> <li>• Gebäudeautomation</li> <li>• Energetische Betriebsoptimierung</li> </ul>



Abbildung 1-2: Blick von Süden auf das Hörsaalgebäude © Thüringer Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Verkehr, Jürgen Norwig

### 1.3 Projektbeschreibung

Mit diesem Gebäude soll der 13 Hektar umfassende „Grüne Campus“ der FH Erfurt um einen modernen Neubau erweitert werden. Es handelt sich um ein neues Hörsaal- und Laborgebäude

für die Fakultät Gartenbau, Landschaftsarchitektur und Forst. Damit wurde auch architektonisch die Fusion der Fachrichtungen Gartenbau und Landschaftsarchitektur mit den Fachrichtungen Forstwirtschaft und Ökosystemmanagement vollzogen. In enger Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der FH Erfurt konzipierten Architekten und Fachplaner ein richtungsweisendes Gebäude mit energieoptimiertem Gebäudekonzept. Der Freistaat Thüringen führte das Bauprojekt nach den Maßgaben der öffentlichen Vergabepraxis aus.

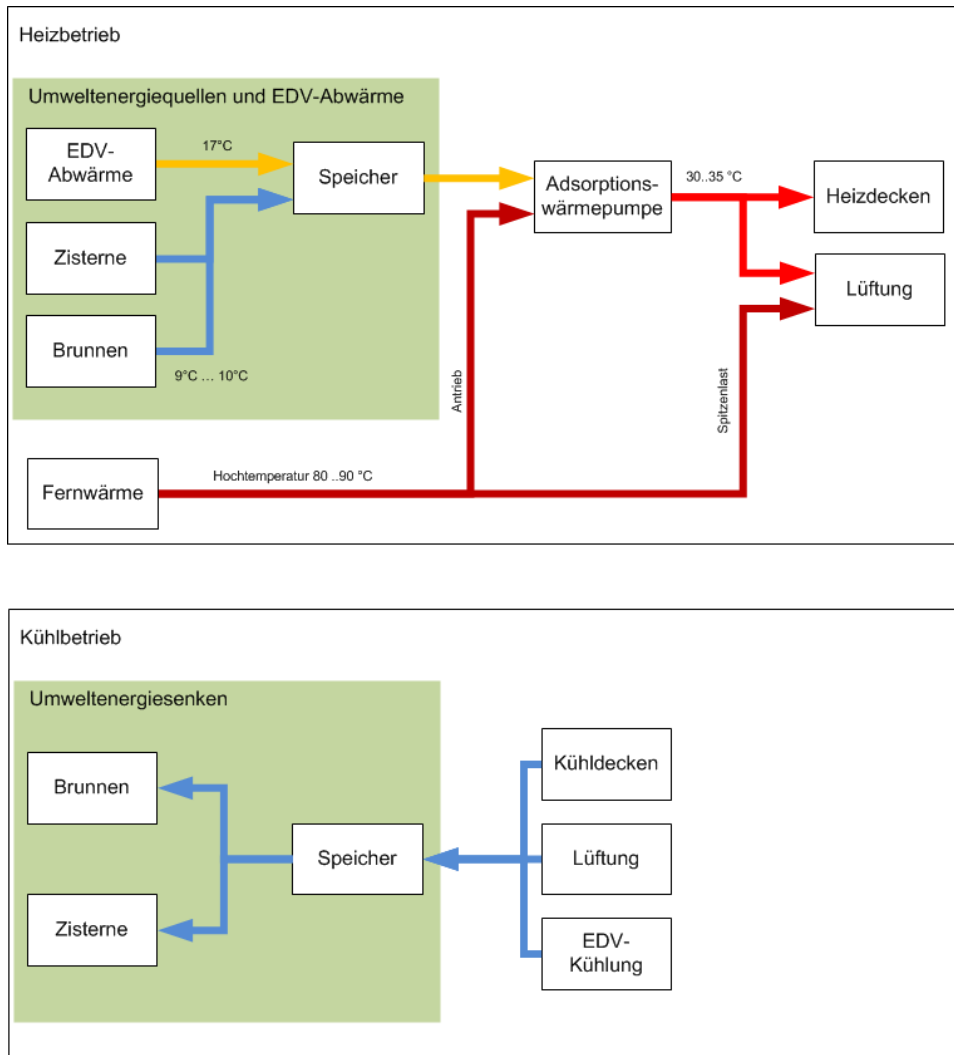


Abbildung 1-3: Energieflussschema Winter und Sommer

Motiviert durch die hohe Qualität des Gebäudes entschloss sich der Bauherr, an der Pilotzertifizierung des BNB für Unterrichtsgebäude teilzunehmen. Das Prädikat „Silber“ wurde mit der Note 1,74 erreicht.





Abbildung 1-4: Der Hörsaal bietet Platz für 100 Studierende. Die großen Fensterfläche erlauben eine gute Versorgung mit Tageslicht.

## 1.4 Forschungsfokus

Wie bei allen EnOB-Modellprojekten wird das Gebäude mit der Inbetriebnahme einem intensiven wissenschaftlichen Monitoring unterzogen. Dazu werden alle wesentlichen Stoff- und Energieströme über einen Zeitraum von zwei Jahren erfasst und bilanziert. Ein besonderes Augenmerk gilt der Interaktion zwischen den verschiedenen Komponenten des Energiesystems. Der Schlüssel zu einem optimalen Zusammenspiel wird in der passgenauen Gestaltung der Raum- und Anlagenautomation gesehen. Es soll untersucht werden, ob das in der Planung definierte Automatisierungskonzept einen energieeffizienten Betrieb gewährleisten kann. Insgesamt werden 3.000 Datenpunkte aus dem Gebäude mit einer minütlichen Auflösung ausgewertet. Mit der Nutzung einer Regenwasserzisterne als Wärmequelle und Wärmesenke wird das Potenzial dieser innovativen Anwendung untersucht. Speziell für die mit Fernwärme angetriebene Adsorptionswärmepumpe soll auf Basis der gemessenen Energieströme genauer ermittelt werden, ob sich durch deren Einsatz ökonomische und primärenergetische Vorteile ergeben. Ebenso werden die Abwärmenutzung aus der zentralen EDV-Technik, das Raumklima sowie die Nutzerzufriedenheit eingehend untersucht.

## 1.5 Gebäudekonzept / Sanierungskonzept

Die Verknüpfung von Gebäude und Landschaft und die Einbindung des Neubaus in die bestehenden Strukturen waren Grundlage für die architektonische Entwurfskonzeption. Der dreigeschossige Neubau befindet sich im rückwärtigen Teil zweier Altbauten, die künftig als Seminar- und Verwaltungsgebäude genutzt werden. Zwischen den Bestandsgebäuden und dem Neubau entstehen Hofsituationen, die entlang des eigentlich unter Terrainhöhe liegenden Geschosses des Neubaus abgesenkt sind. Die Räume können sich so mit großzügigen Öffnungen nach außen orientieren und natürlich belichtet werden. Der Hörsaal, die öffentlichen Bereiche im Untergeschoss des Neubaus und die bestehende Cafeteria im Altbau erhalten dadurch eine neue Aufenthaltsqualität, dies wird unterstützt durch den begrünten Hof mit terrassierten Sitzstufen. Der Neubau tritt insgesamt nur zweigeschossig in Erscheinung und wahrt damit die Proportionen zu den vorhandenen Gebäuden. Ein eingeschossiger Verbindungsgang, der sich aus dem Neubau entwickelt, führt zwischen die beiden Altbauten hindurch zu einem gemeinsamen Haupteingang.

In dem Gebäude sind 18 Büros untergebracht sowie 54 PC-Arbeitsstationen. In den beiden Hörsälen und den drei Seminarräumen finden insgesamt 208 Studierende Platz.



Abbildung 1-5: link: Ein typischer Büroraum. Beheizung und Kühlung erfolgt über thermisch aktivierte Deckenelemente, die Lüftung individuell über öffnenbare Fensterflügel. Rechts: Blick ins Foyer des Gebäudes. Es verbindet die drei Geschosse und stellt den Mittelpunkt des Neubaus dar.

## 1.6 Energiekonzept

Der Primärenergiebedarf sollte 50 kWh/m<sup>2</sup> nicht übersteigen und damit den Grenzwert der EnEV um mehr als 50% unterbieten. Dies wird durch einen konsequenten Wärmeschutz sowie durch einen abstimmt Mix verschiedener Energietechnologien tatsächlich erreicht. Die komplette Gebäudehülle wurde sehr gut gedämmt. Neben der Fassade mit einem U-Wert von 0,166 und dem Dach mit 0,133 sind auch alle Bauteile gegen Erdreich sehr gut gedämmt (0,132 bis 0,166). Die hohen Anforderungen an die Fenster und Pfosten-Riegel-Konstruktion lassen sich mit einer dreifach verglasten Holz-Aluminium-Konstruktion erfüllen. Für die transparenten Flächen ist ein U-Wert von 1,0, ein g-Wert von 0,58 und ein flexibler, außen liegender Sonnenschutz mit einem resultierenden Gesamt-g-Wert von 0,145 vorgesehen. Eine sehr effektive Maßnahme für die Primärenergieeinsparung ist dabei die Adsorptionswärmepumpe, welche über Fernwärme angetrieben wird und eine Regenwasserzisterne als regenerative Wärmequelle nutzt. Ein Grundwasserbrunnen dient hierbei als ergänzendes Backup-System. Das System funktioniert so: Das Regenwasser wird aus der Zisterne in das Gebäude gefördert, dort wird - mit einem Platten-Wärmeübertrager - die nötige Wärme entzogen und das Wasser anschließend wieder in die Zisterne geleitet.



Abbildung 1-6: Bohrung eines Grundwasserbrunnens. Aus zwei Saug- und Schluckbrunnen wird Grundwasser in Verbindung mit einer Adsorptionswärmepumpe zu Heiz- oder Kühlzwecken genutzt.

In Kombination mit einer per Fernwärme angetriebenen Adsorptionswärmepumpe wird die Wärmeenergie aus der Zisterne auf ein nutzbares Temperaturniveau gehoben. Die Adsorptionswärmepumpe arbeitet mit Wasser als Kältemittel und einem mit Silikagel beschichtetem Adsorber. Sie entzieht der Regenwasserzisterne die Wärme bis zu etwa 8°C.



Das Gebäude wird direkt mit Fernwärme beheizt, sobald die Leistung der Wärmepumpe aufgrund zu geringer Regenwassertemperaturen nicht mehr ausreicht. Die Kühlung des Gebäudes erfolgt direkt über das kühle Regenwasser.



Abbildung 1-7: Die Adsorptionswärmepumpe ist zentrale Komponente im Energiekonzept des Gebäudes.

Auf den Einsatz einer konventionellen Kompressionskältemaschine kann also verzichtet werden. Auch die Abwärme der EDV-Technik wird im Winter zu Heizzwecken genutzt. Eine konventionelle Kühlung des Serverraums mittels Kompressionskältemaschine kann damit entfallen. Die Wärmeübertragung im Raum wird mittels thermoaktiver Bauteilsysteme (TABS) in Form abgehängter Decken realisiert. Hiermit ist sowohl ein Heiz- als auch ein Kühlbetrieb möglich. Gesonderte Heizkörper unter den Fenstern werden nicht benötigt. Die großen Wärmeübertragungsflächen gestatten höhere Kühlmedien- und niedrigere Heizwassertemperaturen zur Gewährleistung eines behaglichen Raumklimas und hoher Energieeffizienz.



Abbildung 1-8: Im Foyer wurden in der Bauphase Kapillarrohrmatten in die Böden verlegt. Denn wegen der großzügigen Verglasung müssen hohe solare Einträge abgeführt werden.



Abbildung 1-9: Rückseite eines thermisch aktivierbaren Deckenelementes mit Aussparungen für Elektroinstallation

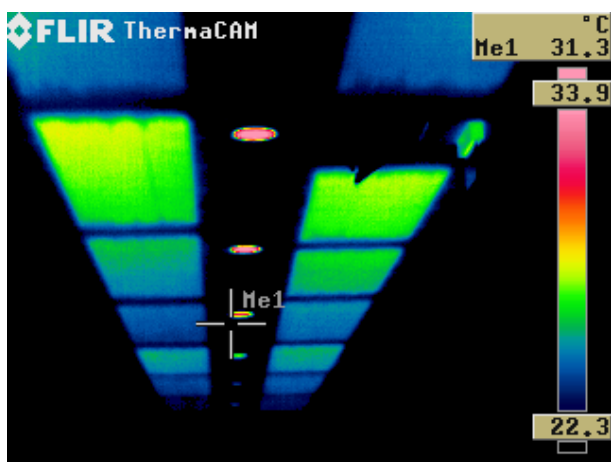


Abbildung 1-10: Die Deckenelemente wurden soeben thermisch aktiviert zur Raumbeheizung. Die Thermografie zeigt, wie sich die Elemente nach und nach erwärmen.

Im Bereich der Baukonstruktion kommen Vakuum-Isolier-Paneele (VIP ) zum Einsatz, um an neuralgischen Punkten Wärmebrücken zu vermeiden. Die Hörsäle und Labore werden mittels mechanischer Lüftungsanlagen, mit einem Wärmerückgewinnungssystem und mit drehzahlgeregelten Ventilatoren, in Abhängigkeit von der Raumluftqualität betrieben. Die Belüftung der Einzelbüros erfolgt individuell über Fensterlüftung. Die verschiedenen Teilsysteme werden in ein übergreifendes Regelungskonzept integriert. Der Gebäudebetrieb soll konsequent und laufend an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden. Hierbei werden Präsenz- und Luftqualitätssensoren sowie schnell reagierende Heiz- und Kühlelemente eingesetzt. Zur Beleuchtung kommt im Bereich der Verkehrsflächen LED-Technik zum Einsatz.

## 1.7 Performance

Die Erfahrungen im ersten Betriebsjahr 2013 zeigen, dass die installierten Heiz- und Kühlflächen trotz der niedrigen Temperaturdifferenzen für ein behagliches Raumklima sorgen. Die Nutzer sind mit dem Gebäude zufrieden. Allerdings sind die vom Normalfall abweichenden Gebäudelfunktionen offensichtlich erklärungsbedürftig. Im ersten Betriebsjahr erreichte das Gebäude die Zielwerte für den Wärmebedarf. Im Gegensatz dazu lag der Verbrauch

elektrischer Energie in diesem Zeitraum um 90 Prozent über den Planungswerten. Allein der Strombedarf für Beleuchtung überschreitet den Planungswert um 200 Prozent. Nach einer ersten Optimierung erreicht die Wärmepumpe nun eine thermische Arbeitszahl von 1,15, was einer Verbrauchsreduktion von 13 Prozent entspricht. Der Strombedarf für den Betrieb der Umwälzpumpen des Wärmepumpensystems ist nicht zu vernachlässigen. Weitere Optimierungspotenziale sollen im weiteren Projektverlauf erschlossen werden. Die Kühlung der EDV-Räume erreicht elektrische Arbeitszahlen von 9 bis 15. Die Regenwasserzisterne und das Grundwasser werden als regenerative Kälte also sehr effektiv genutzt.

## 1.8 Optimierungsmaßnahmen und –möglichkeiten

Während der Inbetriebnahme des Gebäudes wurden teils gravierende Fehler in den Komponenten der Gebäudetechnik, der Sensorik sowie bei der Umsetzung des Regelungskonzeptes festgestellt. Beispielsweise gab es einen Defekt der Adsorptionswärmepumpe, es kam zum Ausfall von Wärmemengenzählern, einzelne Geräte waren falsch angeschlossen, die Messdaten der CO<sub>2</sub>-Sensoren in den Unterrichtsräumen waren fehlerhaft und auch die Betriebsführung entsprach nicht dem geplanten Konzept. Rückblickend wird deutlich, dass vor allem die Integration der innovativen Komponenten und eine fehlerfreie Umsetzung des Automations- und Regelungskonzeptes sehr hohe fachliche und zeitliche Ansprüche an die Baubeteiligten stellen.

Tabelle 1-2 Energiekosten für den Betrieb in €/m<sup>2</sup>a

<b>Energiebezug gesamt</b>	10,00
<b>Strombezug gesamt</b>	7,00
<b>Heizenergie gesamt</b>	3,00

Nachfolgende Tabelle gibt die Kosten für die Realisierung wieder. Hierbei handelt es sich um eine/n Kostenfeststellung. Die nachfolgende Tabelle gibt die Bauwerkskosten netto nach DIN 276 bezogen auf die Bruttogrundfläche (BGF) nach DIN 277.

Tabelle 1-3: Realisierungskosten €/m<sup>2</sup>

Baukonstruktion (KG 300)	1.257
Technische Anlage (KG 400)	486

Tabelle 1-4: Energiekennzahlen nach EnEV (in kWh/m<sup>2</sup>a)

Heizwärmebedarf	57,08
Primärenergie Wärme	25,59
Primärenergie gesamt	61,25

Tabelle 1-5 Gemessene Energiekennwerte (in kWh/m<sup>2</sup>a)

Endenergie Wärme	38,60
Primärenergie gesamt	125,89
Endenergie Strom (Bilanzraum nach DIN V 18599)	29,00
Endenergie Strom gesamt	45,81
Primärenergie Strom und Wärme	82,18
Strom für künstliche Beleuchtung	12,78
Strom für RLT-Anlagen	9,79
Strom für Pumpen einschließlich Erschließung Umweltenergien	3,50

Eine ausführliche Auswertung der Ergebnisse erfolgt im als Anlage beigefügten Forschungsbericht.

## 2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Durch verspätete Buchungen kam es zu einem Überziehen der Zuwendung. Den Ausgleich trägt die Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik der FH Erfurt.

Position Gesamtfinan- zierungsplan	Gesamtfinan- zierungsplan	Ausgaben insg. einschl. 2015
0812	171.865,00 €	188.531,05 €
0835	6.690,00 €	2.183,89 €
0843	14.667,00 €	1.173,12 €
0846	2.160,00 €	1.627,37 €
0850	50.762,00 €	52.628,57 €
<b>Summe</b>	<b>246.144,00 €</b>	<b>246.144,00 €</b>

Im Wesentlichen wurden die sächlichen Verwaltungskosten zur Deckung der Mehrausgaben bei den Personalkosten verwendet.



### **3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Über die Laufzeit arbeitete ein Mitarbeiter am Projekt. Nach dem sich abzeichnenden verlängerten Bauablauf und der kostenneutrale Verlängerung, konnte der Mitarbeiter nicht mit einer vollen Stelle tätig sein, teilweise nur mit einer halben Stelle. Die Hochschule setzte den Mitarbeiter auch in anderen Forschungsprojekten ein, Dadurch konnte dieser Mitarbeiter gehalten werden und das Vorhaben ohne Bruch bis zum Vorhabensende begleiten.

Während der Planungs- und Bauphase war die Betreuung notwendig, da sonst Entscheidungen gefallen wären, die sich negativ ausgewirkt hätten.

Während der Monitoringphase ist der personelle Einsatz ebenfalls notwendig, um Fehler im Gebäudebetrieb zu erkennen und zu beheben und den Gebäudebetreiber zu optimieren. Durch die Einbindung von Studierenden mit ihren Abschlussarbeiten in das Vorhaben konnte unterschiedliche Fragestellungen bearbeitet werden. Einige der Abschlussarbeiten konnten durch den Förderverein der Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik auf Grund ihrer Qualität prämiert werden. Die geleistete Arbeit war angemessen.

## **4 Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Die Ergebnisse des Vorhabens sowie die aufgetretenen Probleme fließen in die Lehre der Studiengänge der Fachrichtung „Gebäude- und Energietechnik“ und in den Masterstudiengang „Architektur“ ein.

Durch die Veröffentlichung des Berichtes auf der Internetplattform des Forschungsschwerpunktes Energie-optimiertes Bauen ([www.enob.info](http://www.enob.info)) sind die Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich. Dort werden auch einige Abschlussarbeiten der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Mit weiteren Abschlussarbeiten soll der Gebäude- und Anlagenbetrieb weiter optimiert werden und den Studierenden unterschiedlicher Fachrichtungen die Möglichkeit geboten werden, sich intensiv mit dem Gebäude und seiner Technik auseinander zu setzen.

Die Nutzung von Brunnenwasser zur Kühlung bei Lüftungsanlagen durch entsprechend große Wärmeübertrager wurde erfolgreich demonstriert und ist leicht reproduzierbar. Die Nutzung von Zisternen zur direkten Kühlung wurde demonstriert und soll durch weitere Untersuchungen noch optimiert werden.

Die Nutzung einer Absorptionswärmepumpe für die Kälte- und Wärmebereitstellung mit der Möglichkeit des verminderten Primärenergieeinsatzes wurde dargestellt. Auch hier sollen weitere Optimierungen erfolgen.

Die Zugänglichkeit der Ergebnisse und der gemachten Erfahrungen für die Öffentlichkeit sollte eine Verbreiterung dieser Technologien befördern.

## **5 Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Im Rahmen des Förderprogrammes „Energieoptimiertes Bauen“ werden immer wieder neue Demonstrationsvorhaben entwickelt und gebaut. Absorptionswärmepumpen werden in mehreren Vorhaben für Heizung und Kühlung eingesetzt, ebenso die Nutzung von Umweltwärme mittels Erdsonden oder Grundwasser. Eine Kopplung mit einer großen Regenwasserzisterne war zum damaligen Beantragungszeitpunkt neu.

Die Erfahrungen aus der Umsetzung am Projekt dienen auch der weiteren Entwicklung des Forschungsschwerpunktes.

## **6 Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.**

Schutzrechtsanmeldungen erfolgten im Rahmen dieses Projektes nicht.

Veröffentlichung der Ergebnisse über die Internetseiten des Forschungsschwerpunktes ([www.enob.info](http://www.enob.info)).

Die Ergebnisse fließen auch in die Lehre an der FH Erfurt ein. Weitere Veröffentlichungen sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht vorgesehen.

Geplant ist die weitere Optimierung des Gebäudebetriebes mit Studierenden.

## **Abschlussbericht**

# **"Energieoptimiertes Bauen: Neubau FH Erfurt, Grü- ner Campus Vorbereitung und Durchführung des Intensivmonitorings für den Neubau der FH Er- furt"**

**Förderkennzeichen: 03274310**

Projektlaufzeit:	01.01.2010 bis 30.09.2015
Projektleitung:	Prof. Dr.-Ing. Michael Kappert
Autor:	Klaus Weber, M.Eng.
Zuwendungsempfänger:	Fachhochschule Erfurt University of Applied Sciences Fakultät Gebäudetechnik und Informatik Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik IBIT – Institut der Fachhochschule Erfurt

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Projektbeschreibung</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Ergebnisse in der Zusammenfassung</b>	<b>10</b>
2.1	Übersicht	10
2.2	Bezugsflächen	10
2.3	Witterung	11
2.4	Heizenergie	11
2.4.1	Systembeschreibung	11
2.4.2	Verbrauchswerte	13
2.4.2.1	End- und Primärenergieverbrauch Heizwärme	13
2.4.2.2	Vergleich Bedarfs- mit Verbrauchswerten	15
2.5	Elektrische Energie	16
2.5.1	Vorbemerkung	16
2.5.2	Künstliche Beleuchtung	16
2.5.3	Lüftungsanlagen	17
2.5.4	Hilfsenergie Pumpen	17
2.5.5	Bilanzierung außerhalb DIN V 18 599 Bilanzraum	17
2.6	Trinkwasser	18
<b>3</b>	<b>Gebäudeerrichtung Bauprozess</b>	<b>20</b>
3.1	Organisation	20
3.1.1	Bauprojektlenkung	20
3.1.2	Freiberuflich Tätige	20
3.1.3	Einbindung des Monitoring-Team in den Planungs- und Bau	20
3.1.4	Ausführenden Unternehmen	21
3.2	Bauzeitenplanung	21
3.3	Baustörung und Bauzeitenverzug	21
3.4	Planungshistorie Heiz- und Kühldecken	23
3.5	Errichtungskosten	23
<b>4</b>	<b>Architektur und Bauphysik</b>	<b>25</b>
4.1	Gebäude	25
4.2	Flächen	29
4.3	Wärmeschutznachweis	30
4.3.1	Vorbemerkungen	30
4.3.2	Förmlicher Wärmeschutznachweis	30
4.3.3	Bauteilliste	31

## 1 Projektbeschreibung

4.4	Gebäudehülle .....	31
4.4.1	Vorbemerkung .....	31
4.4.2	Anforderungen .....	31
4.4.3	Opake Außenwand .....	32
4.4.3.1	Betonfertigteile .....	32
4.4.3.2	Vorgehängte und hinterlüftete Fassade (VHF) .....	33
4.4.3.3	Ereignisse in der Ausführung und Baustörung .....	35
4.4.4	Außenliegender Sonnenschutz .....	36
4.4.5	Perimeterdämmung .....	37
4.4.6	Vorhangfassade .....	39
4.4.6.1	Vorbemerkung .....	39
4.4.6.2	Holz-Glas-Fassade .....	39
4.4.6.3	Stahl-Glas-Fassade .....	41
4.4.6.4	Fugendurchlässigkeit, Luftdurchlässigkeit Fassaden .....	42
4.4.7	Luftdichtheit der Gebäudehülle .....	42
4.4.8	Wärmebrücken .....	45
4.4.8.1	Anlass und Problemstellung .....	45
4.4.8.2	Wärmebrücken im Planungsprozess .....	45
4.4.8.3	Ergebnisse Wärmebrückenberechnung .....	50
4.4.9	Vakuumisolierpaneele VIP .....	50
4.4.9.1	Motivation und Planung .....	50
4.4.9.2	Ereignisse in der Bauausführung .....	51
4.5	Heiz- und Kühldecken .....	53
4.5.1	Vorbemerkungen .....	53
4.5.2	Planungs- und Bauablauf .....	53
<b>5</b>	<b>Systembeschreibung TGA .....</b>	<b>57</b>
5.1	Energiekonzept TGA .....	57
5.2	Normative Heizlast .....	57
5.3	Normative Kühllast .....	58
5.4	Komponenten im Detail .....	58
5.4.1	Adsorptionswärmepumpe .....	58
5.4.2	Regenwasserzisterne .....	59
5.4.3	Brunnenanlage .....	63
5.4.3.1	Vorbemerkungen .....	63
5.4.3.2	Planung und Genehmigung .....	64
5.4.3.3	Ausführung .....	64
5.4.3.4	Übergabe .....	66
5.4.3.5	Diskussion Hydraulik .....	67
5.4.4	EDV-Kühlung .....	67



5.4.4.1	Vorbemerkungen / Planung und Umsetzung .....	67
5.4.4.2	Technik .....	68
5.4.5	Betriebserfahrungen .....	68
5.4.6	RLT- Anlagen .....	68
5.4.6.1	Messstellen Elektroenergieverbrauch .....	70
5.4.6.2	Zentralgeräte .....	70
5.4.6.3	Luftverteilung und Luftdurchlässe in die Räume.....	71
5.4.6.4	Ergebnisse.....	74
5.5	Reglungs- und Steuerungskonzept.....	74
5.5.1	Lastenheft Gebäudeautomation.....	74
5.5.2	Detailplanung nach VDI 3814 .....	74
5.5.2.1	Vorbemerkung .....	74
5.5.2.2	Umschaltung Heiz- und Kühlbetrieb .....	75
5.5.2.3	Hörsäle .....	75
5.5.3	Umsetzung mit Honeywell CARE.....	77
5.5.4	Fensteröffnungskontakt .....	78
5.5.5	Erfahrungen Gebäudeautomation.....	79
<b>6</b>	<b>Datenmanagement, Visualisierung .....</b>	<b>80</b>
6.1	Problem- und Zielstellung .....	80
6.2	Umwälzpumpen.....	82
6.3	Messdaten-Integration .....	83
6.3.1	Vorbemerkung .....	83
6.3.2	R-Project .....	84
6.3.3	Wget.....	85
6.3.4	Export der Monitoring-Daten aus der GLT auf Webserver .....	87
6.3.5	Zuverlässigkeit Export der Rohdaten .....	87
6.3.6	Format der Rohdaten.....	88
6.3.7	Definitionsdatei .....	89
6.3.8	Datenhaltung mit PostgreSQL .....	90
6.3.9	Routinen .....	91
6.3.10	Flächen und Randparameter .....	91
6.4	Datenaufbereitung.....	93
6.4.1	Vorbemerkung .....	93
6.4.2	Energiezähler .....	93
6.4.2.1	Unstetigkeit eines Energiezähler .....	93
6.4.2.2	Korrektur kumulierter Verbrauchswert.....	93
6.4.2.3	„Nullwert“ eines Energiezähler .....	94
6.4.3	Fehler im Zeitstempel .....	95

## 1 Projektbeschreibung

6.5	Aggregieren und Bearbeiten von Messdaten .....	97
6.6	Mittlere Außenlufttemperatur .....	97
6.7	Leistungswerte (z.B. Solarstrahlung) .....	98
6.8	Tagessummen.....	100
6.9	COV- chang of value .....	100
6.10	Funktionen der Datenanalyse .....	102
6.10.1	Vorbemerkung .....	102
6.10.2	Faktoren .....	103
6.10.3	Boxplot nach Faktoren.....	103
6.10.4	Dauerlinie (geordnete Summenkurve) .....	103
6.10.5	Verteilungsfunktion .....	103
6.10.6	Carpet-Plot .....	103
6.10.7	Zeitverlaufsplot (kontinuierlich) .....	104
6.10.8	PMV- und PPD .....	104
6.10.9	Zeitverlaufsplot (mehrere Perioden übereinander).....	104
6.11	Messfehler und Datenausfall .....	104
<b>7</b>	<b>Messstellen und Messgeräte .....</b>	<b>105</b>
7.1	Vorbemerkung.....	105
7.2	Wetterstation .....	105
7.2.1	Einordnung des Gebäudestandortes .....	105
7.2.2	Standort der Messstation.....	105
7.2.3	Übersicht Messgeräte.....	106
7.2.4	Messgeräte, Sensoren, Wetterstation.....	108
7.2.4.1	Beleuchtungsstärke .....	108
7.2.4.2	Schattenringpyranometer.....	108
7.2.4.3	CO <sub>2</sub> -Sensor.....	109
7.2.5	Datenverarbeitung .....	109
7.2.6	Messfehler und Datenausfall .....	110
7.2.6.1	Vorbemerkung .....	110
7.2.6.2	Verschattung der Einstrahlungssensoren.....	110
7.2.6.3	Fehlerhafter Anschluss Pyranometer .....	111
7.2.6.4	Solare Diffusstrahlung.....	112
7.2.6.5	Sensor CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Außenluft.....	112
7.2.6.6	Beleuchtungsstärke .....	113
7.2.6.7	Aufzeichnungsausfall .....	113
7.3	Wärmemengenzähler .....	113
7.4	Elektroenergiezähler.....	114
7.5	Temperatursensoren .....	115
<b>8</b>	<b>Energiebedarfsberechnung .....</b>	<b>116</b>
8.1	Vorbemerkung.....	116

8.2	Bedarfsberechnung zur Antragsstellung .....	116
<b>9</b>	<b>Gebäudesimulation .....</b>	<b>118</b>
9.1	Gebäudeentwurf mit TAS .....	118
9.2	Simulation mit DesignBuilder .....	118
9.3	Unsicherheiten in der thermischen Gebäudesimulation .....	119
9.4	Wetterdaten für die Gebäudesimulation .....	120
9.5	Tageslichtangebot .....	122
9.6	Strömungssimulation – CFD .....	125
<b>10</b>	<b>Ergebnisse im Detail .....</b>	<b>129</b>
10.1	Kennwerte der Witterung .....	129
10.1.1.1	Außentemperatur .....	129
10.1.1.2	Solarstrahlung .....	131
10.1.2	Beleuchtungsstärke .....	134
10.1.3	Vergleichende Betrachtung Wetterdaten .....	136
10.1.3.1	Vorbemerkungen .....	136
10.1.3.2	DWD-Station am Flughafen Erfurt-Weimar .....	137
10.1.3.3	Station KMF der FH Erfurt .....	138
10.1.4	Heizgradtage, Gradtagszahl, mittlere Außentemperatur .....	140
10.1.4.1	Klimafaktoren .....	142
10.1.4.2	Kennwerte der Messdaten .....	144
10.1.4.3	Vergleich Außentemperatur mittels Heizgradtagen .....	146
10.1.5	DIN V 4108-6 .....	147
10.1.6	TRY-Daten .....	147
10.2	Heizenergie .....	148
10.2.1	Heizenergie und Außentemperatur .....	148
10.2.2	Heizenergie und Solarstrahlung .....	152
10.2.3	Umweltenergie und Abwärmenutzung .....	152
10.2.4	Nutzenergie Heizen .....	153
10.2.5	Verteil- und Übertragungsverluste Heizen .....	153
10.2.6	Heizbetrieb .....	155
10.2.7	Hilfsenergie Heizen .....	155
10.3	Kühlenergie .....	158
10.4	Thermoaktive Bauteilsysteme TABS .....	159
10.5	Speicher .....	160
10.5.1	Situationsbeschreibung und Problemstellung .....	160
10.5.2	Ungenügende Wärmedämmung Speicher .....	162
10.5.3	Vertauschte Klappenantriebe .....	163

## 1 Projektbeschreibung

10.6	EDV-Kühlung Prozesskühlung .....	163
10.7	Adsorptionswärmepumpe .....	164
10.8	Primärenergiebilanz.....	169
10.9	RLT-Anlagen .....	171
10.9.1	Situationsbeschreibung .....	171
10.9.2	Verbrauch.....	171
10.9.3	Lastverlauf.....	173
10.9.3.1	RLT-Anlage „kleiner Hörsaal“ .....	173
10.9.3.2	RLT-Anlage Labore.....	175
10.9.3.3	RLT-Anlage „großer Hörsaal“ .....	177
10.9.3.4	Wärmerückgewinnung RLT.....	179
10.9.3.5	Berechnungsgrundlagen .....	180
10.9.3.6	Messdaten und Berechnung .....	181
10.9.3.7	Ergebnisse Wärmerückgewinnung.....	181
10.10	Nachtauskühlung mit RLT-Anlagen .....	182
10.10.1	Problemstellung und Vorbemerkung.....	182
10.10.2	Effizienz.....	183
10.11	Künstliche Beleuchtung .....	185
10.11.1	Messkonzept .....	185
10.11.2	Verbrauchsübersicht.....	186
10.11.2.1	Verkehrsflächen .....	188
10.11.2.2	Unterrichtsräume .....	194
10.11.2.3	Büroräume .....	200
10.12	Elektroenergieverbrauch Nutzer .....	205
10.13	Energiezähler der Umwälzpumpen.....	206
10.14	Trinkwasserverbrauch .....	206
<b>11</b>	<b>Thermische Behaglichkeit .....</b>	<b>209</b>
11.1	Fragebogen.....	209
11.2	PMV-PPD .....	209
11.3	Bekleidung .....	210
11.4	Aktivitätsgrad.....	212
11.5	Operative Raumtemperatur .....	212
11.6	Ergebnisse .....	213
11.6.1	Büro 1.E.14 .....	213
11.6.2	Computerpool Kühlfall (1.E.05).....	214
11.6.3	Büro Kühlfall (1.E.12).....	217
11.7	Auswertung Raumlufthtemperaturen im Gebäude .....	218
<b>12</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>219</b>
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis und Referenzen .....</b>	<b>225</b>

<b>14</b>	<b>Abkürzungen, Symbole und Indices</b>	<b>233</b>
14.1	Abkürzungen .....	233
14.2	Symbole .....	234
14.2.1	Lateinische Symbole.....	234
14.2.2	Griechische Symbole.....	235
14.3	Indices.....	235
14.4	Beispiele verwendete Notationen .....	236

## 1 Projektbeschreibung

Mit dem Neubau erweitert die Fachhochschule Erfurt ihren traditionsreichen „Grünen Campus“ um ein modernes Lehr- und Laborgebäude für die Fakultät Gartenbau, Landschaftsarchitektur und Forst. Das Energiekonzept des Gebäudes zeichnet sich durch verschiedene innovative Ansätze aus, die einen besonders energieeffizienten Gebäudebetrieb erlauben sollen. Unter Nutzung von Fernwärme als Antrieb einer Adsorptionswärmepumpe gelingt die kombinierte Nutzung einer Regenwasserzisterne als regeneratives Wärme- und Kältereservoir und die Abwärmenutzung der zentralen EDV-Technik. Das Gebäude soll sehr wenig Energie verbrauchen, nicht zuletzt weil die Fachhochschule Erfurt einen CO<sub>2</sub>-neutralen Campus anstrebt. Das neue Gebäude ist der Auftakt hierfür. Auf einer Nutzfläche von fast 1.000 Quadratmetern nutzen 665 Studenten und Mitarbeiter der Fakultät das Gebäude. Ein hochwertiges Raumangebot mit Seminar- und Arbeitsräumen zwei Hörsälen, zwei Laborräumen und einem Computerpool lädt an einen Ort ein, der mehr ist als ein Ort der Wissensvermittlung: Das Hochschulgebäude eignet sich bereits heute als Forschungsobjekt für Studierende im Sinne einer projektorientierten, den Prinzipien der Nachhaltigkeit verpflichtenden Lehre

Mit diesem Gebäude soll der 13 Hektar umfassende „Grüne Campus“ der FH Erfurt um einen modernen Neubau erweitert werden. Es handelt sich um ein neues Hörsaal- und Laborgebäude für die Fakultät Gartenbau, Landschaftsarchitektur und Forst. Damit wurde auch architektonisch die Fusion der Fachrichtungen Gartenbau und Landschaftsarchitektur mit den Fachrichtungen Forstwirtschaft und Ökosystemmanagement vollzogen. Auf Basis einer in der Folge vom Büro PAD Baum + Freitag + Leesch vorgelegten Entwicklungskonzeption wurde im Jahr 2000 das Büro Gerber Architekten aus Dortmund mit der Entwurfsplanung beauftragt. Dann geriet das ganze Projekt ins Stocken. 2008 schließlich wurde das Projekt wieder aufgegriffen und vom Bauherrn neue, ambitioniertere Zielvorgaben für das Gebäude- und Energiekonzept gesetzt. In enger Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der FH Erfurt konzipierten Architekten und Fachplaner ein richtungweisendes Gebäude mit energieoptimiertem Gebäudekonzept. Der Freistaat Thüringen führte das Bauprojekt nach den Maßgaben der öffentlichen Vergabepaxis aus.

Motiviert durch die hohe Qualität des Gebäudes entschloss sich der Bauherr, an der Pilotzertifizierung des BNB für Unterrichtsgebäude teilzunehmen. Das Prädikat „Silber“ wurde mit der Note 1,74 erreicht. Das Gebäude wurde im Frühjahr 2013 in Betrieb genommen und wird seitdem einem energetischen Monitoring unterzogen.

Wie bei allen EnOB-Modellprojekten wird das Gebäude mit der Inbetriebnahme einem intensiven wissenschaftlichen Monitoring unterzogen. Dazu werden alle wesentlichen Stoff- und Energieströme über einen Zeitraum von zwei Jahren erfasst und bilanziert.

Ein besonderes Augenmerk gilt der Interaktion zwischen den verschiedenen Komponenten des Energiesystems. Der Schlüssel zu einem optimalen Zusammenspiel wird in der passgenauen Gestaltung der Raum- und Anlagenautomation gesehen. Es soll untersucht werden, ob das in der Planung definierte Automatisierungskonzept einen energieeffizienten Betrieb gewährleisten kann. Insgesamt werden 3.000 Datenpunkte aus dem Gebäude mit einer minütlichen Auflösung ausgewertet.

Mit der Nutzung einer Regenwasserzisterne als Wärmequelle und Wärmesenke wird das Potenzial dieser innovativen Anwendung untersucht. Speziell für die mit Fernwärme angetriebene Adsorptionswärmepumpe soll auf Basis der gemessenen Energieströme genauer ermittelt werden, ob sich durch deren Einsatz ökonomische und primärenergetische Vorteile ergeben. Ebenso werden die Abwärmenutzung aus der zentralen EDV-Technik, das Raumklima sowie die Nutzerzufriedenheit eingehend untersucht.

## 2 Ergebnisse in der Zusammenfassung

### 2.1 Übersicht

Tabelle 2-1 : Flächenübersicht zu Nutzungsgruppen nach DIN 277

	2013		2014	
	MWh/a	kWh/m²a	MWh/a	kWh/m²a
Endenergie Strom gesamt	88,0	48,27	83,52	45,82
Endenergie Strom Bilanzraum DIN V 18 599	60,69	33,00	53,15	29,00
Endenergie Heizen (Fernwärme, klimabereinigt Würzburg/Wetterstation)	41,21	39,25	32,46	24,41
Primärenergie Heizen (Würzburg/Wetterstation)		7,23		6,78
Endenergie RLT	24,6	13,49	17,85	9,79
Primärenergie RLT				
Endenergie Beleuchtung	23,03	12,62	23,25	12,75
Pumpen mit EDV-Kühlung	7,9	4,3	6,9	3,78

### 2.2 Bezugsflächen

Das Hörsaal- und Laborgebäude (HLG) bietet der Fakultät Landschaftsarchitektur, Gartenbau und Forst (LGF) im wesentlichen Einzelbüros und verschiedene Raumarten zur Durchführung des Unterrichts/Lehrbetriebs. Die Bezugsfläche für die Bildung flächenspezifischer Kennwerte ist die Summe der Netto-Grundflächen (NGF) nach DIN 277 [1] innerhalb der thermischen Hülle des Gebäudes, und beträgt 1.823 m².

Tabelle 2-2 : Flächenübersicht zu Nutzungsgruppen nach DIN 277

DIN 267	NGF in m²	NGF in %	Anzahl der Räume
NF 2	272	15	17
NF 3	54	3	4
NF 4	74	4	4
NF 5	492	27	5
NF 7	117	6	17
TF	290	16	19
VF	524	29	17
Summe	1.823	100	84



Insgesamt wurden 16 Büros bzw. Arbeitsräume für Professoren und Mitarbeiter realisiert. Fünf Räume für die Lehre, davon zwei Hörsäle und drei Planungslabore, nehmen 492 m<sup>2</sup> ein. Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht über die tatsächliche Nutzung der Räume entsprechend der Einteilung nach DIN V 18 599 [2] und DIN 277. Im Vergleich zur Planung weichen die Flächennutzungen nur unwesentlich voneinander ab. Charakteristisch für das Gebäude ist ein bedeutender Flächenanteil für Technikinstallationen mit ca. 290 m<sup>2</sup> und damit 16 % der NGF, welcher nicht aktiv konditioniert wird. In der Verkehrsfläche ist auch ein Foyer enthalten dessen Fläche gegebenenfalls auch einer anderen Nutzung zugeordnet werden kann

Tabelle 2-3 : Flächenübersicht zu Nutzungsrandbedingungen nach DIN V 18 599 [2]

Nutzungsrandbedingung	NGF in m <sup>2</sup>	NGF in %	Anzahl der Räume
1 (Einzelbüro)	272	15	17
16 (Sanitärräume)	82	4	13
17 (Sonstige Aufenthaltsräume)	54	3	4
18 (Nebenflächen, keine Aufenthaltsräume)	396	22	29
19 (Verkehrsflächen)	514	28	15
21 (Rechenzentrum)	13	1	1
3 (Großraumbüro)	170	9	2
9 (Hörsaal)	323	18	3

Der Baukörper erstreckt sich mit x m breite und x m länge und nimmt damit eine ein  
Ein Bruttovolumen von 8.242,4 m<sup>3</sup> ein. Aus der Gebäudehülle ergibt sich ein  $\text{DasA}/V_e = 0,449 \text{ m}^{-1}$

## 2.3 Witterung

Die Wetterdaten zur Bewertung des Heizenergieverbrauchs wurden am Standort der Leipziger Straße auf dem Dach des Gebäudes erhoben. Durch den Vergleich mit einer anderen Wetterstation in unmittelbarer Nachbarschaft, konnte die Qualität der Messdaten bestätigt werden.

## 2.4 Heizenergie

### 2.4.1 Systembeschreibung

Das örtliche Energieversorgungsunternehmen (EVU), die Stadtwerke Erfurt Energie GmbH, versorgen die Liegenschaft mit mehreren Gebäuden in der Leipziger Straße mittels Fernwärme (FW). In einer Fernwärmeübergabestation wird die Wärme mittels Wärmeübertrager an ein kurzes Verteilungsnetz übergeben. Dieses versorgt die einzelnen Gebäude in der Liegenschaft. Das untersuchte Gebäude ist Verbraucher in diesem Verteilungsnetz. Die Wärmeübergabe vom Versorgungsnetz an das Gebäude erfolgt mittels Wärmeübertrager im Gebäude. Die übertrage Wärme wird durch

einen Wärmemengenzähler erfasst. Diese Übertragung stellt die Systemgrenze der Endenergie dar. Die erfasste Energiemenge entspricht damit der Endenergie Heizen. Wärmeverluste und Aufwand für elektrische Energie der Pumpen für Übergabe der Fernwärme bis Gebäude im Verteilungsnetz bleiben unberücksichtigt.

Der Primärenergiefaktor (PE-Faktor) der bereitgestellt Fernwärme beträgt, mit der zugrunde gelegten Berechnungsmethode,  $f_{P,FW} = 0,32$  [3]. Alternative Berechnungsansätze führen zu anderen Primärenergiefaktoren. *Die primärenergetische Bewertung der bereitgestellten elektrischen Energie mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bei der Fernwärmeerzeugung ist nicht identisch mit der für die elektrische Energie im Gebäude.*

Die Fernwärme wird (nur) in der Heizperiode mit hohem Temperaturniveau von  $\theta_{VL,FW} \approx 80^\circ\text{C}$  bereitgestellt. Dieses hohe Temperaturniveau wird genutzt, um mittels einer thermisch angetriebenen **A**dsorptionswärmepumpe (AWP), Umweltenergie und Abwärme zusätzlich zur Fernwärme als Nutzenergie zur Verfügung zu stellen. Die **A**dsorptionswärmepumpe (AWP) arbeitet mit zyklischen Ad- und Desorptionsprozess der auch aus der „solaren Kühlung“ bekannt ist.

Als Umweltenergiequellen dient eine Regenwasserzisterne mit einer maximalen Füllmenge von 1.200 m³ und zwei Grundwasserbrunnen mit zusammen ca. 20 m³/h Förderleistung. Außerdem wird die Kühlung der zentralen EDV-Technik als Abwärme genutzt. Ist die Leistung der Wärmepumpe nicht mehr ausreichend, wird über einen Abzweig aus dem Hochtemperaturbereich direkt nachgeheizt. Der Einsatz der **A**dsorptionswärmepumpe (AWP) ist dem Anspruch des Einsatzes innovativer Technologien und dem Erreichen der Anforderungen des Primärenergiegrenzwertes dieses Forschungsvorhaben begründet. Aus technologischer bzw. rechtlicher (EnEV) Sicht war der Einsatz nicht notwendig.

### Energieflußschema im Heizbetrieb

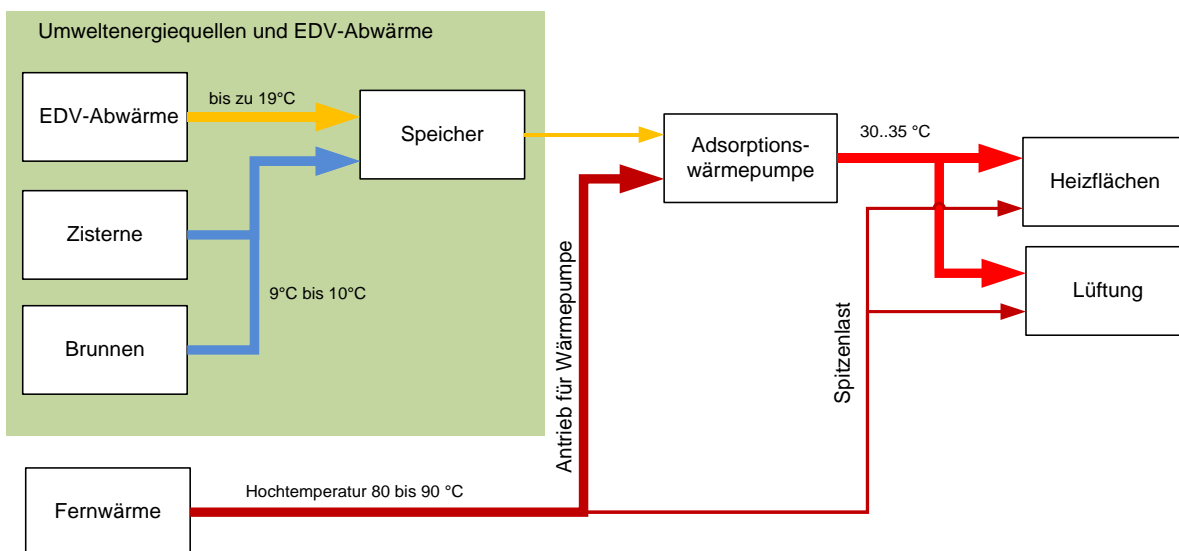


Abbildung 2-1: vereinfachte schematische Darstellung Energiefluss der Wärmeversorgung

Im Gebäude wird über thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS) die Wärme an die Räume übertragen. Die TABS sind als in Gipskarton eingelassen Kapillarrohrmatten ausgeführt. Diese aktivierten Flächen sind je nach Raumnutzung vorwiegend in den Decken aber auch in den Wänden verortet. In den Verkehrsflächen in den untersten Geschossen UG – Foyer und EG-Verbinder wurde Kapillarrohrmatten in die Fußbodenkonstruktion im Estrich verbaut. Die Räume im Gebäude werden über mehrere Heizkreise versorgt. Jeder Heizkreis wurde mit einem Wärmemengenzähler ausge-

stattet und erfasst dort die Wärmemenge die vereinfacht als „Nutzwärme“ ab Verteiler definiert wird. Die Zuordnung der Räume zu den Heizkreisen erfolgte nach Lage der Räume im Gebäude sowie der Raumnutzung. Somit ist auch für einzelne Flächennutzungsarten die Bildung spezifischer Kennwerte möglich.

## 2.4.2 Verbrauchswerte

### 2.4.2.1 End- und Primärenergieverbrauch Heizwärme

Die gemessenen Verbrauchswerte der Jahre 2013 und 2014 sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Für die Witterungsbereinigung werden zum einen die vom DWD-Veröffentlichen Klimafaktoren für den Gebäudestandort zum anderen gemessene Gradtage (ehemals Gradtagszahlen) bezogen auf das Referenzklima Potsdam verwendet. Für den Vergleich von Planungswerte und Verbrauchswerten werden die gemessene Gradtage (ehemals Gradtagszahlen) und das damals gültige Referenzklima (TRY 05 Würzburg) gewählt.

Der Verbrauch wurde mittels (Heiz)-Gradtagen mit einer Heizgrenze 12 °C, für den Standort der nächstgelegenen Wetterstation des DWD Erfurt-Weimar und mit vom DWD veröffentlichen Klimafaktoren für (Referenzstation Potsdam G20/15) witterungs- bzw. ortsbereinigt.

Der Verbrauchsreduzierung zwischen 2013 und 2014 ist auf mehrere Einflüsse zurückzuführen. Die Witterung im Jahr 2014 war deutlich milder als im Jahr 2013. Dies kann durch Heizgradtage sowie in den Klimafaktoren ausgedrückt werden. Mittels Klima- und Witterungsbereinigung kann dieser Effekt auf den Verbrauch teilweise korrigiert werden.

Bemerkenswert ist die unterschiedliche Auswirkung der Bereinigung je nach genutztem Verfahren. So ist der bereinigte Verbrauch im Jahr 2014 bei Nutzung von Heizgradtagen ( $G_{12}$  und dem langjährigen Mittel der nächstgelegenen DWD Station (Erfurt-Bindersleben) deutlich höher als bei Nutzung der Klimafaktoren (Gradtagszahlverfahren  $G_{20/15}$  Potsdam) für den Standort des Gebäudes. Im ersten Betriebsjahr wurden eine Vielzahl von Fehlern beseitigt und Optimierungsmaßnahmen durchgeführt. Dies führte zu einer deutlich Reduzierung des Verbrauchs. Das Gebäude wurde in den kalten Wintermonaten Januar und Februar 2013 noch nicht vollständig genutzt und befand sich in der Inbetriebnahme. Bei einer typischen Gebäudenutzung wäre der Verbrauch im Jahr 2013 sehr wahrscheinlich höher. Die Verbrauchsreduktion durch die Optimierung im Folgejahr damit auch.

Aus dem Endenergieverbrauch kann mittels Primärenergiefaktor der Fernwärme für Erfurt  $f_{PE} = 0,32$  der Primärenergieaufwand bestimmt werden. Mit dem gemessenen Endenergieverbrauch ergibt sich der Primärenergieaufwand für Heizen ohne Hilfsenergie im zweiten Betriebsjahr 2014 zu **7,79 kWh/m²a** und klimabereinigt **8,88 kWh/m²a** (vgl. Tabelle 2-5).

## 2 Ergebnisse in der Zusammenfassung

Tabelle 2-4 : Endenergieverbrauch Fernwärme für die Betriebsjahre 2013 und 2014

	2013	2014
absoluter Verbrauch in MWh/a		
Messwert	71,56	44,51
bereinigt mit Klimafaktor (TRY Potsdam /Wetterstation HLG) $G_{t20,15,TRY\ 4} / G_{t20,15,HGL}$	72,27	56,08
bereinigt mit Klimafaktor-DWD (PLZ 99089) Gebäudestandort	68,69	50,74
bereinigt mit Klimafaktor (TRY Würzburg /Wetterstation HLG) $G_{t20,15,TRY\ 5} / G_{t20,15,HGL}$	75,13	59,19
spezifischer Verbrauch in kWh/m² a		
Messwert	39,25	24,41
bereinigt mit Klimafaktor (TRY Potsdam /Wetterstation HLG) $G_{t20,15,TRY\ 4} / G_{t20,15,HGL}$	39,64	30,76
bereinigt mit Klimafaktor-DWD (PLZ 99089) Gebäudestandort	37,68	27,83
bereinigt mit Klimafaktor (TRY Würzburg /Wetterstation HLG) $G_{t20,15,TRY\ 5} / G_{t20,15,HGL}$	41,21	32,46

Tabelle 2-5 : Primärenergieaufwand Heizen

	2013	2014
absoluter Aufwand in MWh/a		
aus Messwert	22,90	14,24
bereinigt mit Klimafaktor (TRY Potsdam /Wetterstation HLG) $G_{t20,15,TRY\ 4} / G_{t20,15,HGL}$	23,12	17,94
bereinigt mit Klimafaktor DWD (PLZ 99089)	21,98	16,23
bereinigt mit Klimafaktor (TRY Würzburg /Wetterstation HLG) $G_{t20,15,TRY\ 5} / G_{t20,15,HGL}$	24,04	18,94
spezifischer Aufwand in kWh/m² a		
aus Messwerte	24,41	7,81
bereinigt mit Klimafaktor (TRY Potsdam /Wetterstation HLG) $G_{t20,15,TRY\ 4} / G_{t20,15,HGL}$	30,76	9,84
bereinigt mit Klimafaktor DWD (PLZ 99089)	27,82	8,9
bereinigt mit Klimafaktor (TRY Würzburg /Wetterstation HLG) $G_{t20,15,TRY\ 5} / G_{t20,15,HGL}$	31,46	10,06

Dieser vergleichsweise geringe Primärenergieaufwand für Heizen ist nicht nur die Folge des energetischen Konzeptes des Gebäudes, sondern ist auch wesentlich durch die Bereitstellung der Fernwärme und deren niedrigen PE-Faktor mit  $f_{PE} = 0,32$  bedingt [3]. Eine andere Bereitstellung bzw. eine andere Bewertung des KWK-Prozess in der Fernwärme führt zu einem anderen Primärenergieaufwand.

### 2.4.2.2 Vergleich Bedarfs- mit Verbrauchswerten

Ein Vergleich von Endenergiebedarf nach EnEV und Endenergieverbrauch, für das Jahr 2014, ist mit besonderen Einschränkungen möglich. Es ist zu beachten, dass die Anlagentechnik, in der Bedarfsberechnung, nicht vollständig abgebildet werden konnte, da die eingesetzte AWP nicht im Fundus der damaligen Fassung der DIN V 18 599 Teil 5 [4] abgebildet war. Anstelle der AWP wurde die Anlagentechnik in der Bedarfsberechnung nur auf FW basierend angenommen. Die AWP wurde nachträglich mittels ingenieurmäßiger Methodik berücksichtigt.

Die nachfolgend gegebenen Bedarfswerte für den Vergleich wurden auf der Basis des alten Referenzklimas des Standortes Würzburgs entsprechend der DIN V 18 599 Teil 10: 2007 [5] errechnet. Das Referenzklima für die Erstellung der aktuellen Klimafaktoren ist Potsdam.

Der Endenergiebedarfswert des Gebäudes ohne AWP nur mit FW betrug entsprechend **EnEV 2007 58,91 kWh/m²a**. Unter Annahme des Einsatzes einer AWP ergibt sich rechnerisch ein Bedarf von **41,24 kWh/m²a**. Die Ergebnisse für gleiches Gebäudemodell jedoch berechnet nach EnEV 2009 sind ohne AWP mit **61,47 kWh/m²a** und mit **AWP 43,03 kWh/m²a** ähnlich. Nach wirken der Optimierungsmaßnahmen im Jahr 2014 wird dieser Bedarfswert vom Verbrauchswert, dem Endenergieverbrauch Fernwärme, um 25 % unterschritten (vgl.

Tabelle 2-6). Der Verbrauchsreduzierung zwischen 2013 und 2014 ist auf mehrere Einflüsse zurückzuführen. Die Witterung im Jahr 2014 war deutlich milder als im Jahr 2013. Dies kann durch Heizgradtage sowie in den Klimafaktoren ausgedrückt werden. Mittels Klima- und Witterungsbereinigung kann dieser Effekt auf den Verbrauch teilweise korrigiert werden.

Bemerkenswert ist die unterschiedliche Auswirkung der Bereinigung je nach genutztem Verfahren. So ist der bereinigte Verbrauch im Jahr 2014 bei Nutzung von Heizgradtagen (G12 und dem langjährigen Mittel der nächstgelegenen DWD Station (Erfurt-Bindersleben) deutlich höher als bei Nutzung der Klimafaktoren (Gradtagszahlverfahren G20/15 Potsdam) für den Standort des Gebäudes. Im ersten Betriebsjahr wurden eine Vielzahl von Fehlern beseitigt und Optimierungsmaßnahmen durchgeführt. Dies führte zu einer deutlich Reduzierung des Verbrauchs. Das Gebäude wurde in den kalten Wintermonaten Januar und Februar 2013 noch nicht vollständig genutzt und befand sich in der Inbetriebnahme. Bei einer typischen Gebäudenutzung wäre der Verbrauch im Jahr 2013 sehr wahrscheinlich höher. Die Verbrauchsreduktion durch die Optimierung im Folgejahr damit auch.

Aus dem Endenergieverbrauch kann mittels Primärenergiefaktor der Fernwärme für Erfurt  $f_{PE} = 0,32$  der Primärenergieaufwand bestimmt werden. Mit dem gemessenen Endenergieverbrauch ergibt sich der Primärenergieaufwand für Heizen ohne Hilfsenergie im zweiten Betriebsjahr 2014 zu **7,79 kWh/m²a** und klimabereinigt **8,88 kWh/m²a** (vgl.

Tabelle 2-5).

Tabelle 2-4

Tabelle 2-6: Vergleich verschiedener Bedarfs- und Verbrauchswerte der Endenergie für Heizen, abs. = absolute Differenz Bedarfswert und Verbrauchswert in kWh/m²a, % bezogen auf den Bedarfswert

Berechnungsreferenz mit und ohne Adsorptionswärmepumpe (AWP)	Bedarfs- werte	Verbrauchswerte für Betriebsjahr 2014 mit unterschiedlichem Ansatz der Klimabereinigung					
		TRY Potsdam /Wetterstation HLG		Klimafaktor-DWD		TRY Würzburg /Wetterstation HLG	
		30,76 kWh/m²a		27,83 kWh/m²a		32,46 kWh/m²a	
	kWh/m²a	abs.	%	abs.	%	abs.	%
EnEV 2007	58,91	-28,2	-48	-31,1	-53	-26,5	-45
EnEV 2007 + AWP	41,24	-10,5	-28	-13,4	-33	-8,8	-21
EnEV 2009	61,47	-30,7	-50	-33,6	-55	-29,0	-47
EnEV 2009 + AWP	43,03	-12,3	-29	-15,2	-35	-10,6	-25

## 2.5 Elektrische Energie

### 2.5.1 Vorbemerkung

Für die Verbrauchserfassung der elektrischen Energie wurde das Messkonzept so angelegt, möglichst nach Nutzungsrandbedingung bzw. Nutzungszonen der EnEV, sowie Verbrauchsart

Tabelle 2-7: Schwerpunkte der Verbrauchserfassung elektrischer Energie

Nutzungszonen	Verbraucherguppen
Arbeitsräume/ Büros	künstliche Beleuchtung nach Zonen
Unterrichtsräume	Arbeitsmittel (PC, Drucker) nach Zonen
Verkehrsflächen	Antrieb für Pumpen
	Antrieb Ventilatoren RLT-Anlagen

differenziert die Energieströme erfassen zu können. Dabei standen vor allem die folgenden Räume bzw. Zonen und Verbrauchsarten im Fokus. Aus der detaillierten Erfassung können Teilverbrauchswerte gebildet werden.

### 2.5.2 Künstliche Beleuchtung

Die Leuchtmittel zur künstlichen Beleuchtung in den Büros und Unterrichtsräumen wurde aus wirtschaftlichen Gründen mittels Leuchtstoffröhren (Planung des Gebäudes 2008) dargestellt. In den Verkehrswegen kommen grundsätzlich LED-Leuchtmittel zum Einsatz. Nur im Bereich des Foyer und der Treppe im Foyer kommen auch Leuchtstoffröhren für die Verkehrswege zum Einsatz. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Gebäudes im Ende 2012 hatte sich Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von LED deutlich verbessert. Mit Ausnahme der Monate Januar und Februar im Jahr 2013 war das Gebäude in der Regelnutzung. Für die Zählung der Beleuchtung wurde insgesamt acht Elektroenergiezähler (EZ) installiert. Mit der Umgesetzten Zählerstruktur kann der Aufwand für Beleuchtungsenergie entsprechend der Nutzungsrandbedingung bzw. Raumzonen erfasst werden.

### 2.5.3 Lüftungsanlagen

Im Gebäude versorgen drei raumluftechnische Anlagen (RLT Anlagen) fünf Unterrichtsräume. Es werden die thermodynamischen Behandlungsfunktionen Heizen und Kühlen umgesetzt. Über jeweils einen Rotor wird Wärmerückgewinnung realisiert.

Tabelle 2-8: Verbrauchswerte elektrischer Energie der RLT-Anlagen für die Betriebsjahre 2013 und 2014

	Einheit	2013	2014
absoluter Verbrauch	MWh/a	24,61	17,86
spezifischer Verbrauch (nur RLT versorgte Räume)	kWh/m²a	41,29	29,96
spezifischer Verbrauch (gesamte Energiebezugsfläche)	kWh/m²a	13,5	9,79

Tabelle 2-9: Primärenergieaufwand für Betrieb RLT-Anlagen für die Betriebsjahre 2013 und 2014

	Einheit	2013	2014
absoluter Verbrauch	MWh/a	63,99	46,49
spezifischer Verbrauch (nur RLT versorgte Räume)	kWh/m²a	107,35	77,90
spezifischer Verbrauch (gesamte Energiebezugsfläche)	kWh/m²a	35,1	25,45

### 2.5.4 Hilfsenergie Pumpen

Die nachstehende

Tabelle 2-10 zeigt den mittels Elektroenergiezähler gemessen Elektroenergieverbrauch der Pumpen. Ausnahme hiervon sind sieben Umwälzpumpen der RLT-Anlagen sowie die Pumpe der EDV-Kühlung.

Tabelle 2-10 : Verbrauchswerte elektrischer Energie für Hilfsenergie Pumpen

	Einheit	2013	2014
absoluter Verbrauch	MWh/a	7,3	6,6
spezifischer Verbrauch (gesamte Energiebezugsfläche)	kWh/m²a	4,0	3,6
spezifischer Verbrauch nur Heizen (gesamte Energiebezugsfläche)	kWh/m²a	2,3	2,1
spezifischer Verbrauch nur Kühlen (gesamte Energiebezugsfläche)	kWh/m²a	1,34	1,38

### 2.5.5 Bilanzierung außerhalb DIN V 18 599 Bilanzraum

Nicht zum Bilanzraum der EnEV gehört der Verbrauch im Gebäude der nicht Gegenstand der DIN V 18 599 ist. Dazu gehört der Verbrauch elektrischer Energie für Arbeitsgeräte, der zentralen EDV-Technik, der Aggregate zur Kühlung der EDV-Technik. Die Aggregate zur Kühlung der EDV-Technik sowie die Abwärme aus der EDV-Kühlung sind systemisch mit der Haustechnik verbunden. Die detaillierten Ergebnisse sind in Abschnitt 11 dargestellt

## 2.6 Trinkwasser

Im Gebäude sind insgesamt vier WC-Räume jeweils für Frauen und Männer, dazu zwei Teeküchen mit der Möglichkeit der Trinkwasserentnahme vorhanden. Der Trinkwasserverbrauch zwischen den Monaten unterscheidet sich deutlich. In den Küchen steht warmes zur Verfügung welches dezentral durch Untertischgeräte erwärmt wird.

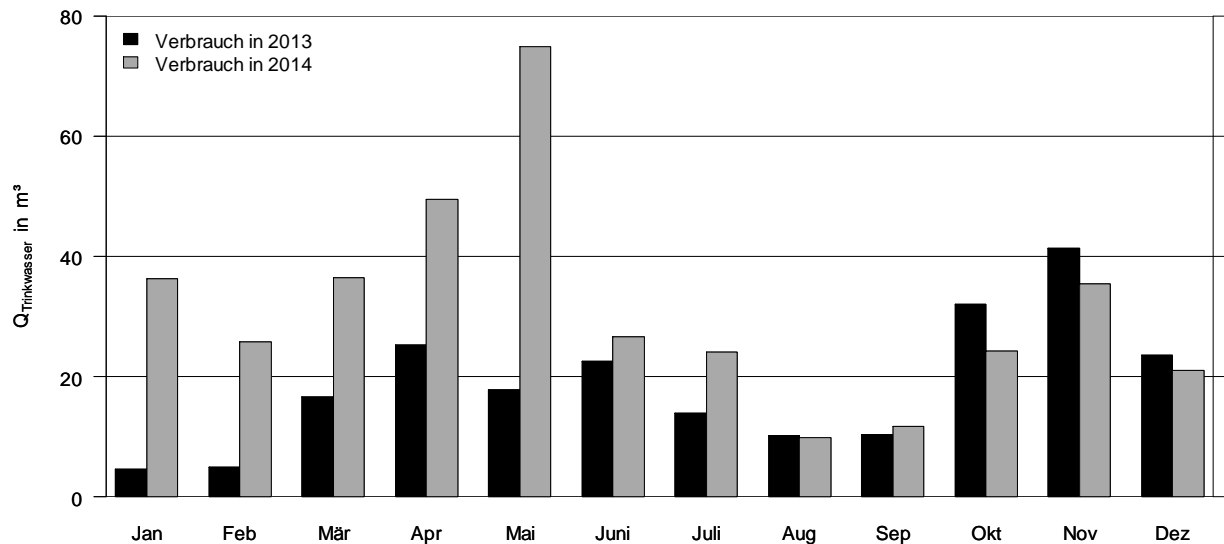


Abbildung 2-2: Monatssummen des Trinkwasserverbrauchs

Neben dem Verbrauch durch die Gebäudenutzer, ist automatisch eine Spülfunktion für den Wasserfilter der Regenwasserzisterne und eine Hygienespülung vorgesehen, die einen regelmäßigen Verbrauch verursachen. Im ersten Jahr 2013 betrug der Jahresverbrauch 223,8 m³ im zweiten Jahr 2014 375,6 m³. Der vergleichsweise geringe Trinkwasserverbrauch der Monate Januar und Februar 2013 ist auf die fehlende Gebäudenutzung zurückzuführen.

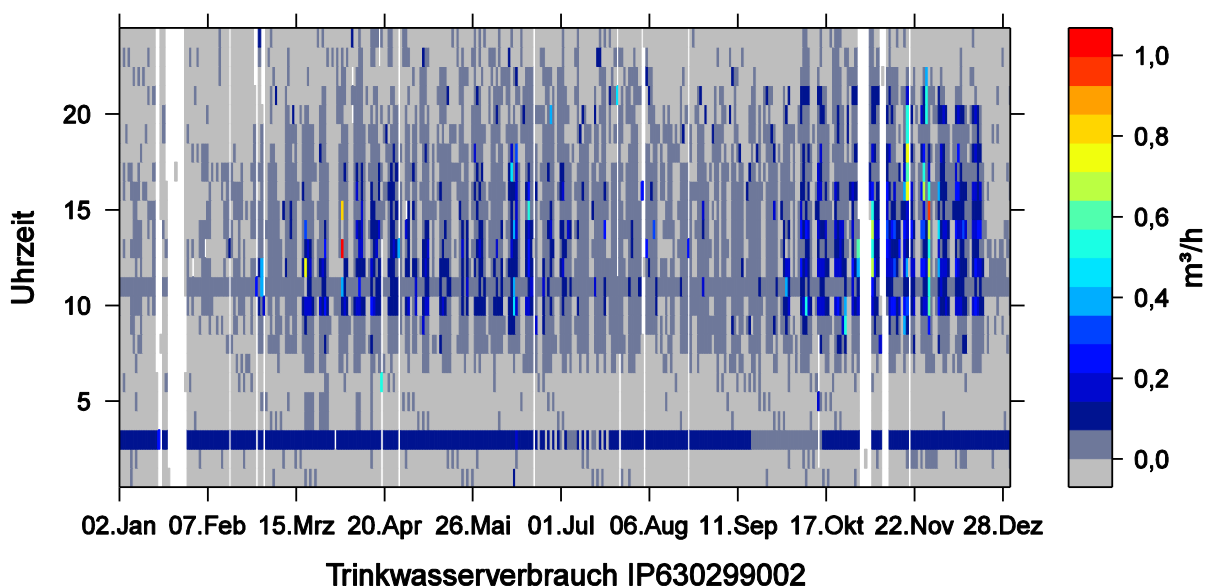


Abbildung 2-3: Carpetplot Stundenwerte des Trinkwasserverbrauchs 2013

Tabelle 2-11 : Verbrauchswerte Trinkwasser –Kalt



	Einheit	2013	2014
absoluter Verbrauch	m <sup>3</sup> /a	7,3	6,6
spezifischer Verbrauch (gesamte Energiebezugsfläche)	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> a	4,0	3,6

## 3 Gebäudeerrichtung Bauprozess

### 3.1 Organisation

#### 3.1.1 Bauprojektlenkung

Bauherr ist der Freistaat Thüringen. Die Projektleitung wurde durch das Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr (ehemals Staatsbauamt) durchgeführt. Die federführende Projektleitung wurde durch Abteilung Hochbau übernommen. Während des Projektverlaufs wechselte vor der Fertigstellung der zweiten HU-Bau die Sachbearbeitung im Bereich Hochbau. Zusätzlich wurden die Gewerke TGA, ELT einschließlich GA durch einen Sachbearbeiter betreut. Der Gebäudenutzer ist die Fachhochschule Erfurt. Aufgrund des hohen Innovationsgrades des Gebäudeprojektes wurde seitens des Nutzers zu Beginn des Projektes eine befristete Stelle für die Begleitung des Bauvorhabens geschaffen. Im Verlauf der Gebäudeerrichtung musste die Stelle neu besetzt werden, was hohen Informationsverlust bedeutet und die Inbetriebnahme erschwerte.

Die Vertreter der Nutzer wirkten vor allem bei der Konkretisierung der Planung für HU-Bau und AFU-Bau mit. Während der Bauphase wurden Abstimmungen für die Integration der Baustelle in den Liegenschaftsbetrieb notwendig sowie Festlegungen für die zentrale technische Infrastruktur wie z.B. GLT, Schließsystem.

#### 3.1.2 Freiberuflich Tätige

Die freiberuflichen Tätigen, also der Architekt Objektplaner und die Fachplaner, erbrachten im üblichen Rahmen der HOAI Planungsleistungen. Insbesondere die HKL Ingenieurgesellschaft war federführend in der Koordinierung und Abstimmung der Gewerke GA, HLK und Elektro.

Architektur und Hochbau, Bauleitung	Gerber Architekten, Dortmund
Bauphysik und Tragwerk	Ingenieurbüro Dr. Krämer GmbH, Weimar
Heizung, Lüftung, Sanitär und Gebäudeautomation	HKL Ingenieurgesellschaft, Erfurt
Elektroinstallation	Ingenieurgesellschaft SBS, Apolda
Akustik- und Schallschutz	Akustik- und Schallschutz Rosenheinrich, Weimar

#### 3.1.3 Einbindung des Monitoring-Team in den Planungs- und Bau

Im Rahmen der Planung- und Durchführung des Bauvorhabens konnten durch das Monitoring-Team bzw. im Rahmen studentischer Arbeiten Leistungen erbracht, die auch dem Leistungsbild der Fachplaner ergänzten und teilweise Eingang in die Planung fanden.

- Energiekonzept
- Energiebedarfsberechnung
- Grundlagen Messkonzept Elektro, TGA und Meteorologie
- Thermische Gebäudesimulation
- Gebäudeautomation VDI 3814 Blatt 6

- Wärmebrückenberechnung
- Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067 für ausgewählte Komponenten
- Mitwirkung bei der Abnahme Gebäudeautomation und Messtechnik
- CFD-Simulation der Raumluftrömung

### 3.1.4 Ausführenden Unternehmen

Insgesamt wurde 28 Leistungsbereiche bzw. Gewerke durch den AG vergeben. Als ausführenden Unternehmen, bzw. Auftragnehmer (AN) werden die Unternehmen bezeichnet die mit der Ausführung eines oder mehreren der Leistungsbereiche beauftragt wurden.

Hervorzuheben sind insbesondere aus energetischer Sicht die folgenden Gewerke:

Heizanlagen und Kältetechnik	Forberg Haustechnik, Erzgebirgskreis, Sachsen
Raumluftechnische Anlagen	Käppler Haustechnik, Gräfenonna, Thüringen
Stark- und Schwachstrom	WEA Wärme- und Energieanlagenbau GmbH, Erfurt
Gebäudeautomation und Messtechnik	B&S Automatisierungssysteme Erfurt GmbH,
Export Messdaten und Einbindung in Liegenschafts GLT	Hollandt Elektrik, Kleinschmalkalden, Thüringen
Trockenbau (Heiz- und Kühldecken)	Wilfrid Lorenz GmbH & Co. KG, Südeichsfeld, Thüringen
Wärmedämmung an technischen Anlagen	Mock Isoliertechnik, Erfurt, Thüringen
Fassadenarbeiten	SFB <i>Schwengber</i> GmbH & Co.Kg Greiz, Thüringen
Rohbau	Constructor Bau, Ilmenau, Thüringen

### 3.2 Bauzeitenplanung

Mit der HU-Bau wurde ein Rahmenterminplan für das Bauvorhaben definiert. Dieser Plan war auch Grundlage für die Zeitplanung dieses Monitoring-Projektes.

Tabelle 3-1: Rahmenterminplan des Bauablaufs Stand 28. November 2008 aus [6]

Abgabe HU-Bau		19.12.08
Genehmigungsplanung	3 Monate	01.01.09 - 31.04.09
AFU-Bau	12 Monate	01.08.09 - 31.10.10
Vergabe Bauleistungen	12 Monate	01.10.09 - 31.07.10
Ausschreibung Rohbau	3 Monate	01.08.09 - 30.11.09
Bauzeit	18 Monate	01.12.09 - 31.07.11

### 3.3 Baustörung und Bauzeitenverzug

Der tatsächliche Bau- und Projektverlauf war jedoch deutlich verzögert und blieb hinter der Planung zurück. Die Rohbauarbeiten mit Erdarbeiten wurden im März 2010 [7] vier Monate später als geplant ausgeschrieben. Im Mai 2010, sechs Monate später als geplant, wurde das Baufeld eingerichtet. Zum 29.03.2010 wurden die LV für die technischen Gewerke HLS, ELT, GA veröffentlicht [8]. Das Gewerk Fassade wurde im Juli 2010 vergeben [9]. Richtfest wurde am 26. Oktober 2010

### 3 Gebäudeerrichtung Bauprozess

gefeiert. Zum Winter 2012 wurde die Gebäudehülle geschlossen und eine Baubeheizung eingerichtet. Ende 2011 wurde ein neuer Fertigstellungstermin im 2. Quartal in 2012 avisiert.

In der 33. Kalenderwoche im Jahr 2012 wurde für die technischen Gewerke Lüftung, Heizung, Sanitär die VOB-Endabnahmen anberaumt. Bis zum 06.11.2012 wurden Nachabnahmen durchgeführt. Erst Anfang 2013 konnte die Endabnahme für das Gewerk GA durchgeführt werden.

Die nachfolgende Zusammenstellung der wichtigsten Eckpunkte gibt eine Übersicht zum tatsächlichen Bauverlauf.

Tabelle 3-2: Übersicht zu wesentlichen Eckpunkten des Bauverlaufs

Ausschreibung Vergabe Rohbau	1 Monat	März 2010 bis April 2010
Ausschreibung Vergabe technische Gewerke	1 Monat	April 2010 bis Mai 2010
Ausschreibung Vergabe Fassade	1 Monat	Juni 2010 bis Juli 2010
Baubeginn (Baugrube)		Mai 2010
Rohbau (Hauptgebäude)	7 Monate	Juni 2010 bis Dezember 2010
mit Verbinderbau	11 Monate	Juni 2010 bis April 2011
Fassade	15 Monate (mit Unterbrechungen)	März 2011 bis Juni 2012
Innenausbau	20 Monate	März 2011 bis November 2012
Bauzeit	31 Monate	Mai 2010 bis Dezember 2012
Endabnahmen Innenausbau, technische Gewerke		August 2012
Messbeginn		Januar 2013
Nutzungsbeginn		März 2013
Schlussabnahme letztes Gewerk Gebäudeautomation		Dezember 2012
Resteleistungen nach Abnahme Gebäudeautomation		bis September 2013

Hauptgründe für die Verzögerungen war eine verzögerte Ausschreibung, ein harter Winter 2011/12 sowie Baustörungen im Gewerk Fassade und Trockenbau. Die Leistungen der technischen Gewerke (RTL, Heizung, Kälte, ELT) wurden ohne wesentliche Störung im Rahmen des allgemeinen Baufortschritts erbracht. Insbesondere die mangelfreie Fertigstellung des Gewerks Gebäudeautomation erforderte, teils aufgrund der komplexen Anforderungen, teils aufgrund fehlerhafter Einbauobjekte einen sehr hohen Aufwand für alle Baubeteiligten. Aus gegebenen Plan- und Istverlauf wird deutlich, dass das Bauprojekt im sehr hohen Maß aus verschiedenen Gründen zeitverzögert errichtet wurde.



Abbildung 3-1: links: Blick auf den Verbinder fertiggestellter Rohbau (April 2012);rechts: Blick auf den Rohbau mit Beginn Fassadenarbeiten (April 2012)

Da das Monitoring-Projekt an den Baufortschritt gebunden war, bedeutete dies eine erhöhte Zeitdauer für die Durchführung des Projektes. So musste vor der Ausschreibung der Gebäudeautomation das Messkonzept erstellt werden. Während der langen Bauphase wurde der Einbauder Messtechnik überwacht.

### 3.4 Planungshistorie Heiz- und Kühldecken

Ein wesentliches Element des Energiekonzeptes ist die Wärmeübertragung im Raum. Hierzu werden im gesamten Gebäude thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) in Form von in aktivierten Gipskartonplatten genutzt. In die Gipskartonplatten sind Kapillarrohrmatten eingelassen.

In der Ursprungsvariante waren konventionelle Heizkörper und keine Flächenkühlung vorgesehen. Für die energetische Überarbeitung des Entwurfs, hin zu Energie optimierten Bauens wurde die Nutzung von Flächenkühlsystemen als Betonkernaktivierung (BKT) vorgesehen.

In der HU-Bau vom 28. November 2008 wurden ein System mit Wärmeleitblechen an den Trockenbauwänden vorgesehen. Im Rahmen der AFU wurde von den Planungsbeteiligten der Einsatz oberflächennahe in Filigrandecken zur Temperierung des Gebäudes angedacht. Dieses wurde später verworfen. Im Planungsprozess stellte sich für die die Fachplaner TGA und Akustik die Aufgabe Flächen für Temperierung und für akustische Maßnahmen festzusetzen. Dabei sollten zunächst die thermisch aktivierten Flächen ausschließlich an der Decke und die akustischen Maßnahme an den Wänden verortet werden. Auf Basis der Kühl- und Heizlastberechnung musste jedoch festgestellt werden, dass zur Abdeckung der thermischen Leistung auch Wandflächen genutzt werden müssten. Dies führte zu einer Nutzungskonkurrenz zwischen Temperierung und Akustik. Zur Lösung des Problems wurde das zunächst favorisierte System zur Temperierung verworfen und ein System ausgewählt in dem sowohl Akustik wie auch Temperierung realisiert werden kann. Mit dem System der Kapillarrohrmatten mit gelochten Akustikplatten kann die Fläche für beide Zwecke genutzt werden. Nach der Wahl dieses Systems wurde die Decken verstärkt für akustische Funktionen genutzt. Vor dem Hintergrund der angestrebten „Integralen Planung“ erscheint es bemerkenswert, dass dieser Umstand dem Fachplaner Hochbau bzw. Architekt, erst mit der Fertigstellung des LV TGA als Systemwechsel offenbar wurde.

### 3.5 Errichtungskosten

Laut der Aufstellung im Landeshaushaltsplan des Freistaats Thüringen 2013/14 betrugen die Gesamtausgaben für die Errichtung des Gebäudes 6,492 Mio. Euro. Von diesen Kosten wurden 75

### 3 Gebäudeerrichtung Bauprozess

v.H. durch Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung mitfinanziert [10]. Dabei wurde der Kostenansatz der HU-Bau vom 29.05.2009 um 1,317 Mio Euro überschritten. Die Kostenschätzung zur ersten HU-Bau bzw. Bauantrag zum Bauantrag 2007 schloss mit 4,165 Mio Euro [11].

Tabelle 3-3: Historie der Kostenplanung und tatsächliche Gesamtausgaben für die Errichtung des Hörsaal- und Laborgebäudes in der Leipziger Str. in Erfurt

	Betrag in Mio. €	Quelle
geschätzte Kosten lt. Bauantrag: vom 06.03.2007	4,165	[11].
HU-Bau vom 29.05.2009	5,175	[10]
1. NHU-Bau vom 26.05.2011	0,792	
2. NHU-Bau vom 20.12.2011	0,525	
Gesamtausgaben nach Haushaltsplan 2013/2014	6,492	

Die Kostensteigerung kann nicht losgelöst von den erhöhten energetischen Standards und den innovativen Komponenten gesehen werden. Jedoch sind u.U. auch andere Einflussfaktoren von Bedeutung. Beispielsweise erhöhte sich der Baupreisindex zwischen 2007 und 2011 um 8,5 % von 94 auf 102 Indexpunkte [12]. Ein weiterer Grund könnte die gute Auftragslage der ausführenden Unternehmen durch das Konjunkturpaket II sein.

## 4 Architektur und Bauphysik

### 4.1 Gebäude

Das Gebäude dient als Erweiterungsbau des traditionsreichen „Grünen Campus“ für die Fakultät Gartenbau, Landschaftsarchitektur und Forst am Standort der Leipziger Straße in Erfurt. Die bestehenden Altbauten und der Hauptkörper des Neubaus wurden über einen Verbinderbau mit miteinander verknüpft. Das eingeschossige Verbindungsbauwerk ist Bestandteil des Neubaus. Der nördlich vom Altbau verortete Neubau nimmt die vorhandene Situation auf und gliedert sich in diese ein. Durch eine Absenkung des Geländes vor dem Hörsaal und Foyer wird über alle drei Geschosse eine optimale Versorgung mit Tageslicht erreicht. Das Gebäude besteht aus Unter-, Erd- und Obergeschoss. Das Erdgeschoss umfasst ein eingeschossiges Verbindungsbauwerk zum Altbau. Dem Untergeschoss ist das große Foyer und der große Hörsaal sowie Funktionsflächen zuzurechnen. Im Obergeschoss lockert eine große Terrasse den Baukörper auf. Das Foyer bildet mit einem sich über alle Geschosse erstreckenden Luftraum mit Treppe das Zentrum des Neubaus. Aus der Südseite des Neubaus und dem Verbindungsgang heraus besteht Einsicht in eine Hofsituation die zwischen Neu- und Altbau entsteht. Über eine Rampe und einen Fahrstuhl wird eine weitgehende Barrierefreiheit erreicht. Im Zuge der angedachten Sanierung der Altbauten soll das Verbindungsbauwerk zwischen den beiden Baukörpern des Altbaus fortgesetzt und den neuen Hauptzugang zu Neu und Altbau bilden. Dazu wird der bestehende Hörsaal im Altbau abgerissen. Temporär wurde der Verbinder mit Zugang zum Altbau angeschlossen.

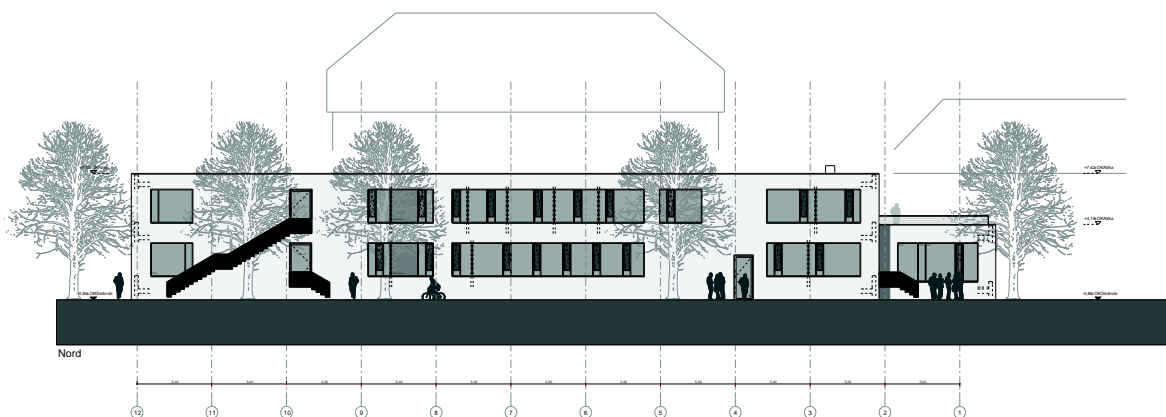


Abbildung 4-1: Ansicht Nord [13]

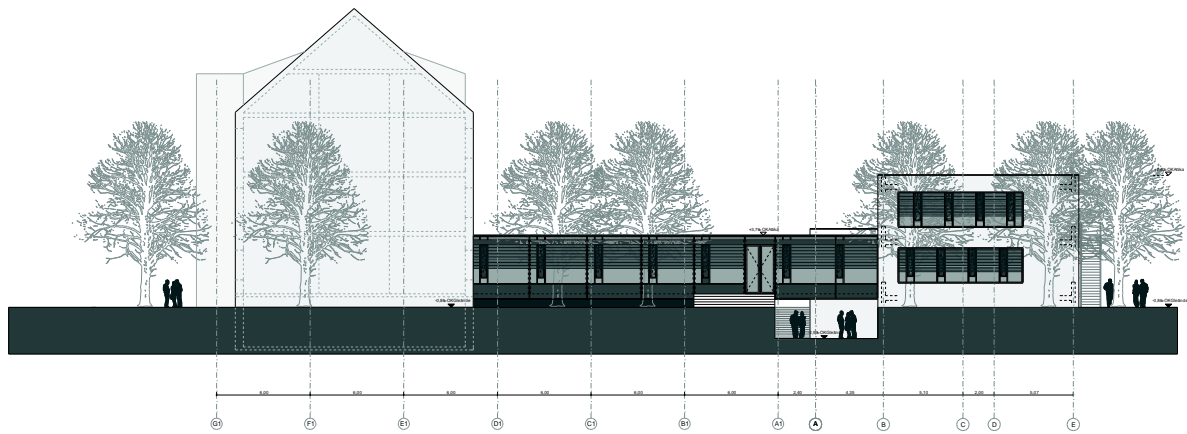


Abbildung 4-2: Ostansicht [13] links Altbau, in der Mitte Verbinderbauwerk, rechtes Neubau

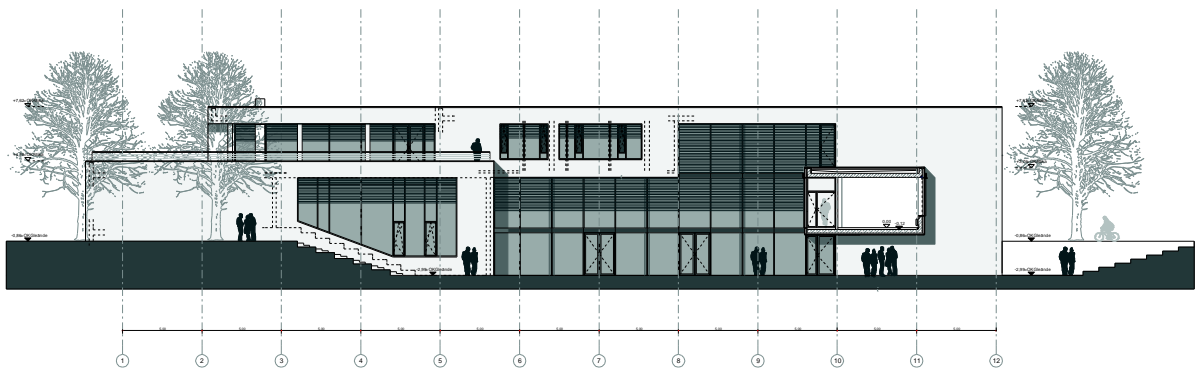


Abbildung 4-3: Südansicht [13]

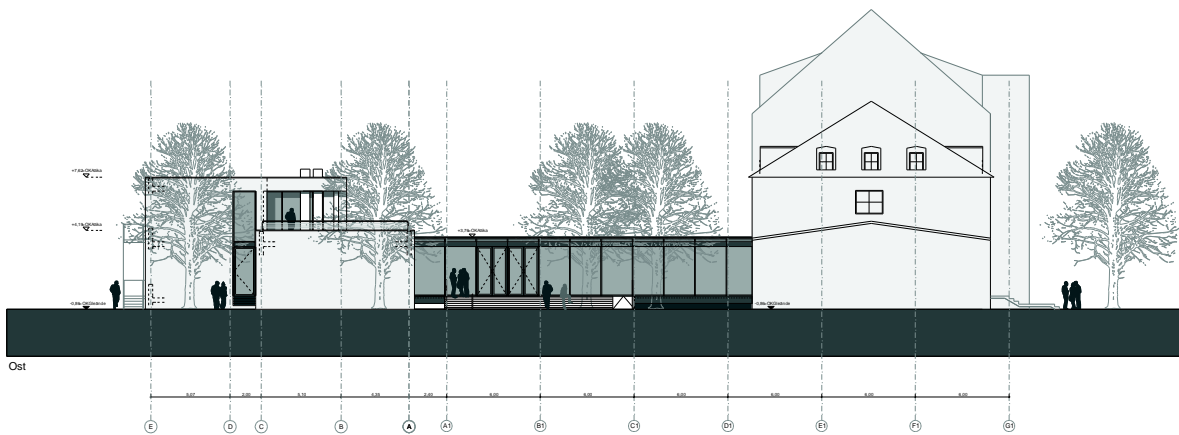


Abbildung 4-4: Westansicht [13]



Abbildung 4-5: Blick auf die Südseite [14]





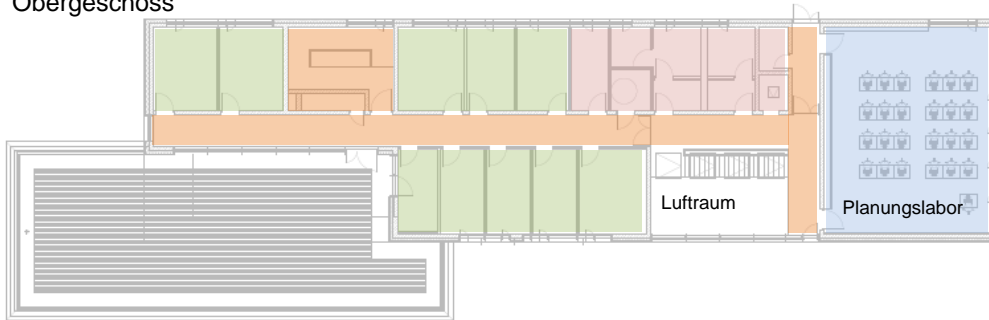
Abbildung 4-6: links: Blick von Nord-Ost, rechts: Blick auf das Verbindungsbauwerk Ostseite



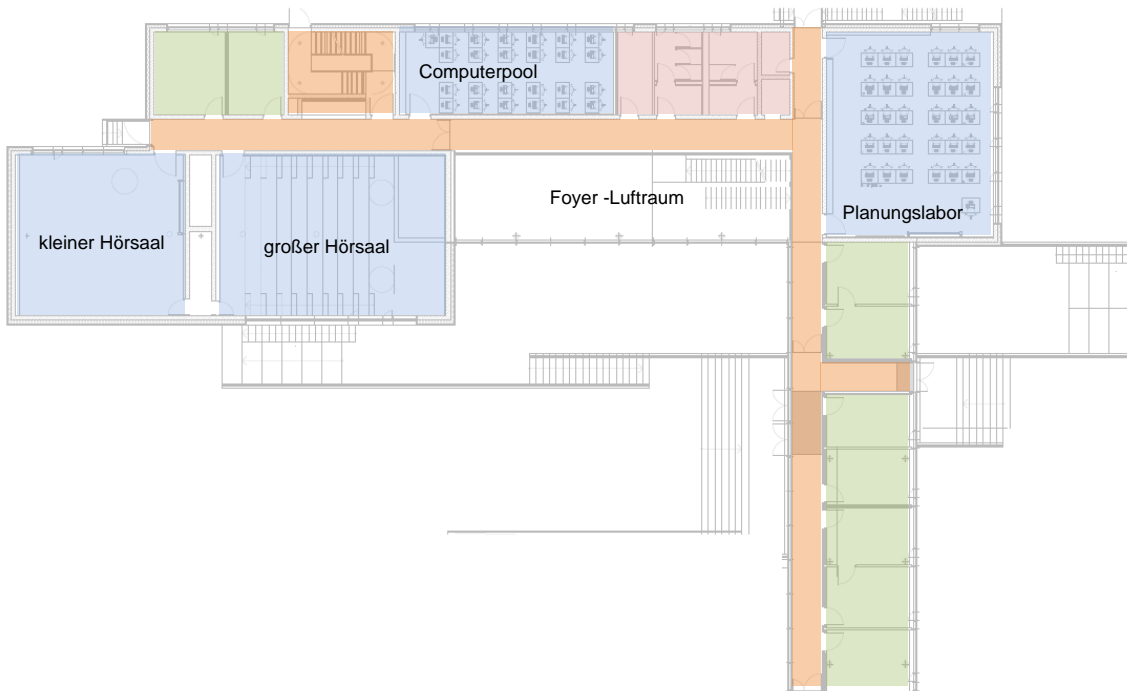
Abbildung 4-7: links: Blick Verbinder Westseite, rechts: Blick auf Nordseite

In der nächsten Abbildung sind die Grundrisse der drei Geschosse mit Markierung nach Raumnutzung dargestellt. Der „große Hörsaal“ mit einer abgetreppten Bestuhlung erstreckt sich über zwei Geschosse. Das Foyer mit Luftraum nimmt drei Geschosse ein.

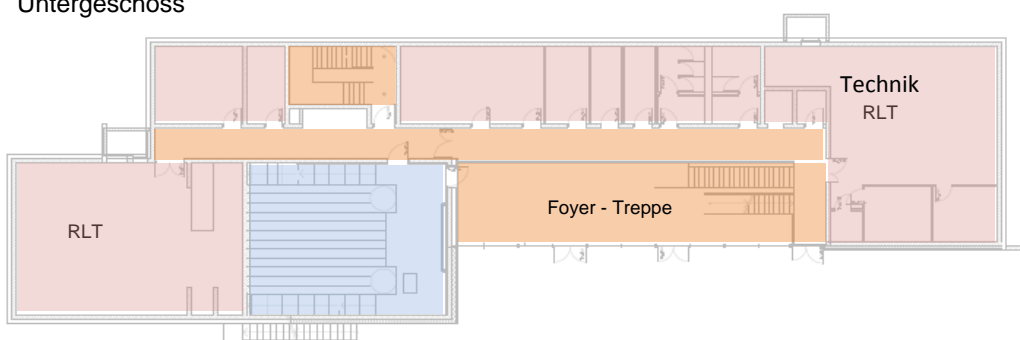
Obergeschoss



Erdgeschoss



Untergeschoss



- Hörsaal, Seminarraum
- Arbeits- und Büroräume
- Nebenräume
- Verkehrsfläche

Abbildung 4-8: Grundrisse der Geschosse mit Raumnutzung [15]

## 4.2 Flächen

Das Hörsaal- und Laborgebäude (HLG) bietet der Fakultät Landschaftsarchitektur, Gartenbau und Forst (LGF) im wesentlichen Einzelbüros und verschiedene Raumarten zur Durchführung des Unterrichts/Lehrbetriebs. Die Bezugsfläche für die Bildung flächenspezifischer Kennwerte ist die Summe der Netto-Grundflächen (NGF) nach DIN 277 [1] innerhalb der thermischen Hülle des Gebäudes und beträgt  $A_{NGF} = 1.823 \text{ m}^2$ .

Insgesamt wurden 16 Büros bzw. Arbeitsräume für Professoren und Mitarbeiter realisiert. Fünf Unterrichtsräume, davon zwei Hörsäle und drei Planungslabore, nehmen eine Fläche von  $492 \text{ m}^2$  ein. Die nachfolgenden Tabellen (

Tabelle 4-1 und

Tabelle 4-2) geben eine Übersicht über die tatsächliche Nutzung der Räume entsprechend der Einteilung nach DIN V 18 599 [2] und DIN 277. Im Vergleich zur Planung weichen die Flächennutzungen nur unwesentlich voneinander ab. Eine Abweichung zwischen Planung und tatsächlichen Betrieb stellt sich in zwei Punkten dar. Es kann festgestellt werden, dass die Fläche für Einzelraumbüros zu Lasten der Fläche für Lager und Werkstatt verschoben wurde. Außerdem wird die Fläche des Foyers des Gebäudes in der Planung als HNF 5 nach DIN277:1998 mit  $A = 107,44 \text{ m}^2$  ausgewiesen, tatsächlich wird dieser Bereich als Verkehrsfläche (VF DIN 277) oder als Pausenraum NF 1 genutzt. Auch für die Bildung spezifischer Kennwerte wird nachfolgend eine Übersicht zu den Gebäudeflächen gegeben.

Tabelle 4-1 : Flächenübersicht zu Nutzungsgruppen nach DIN 277

DIN 277	NGF in $\text{m}^2$	NGF in %
NF 2	272	15
NF 3	54	3
NF 4	74	4
NF 5	492	27
NF 7	117	6
TF	290	16
VF	524	29
Summe	1.823	100

Charakteristisch für das Gebäude ist ein bedeutender Flächenanteil für Technikinstallationen, mit ca.  $290 \text{ m}^2$  und damit 16 % der NGF. Dieser Teil des Gebäudes wird nicht aktiv konditioniert. In der Verkehrsfläche ist auch das Foyer enthalten, dessen Fläche gegebenenfalls auch der Nutzungsgruppe Unterricht oder Aufenthaltsfläche zugeordnet werden kann.

Den Räumen können verschiedenen Nutzungsrandbedingungen nach DIN V 18599 Teil 10 zugeordnet werden. Dabei ist unter Kenntnis der angedachten oder tatsächlichen Gegebenheiten der Raumnutzung ein Nutzungsprofil zu wählen. Für die Räume mit Nutzung als Einzelbüro, Verkehrsfläche, Hörsaal, WC-Sanitär, Serverraum, Lager und Technik kann dies eindeutig erfolgen. Für die Unterrichtsräume „kleiner Hörsaal“, „Planungslabore“ im EG und OG, sowie „PC-Pool“ im EG sind Festlegungen zutreffen. So werden die Räume „kleiner Hörsaal“ und „Planungslabor OG“ als Se-

minarraum ohne Arbeitsplatzrechner, die Räume „Planungslabor EG“ und „Computerpool“ mit Arbeitsplatzrechner genutzt. Die Räume mit Arbeitsplatzrechnern können außerhalb der Lehrveranstaltungen durch die Studierenden zur eigenständigen Arbeit genutzt werden. Die Räume „kleiner Hörsaal“ und „Planungslabor OG“ entsprechen daher der Nutzung Seminarraum/Hörsaal die Räume „Planungslabor EG“ und „Computerpool“ dem Nutzungsprofil „Großraumbüro“.

Tabelle 4-2 : Flächenübersicht der tatsächlichen Nutzung zu Nutzungsrandbedingungen nach DIN V 18 599-10 [2]

Nutzungsrandbedingung	NGF in m <sup>2</sup>	NGF in %	Anzahl der Räume
1 (Einzelbüro)	272	15	17
16 (Sanitärräume)	82	4	13
17 (Sonstige Aufenthaltsräume)	54	3	4
18 (Nebenflächen, keine Aufenthaltsräume)	396	22	29
19 (Verkehrsflächen)	514	28	15
21 (Rechenzentrum)	13	1	1
3 (Großraumbüro)	170	9	2
9 (Hörsaal)	323	18	3

Die durch eine RLT-Anlage versorgten Aufenthaltsräume machen in Summe 27 % der NGF aus.

### 4.3 Wärmeschutznachweis

#### 4.3.1 Vorbemerkungen

Im Verlauf des Projektes und der Umsetzung des Bauvorhabens wurden verschiedene Nachweise zum Wärmeschutz und des energiesparenden Baues erstellt. Im Rahmen der Antragstellung für das Monitoring-Projekt wurde der Energiebedarf entsprechend der DIN V 18599 (Stand EnEV 2007) ermittelt. Auf Basis desselben Gebäudeentwurfs wurde im Verlauf des Projektes der Energiebedarf Stand nach DIN V 18599 (Stand EnEV 2009) erneut bestimmt. Diese Nachweise konnte auch im Rahmen der Zertifizierung nach BNB genutzt werden. Diese Nachweise sind im Abschnitt 8 Seite 116 dargestellt. Diese Berechnungen konnten nicht für den Bauantrag genutzt werden. Die Randbindungen und Ergebnisse des Nachweises für den Bauantrag sind nachfolgend dargestellt

#### 4.3.2 Förmlicher Wärmeschutznachweis

Unabhängig von den oben genannten Berechnungen wurde für das baurechtliche Verfahren, das Ingenieurbüro Dr. Krämer durch den Bauherrn beauftrag ein Nachweis zu erstellen [16].

Dieser Nachweis war Grundlage der Baugenehmigung.

Nach der Überarbeitung des Gebäudeentwurfs wurde in der Bauphase ein zweiter Nachweis erstellt [17]. Der Unterschied zwischen beiden Versionen ist geringfügig. Im neueren Teil wurde der Nachweis nach EEWärmeG erbracht und Abmessungen des Gebäudes aktualisiert. Die vorgesehene Anlagentechnik war in der damalig geltenden DIN V 18 599-5: 2007-02 nicht definiert, sodass die Ausnahmeregelung nach § 4 Absatz 4 der EnEV 2007 [18] angewandt wurde. Dies bedeutet,

dass der Jahres-Primärenergiebedarf nicht ausweisbar und damit nicht begrenzt war, jedoch der spezifische Transmissionswärmetransferkoeffizient auf 76 % des sonst geforderten Wertes begrenzt wurde. Der sonst geforderte Wert betrug  $H_{T,max} = 0,89 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Der für das Gebäude maßgebende Grenzwert ergibt sich somit zu  $H_{T,max} = 0,68 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Als Verhältnis von Umfassungsfläche und Volumen wurde ein Wert von  $A/V_e = 0,449 \text{ m}^{-1}$  ermittelt. Hinsichtlich der Luftdichtheit wird an Fenster und Fenstertüren, gemäß der EnEV Anlage 4 Tabelle 1, eine Fugendurchlässigkeit nach DIN EN 12207 der Klasse 2, für Gebäude mit mehr als zwei Vollgeschossen festgesetzt. Diese Vorgabe wurde in der Planung nur teilweise umgesetzt (vgl. Abschnitt 4.4.6.4).

### 4.3.3 Bauteilliste

Die Zusammenfassung der äußeren Umschließungsflächen des Gebäudes gibt die nachfolgende Tabelle wieder. In dieser Aufstellung werden die Anteile der Hüllfläche deutlich.

Tabelle 4-3: Zusammenfassung der äußeren Umschließungsflächen des Gebäudes nach Wärmeschutznachweis

Bauteil	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Anteil %
Außenwand	792,06	0,167	21,44%
Kellerwand	232,17	0,165	6,29%
Fenster Nr. 1	593,07	1,000	16,06%
Fenster Nr. 2	23,15	3,000	0,63%
Haustüren	18,62	1,500	0,50%
Flachdach Nr. 1	760,33	0,129	20,59%
Flachdach Nr. 2	262,87	0,120	7,12%
RWA-Klappe Dach 3	9,00	2,000	0,24%
Bodenplatte	951,19	0,132	25,75%
Decke gegen Außenluft	51,07	0,150	1,38%

Summe: 3693,53

Aus den Berechnungen ergibt sich für das Gebäude ein spezifischer Transmissionswärmeverlust der Planung von  $H_{T,vorh} = 0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

## 4.4 Gebäudehülle

### 4.4.1 Vorbemerkung

In diesem Abschnitt wird die bautechnische Ausbildung der Gebäudehülle unter besonderer Berücksichtigung der wärmetechnischen Eigenschaften beschrieben. Es wird auf Planung und Bau sowie Abweichungen eingegangen.

### 4.4.2 Anforderungen

Die Festsetzung der wärmetechnischen Parameter der Gebäudehülle geht auf Optimierung zur Erreichung des Zielwerts für den Heizenergiebedarf des Förderprogrammes zurück. Der Heizenergiebedarf wurde mittels Gebäudesimulation durch das IBIT berechnet (siehe Abschnitt 9.1 Seite

118). Die Ergebnisse der Optimierung vgl. Tabelle 4-4 wurden dem Fachplaner vorgegeben. Die bautechnische Lösung sowie die Detailvorgaben erfolgten durch den Fachplaner Architektur.

Tabelle 4-4: Zielvorgaben zur thermischen Hülle aus Optimierung für Planung [19]

Bauteil	U-Wert W/m <sup>2</sup> K
opake Bauteile	
Außenwand	0,166
Keller Außenwand	0,166
Dach	0,132
Kellerboden	0,132
Fußboden Durchgang	0,132
Fenster und transparente Fassade	1,0
Türen	1,5
transparente Bauteile	
Holz-Glas-Fassade	≤ 1,0
Stahl-Glas-Fassade	≤ 1,0
Haustüren mit Verglasung	≤ 1,0
RWA-Öffnungen	≤ 2,0
F 30 Verglasung	≤ 3,0

Als Zielwert für den Gesamtenergiedurchlasswert aller Verglasungen wurde  $g = 0,52$  festgesetzt.

### 4.4.3 Opake Außenwand

Die opake Außenwand besteht aus tragenden Stahlbetonwänden und vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) für Wärme- und Witterungsschutz. Der geforderte  $U$ -Wert der Außenwand zur Erreichung der energetischen Ziele, wurde mittels Gebäudesimulation bestimmt und betrug von  $U = 0,166 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

#### 4.4.3.1 Betonfertigteile

Die Außenwände wurden aus vorgefertigten Beton Doppelwänden des Herstellers RÖCKELEIN errichtet. Die mit Stahl armierten doppelwandigen Teile wurden auf die Baustelle geliefert. Am jeweiligen Montageort wurden die Teile fixiert mit Ortbeton verfüllt. Durch diese Bauweise wird ein schnellerer Baufortschritt mit geringerem Personaleinsatz auf der Baustelle angestrebt.



Abbildung 4-9: links: Fertigteile werden per Kran an den vorbestimmten Montageort gehoben. rechts: Die armierten Doppelwände werden mit Ortbeton verfüllt.



#### 4.4.3.2 Vorgehängte und hinterlüftete Fassade (VHF)

Die opake Fassade des Gebäudes ist als vorgehängte und hinterlüftete Fassade (VHF) mit darunterliegender zweilagiger Wärmedämmung aus Mineralwolle ausgeführt. Normative Hinweise sind in der DIN 18516-1:2010-06 [20] gegeben. Nicht zu verwechseln ist die VHF mit der sogenannten Vorhangfassade. Dieser Fassadentyp wird auch in diesem Gebäude angewendet und ist im Abschnitt 4.4.6 beschrieben. Als Dämmschicht wurden Fassaden-Dämmplatten der Firma ISOVER Fabrikat Kontur FSP 1-032 eingesetzt. Aus zwei Dämmplatten mit 10 cm und 12 cm wurde eine 22 cm dicke Dämmschicht hergestellt. In der nachfolgenden Abbildung 4-10 ist die VHF ohne Trägerplatte abgebildet. Deutlich ist der Anschluss der zweischichtigen Wärmedämmung an die Perimeterdämmung erkennbar. Die Wärmedämmplatten sind mit Ankern aus Kunststoff an der Stahlbetonwand befestigt. Außerdem sind auf der linken Abbildung die Konsolen aus Edelstahl zur Aufnahme der Tragschienen sichtbar. Die montierten Tragschienen sind auf der linken Seite der Abbildung 4-10 erkennbar. Auf die Tragschienen wurden 1,2 cm starke Fassadenplatten mittels Schrauben aufgebracht.



Abbildung 4-10: links: VHF im Bau Betonwand sichtbar (Aufnahme 6.3.2012),  
rechts: Dämmung vollständig geschlossen mit Tragschienen (Aufnahme 23.3.2012)



Abbildung 4-11: links: Anschlussdetail Übergang VHF zu Perimeterdämmung  
rechts: unverputzte Fassadenplatten im Fensterstutzbereich

Zwischen der Wärmedämmung und der vorgehängten Platte wurde ein ca. 4,5 cm starker Spalt zur Hinterlüftung ausgebildet. Der Sockelabschluss ist mit einem Insektenschutzgitter ausgeführt. Die verschraubten Platten wurden anschließend verputzt und angestrichen.

#### 4.4.3.2.1 Thermographie

Die Dämmarbeiten an der Fassade wurde im Frühjahr 2012 bei teilweise niedrigen Außentemperaturen durchgeführt. Dies ermöglichte es, die noch unverhangene Wärmedämmung mittels Thermographiekamera zu begutachten. Nach Fertigstellung der VHF ist eine Begutachtung mittels Thermographieaufnahme nicht mehr möglich, da die vorgehängten Platten nur punktuell mit der Wand verbunden sind. Die Begutachtung durch das Monitoring-Team fand parallel zu den Dämmarbeiten statt. Die Arbeiter konnten die Wirkung der Dämmung auf der Betonwand an der Kamera nachvollziehen, was eine weitere Motivation zur magenfreien Installation gewesen sein mag. Es wurden Aufnahmen der Wärmedämmung erstellt und dabei keine gravierenden Mängel in der Dämmschicht der VHF festgestellt.

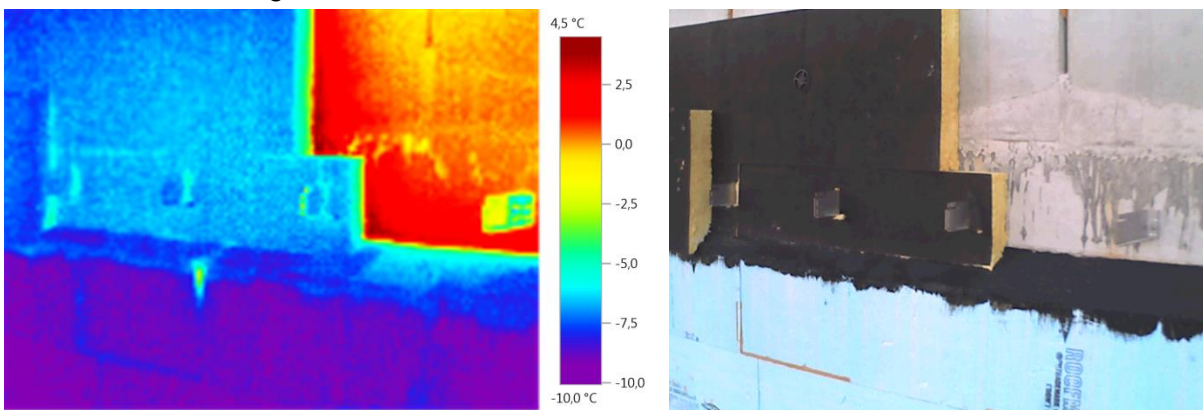


Abbildung 4-12: Thermographieaufnahme der Fassade im Bau mit und ohne Wärmedämmung

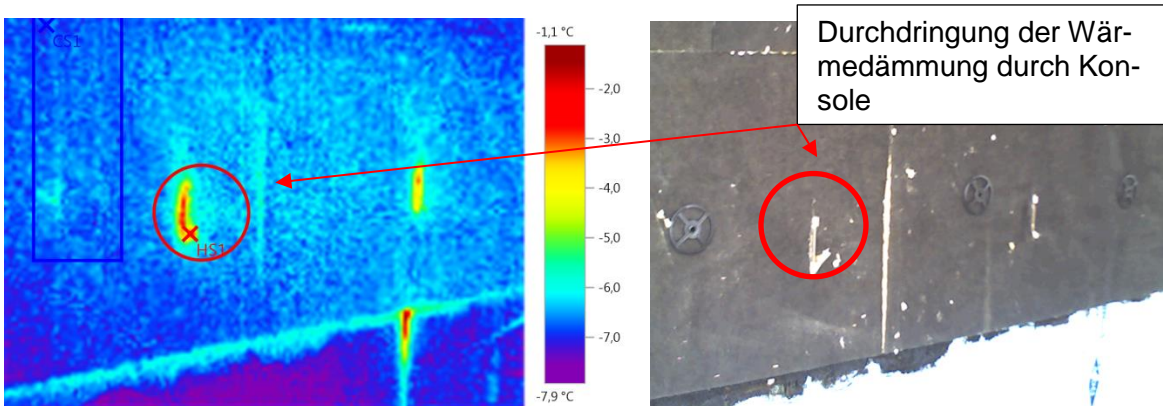


Abbildung 4-13: Thermographieaufnahme der Fassade Durchdringung der Dämmplatten der VHF mit Konsolen, rechts: Foto

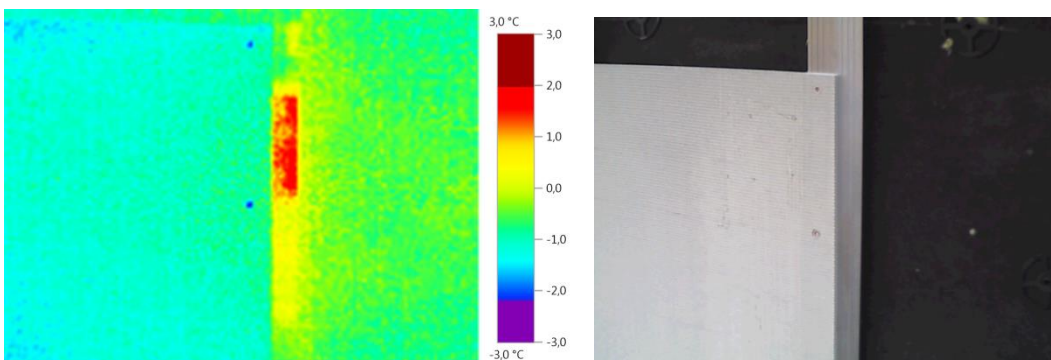


Abbildung 4-14: Thermographieaufnahme der VHF mit und ohne vorgehängter Platte mit Temperaturerhöhung auf der Tragschiene durch Störstelle an der Tragkonsole



Außerdem wurde die Thermographiekamera genutzt um die Wirkung der Durchdringung der Dämmung durch die Konsolen sichtbar zu machen. Durch eine erhöhte Temperatur der Konsolen, ist ein erhöhter Wärmestrom im Bereich der Konsolen (Konsolen mit thermischer Entkopplung) nachweisbar.

So liegt die aufgenommene Temperatur in einer Störstelle um 5 Kelvin höher als im ungestörten Bereich. Die Wärmeleitung auf die Trägerschienen ist ebenso feststellbar. Es kann gemutmaßt werden, dass Wärmeleitung von der Wand in die Konsole oder Konvektion an der Grenzschicht von Wand zu Wärmedämmung auf die Konsole für den Wärmestrom ursächlich ist. Gegebenenfalls könnte durch Verklebung der Durchdringung die Wärmebrücke weiter gemindert werden.

#### 4.4.3.3 Ereignisse in der Ausführung und Baustörung

Während der Ausführungsarbeiten an der VHF wurden Abweichungen von den Vorgaben zum  $U$ -Wert der Planung festgestellt. Diese Abweichungen resultieren im Wesentlichen darauf, dass die Tragkonstruktion der VHF bestehend aus Konsolen und T-Trägern nicht in der Berechnung des  $U$ -Werts der VHF berücksichtigt wurden. Die im LV-Fassade beschriebenen Eigenschaften der Fassade waren nicht eindeutig bzw. widersprachen sich. So wurde im LV-Fassade eine Dämmstärke von  $d = 20$  cm mit WLG 035 des Dämmmaterials bestimmt. Gleichermaßen wurde im LV-Fassade auf die Anforderungen des bauphysikalische Gutachten verwiesen in welchem ein  $U$ -Wert von  $U = 0,166$  W/m<sup>2</sup>K der Außenwand vorgegeben. Die im LV beschriebene Konstruktion entsprach aber nicht dem angegebenen  $U$ -Wert. Der konstruktiv bedingte, und damit nicht vermeidbare punktuelle Wärmeverlust über eine Konsole beträgt, entsprechend des Bemessungsdiagramms des Herstellers, pro Konsole ca.  $\chi = 0,015$  W/K (vgl. Abbildung 4-15).

##### Bemessungsdiagramm

Wärmebrückenverlust in Abhängigkeit des thermischen Widerstandes  $R$  des Verankerungsgrundes und der Dicke der Wärmedämmung

Punktuelle Wärmebrückenverlustkoeffizient  $\chi$  [W/mK]

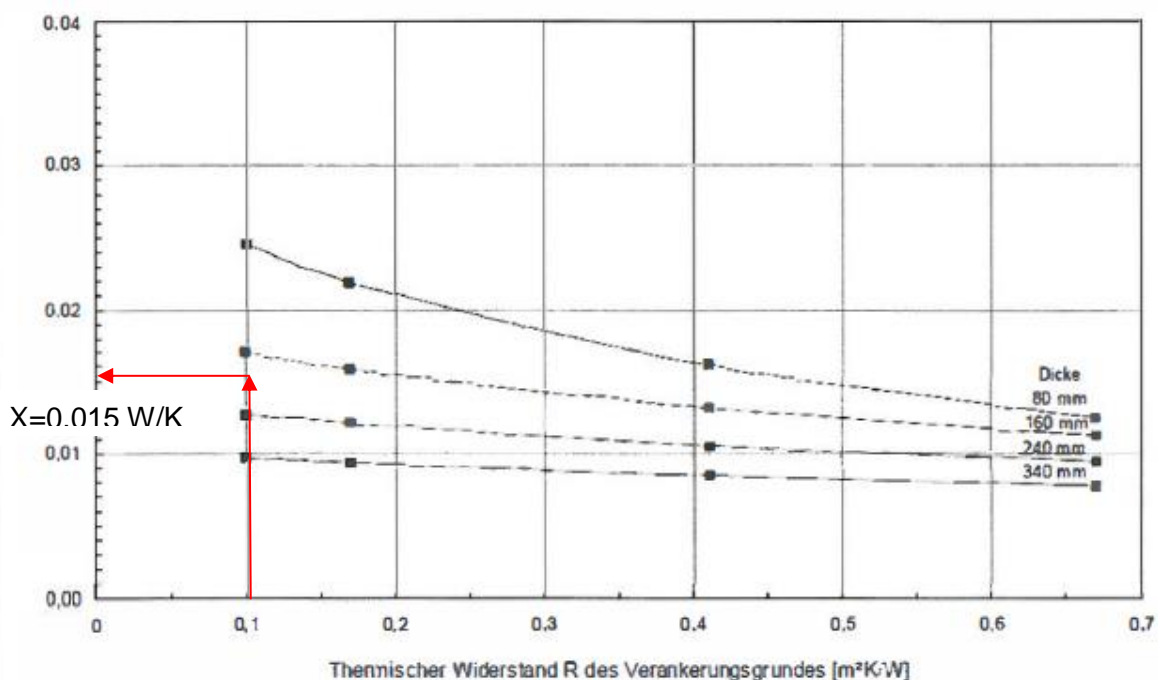


Abbildung 4-15: Bemessungsdiagramm für punktuellen Wärmebrückenverlustkoeffizient [STO]

Bei ermittelten 2,5 Konsolen pro m<sup>2</sup> Wandfläche ergibt sich damit ein flächenspezifischer Zuschlag von  $U = 0,0375 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf die Fassade der zunächst unberücksichtigt bleibt .

Außerdem wurden die Konsolen zunächst ohne thermische Trennung auf der Betonwand montiert. Der AN-Fassade und der Hersteller des Fassadensystems vertraten die Auffassung, dass die thermische Trennung zwischen Verankerungsgrund und Tragkonsolen aus energetischen Gründen nicht notwendig sei. Begründet wurde dies durch die geringere Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Konsolenmaterials Edelstahl. Die Konsolen wurden entsprechend dem LV-Fassade nachträglich mit 1 cm starken Kunststoffunterlagen ausgestattet.



Abbildung 4-16: links: Ursprüngliche Installation ohne thermische Trennung  
rechts: Installation mit nachträglich montierter thermischer Trennung

Berechnungen zeigten, dass der im LV-Fassade beschriebenen, und zunächst vom AN-Fassade für die Ausführung vorgesehenen Aufbau mit  $U = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$  den geforderten  $U$ -Wert der Planung von  $U = 0,166 \text{ W/m}^2\text{K}$  überschritt. Der spezifische Transmissionswärmeverlust des Gebäudes hätte sich damit um  $H_T = 0,007 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf  $H_T = 0,376 \text{ W/m}^2\text{K}$  erhöht.

Um eine den Vorgaben entsprechende Lösung zu realisieren wurden anstatt der geplanten WLG 035 die WLG 032 verwendet und die Dicke der Wärmedämmung von 0,20 cm auf 0,22 cm erhöht. Diese Erhöhung wurde auch durch das Monitoring-Team angestrebt und war Gegenstand intensiven Diskussionen. Es kann vermutet werden, dass diese Diskussion ein wesentlicher Grund für die Fertigstellungsverzögerung der Fassade und des Gebäudes waren. So wurde bereits im Mai 2011 mit den Arbeiten an der Fassade begonnen und die Konsolen befestigt. Dann ruhte die Arbeit an der Fassade und erst im März 2012 wurden die Arbeiten mit dem Anbringen der Wärmedämmplatten weitergeführt. Im Mai 2012 waren die Arbeiten abgeschossen. Neben diesen Punkt waren u.U. auch andere Gründen für die Bauzeitverlängerung verantwortlich.

Durch die fehlende Wärmedämmung und die gleichzeitige Baubeheizung im Winter 2011/12 kam es in den Innenräumen des Gebäudes zu leichtem Schimmelpilzbildungen in den Raumecken.

Rückblickend kann konstatiert werden, dass der Aufwand, zur Durchsetzung des Ziel  $U$ -Wertes der ca. 800 m<sup>2</sup> umfassenden VHF, und die negativen Folgen auf den weiteren Bauverlauf im Verhältnis zum Nutzen sehr hoch waren und eine „geringfügige“ Schwächung der Fassade u.U. hätte toleriert werden sollen. Des Weiteren kann formuliert werden, dass Leistungsbeschreibungen stets eindeutig formuliert sein sollten.

### 4.4.4 Außenliegender Sonnenschutz

Nahezu alle verglasten Flächen können mittels außenliegenden Raffstores mechanisch verschlossen werden. Hierfür mussten Einbaukästen mit Antriebseinheit der Raffstores auch in der VHF

verortet werden. Dies führt zwangsläufig zu einer Schwächung der Wärmedämmschicht in der VHF. Um eine möglichst homogene Wärmedämmeigenschaft der Fassade zu erreichen wurde für die Dämmung zwischen Kasten und Stahlbetonwand eine niedrigere WLG 024 vorgegeben. Durch den AN-Fassade wurde vermutlich jedoch eine höhere (minderwertigere) WLG 032 verwendet.

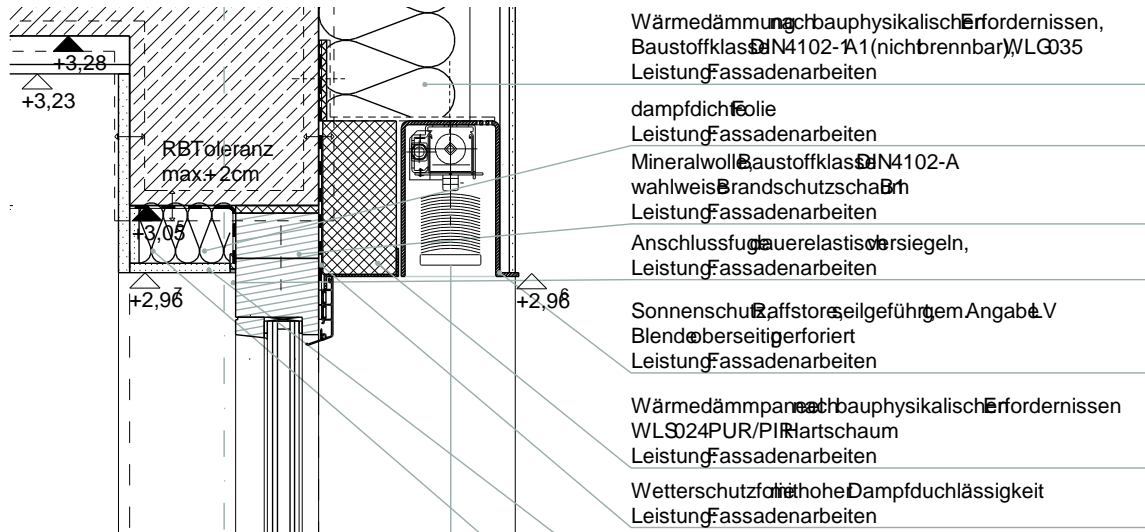


Abbildung 4-17: Schnitt Holz-Glas-Fassade mit Raffstores [21]

Die Abbildung 4-18 zeigt die Einbausituation ohne und mit Wärmedämmung. Deutlich ist der noch leere Raum zwischen Stahlbetonwand und Einbaukasten erkennbar. In der Planungsphase wurde darüber beraten, die Wärmedämmung als VIP auszuführen. Dies wurde dann jedoch aus Kostengründen fallengelassen. Im rechten Foto ist die seitlich Wärmedämmung gut zu erkennen.



Abbildung 4-18: links: Seitliche Ansicht Aufnahme für Raffstore in Bau ohne Wärmedämmung. rechts: Draufsicht auf Aufnahme für Raffstore in Bau mit Wärmedämmung.

#### 4.4.5 Perimeterdämmung

Die Perimeter-Wärmedämmung der Gebäudehülle wurde mit Extrudiertem Polystyrol Hartschaum (XPS) der Firma DOW Produkt ROOFMATE SL-X ausgeführt. Nach Fertigstellung der Streifenfundamente wurde unter der Bodenplatte eine zweilagig Dämmschicht mit insgesamt 22 cm in  $\lambda=0,03$  W/mK [17] verlegt (siehe Abbildung 4-19). Die Unter- und Innenseiten der Streifenfundamente wurden augenscheinlich nicht gedämmt. Die erdberührten Außenwände wurden im weiteren Bau-



verlauf ebenso mit gleicher XPS-Dämmung mit einer Stärke von 18 cm verkleidet. Die Dämmung wurde durch das Gewerk Rohbau erbracht.



Abbildung 4-19: links: Blick auf Dämmarbeiten unter der Bodenplatte, rechts: Detail erste Lage der verlegten Perimeterdämmung.

So wurden im gesamten Fußbodenbereich weitere Dämmmaterialien oberhalb der Bodenplatte eingebaut.

Im gesamten Übergangsbereich von VHF zu Perimeterdämmung wurden in der ersten Lage der Perimeterdämmung mittels Thermographie deutliche Schwachstellen festgestellt.

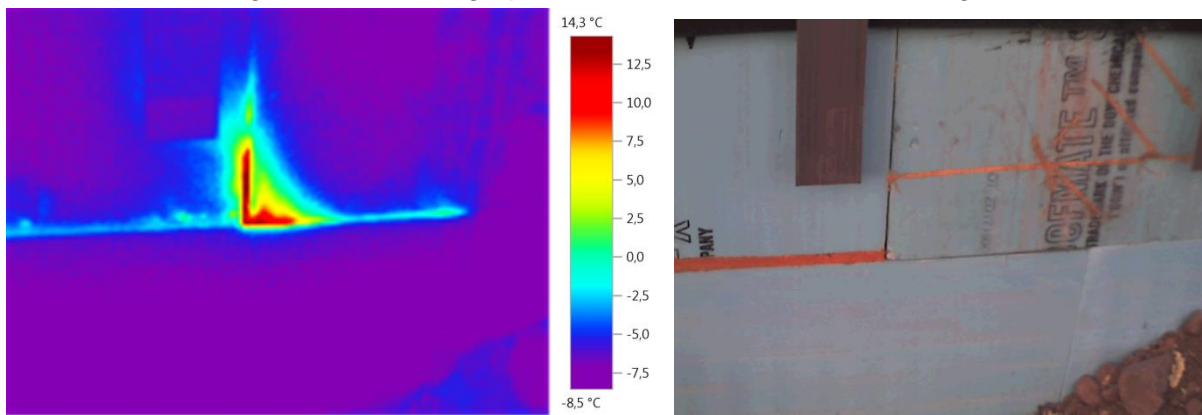


Abbildung 4-20: Thermographische Aufnahme und Foto von mangelhaften Schwachstellen im Anschlussbereich von Perimeterdämmung zu VHF.

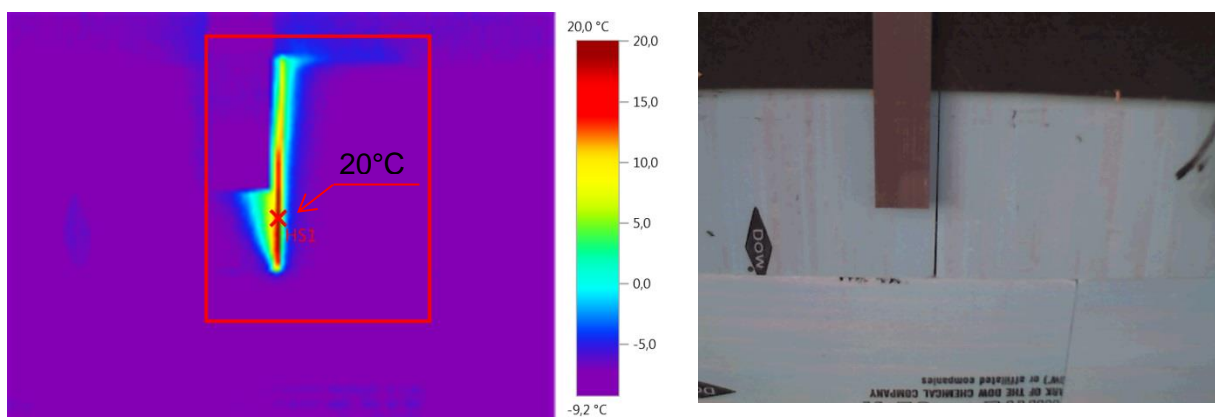


Abbildung 4-21: Thermographische Aufnahme und Foto von mangelhaften Schwachstellen im Anschlussbereich von Perimeterdämmung zu VHF.

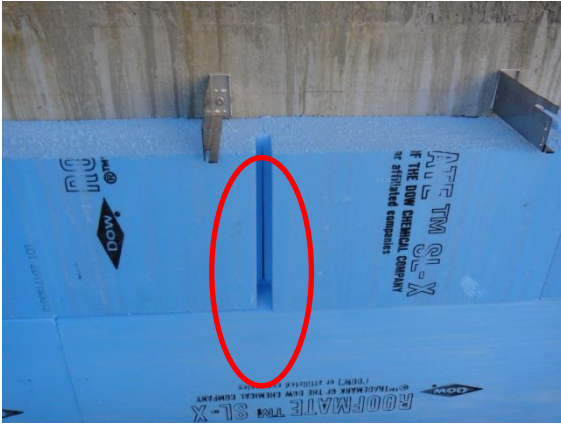


Abbildung 4-22: Schwachstellen im Anschlussbereich von Perimeterdämmung zu VHF durch Verlegefehler

Diese Schwachstellen waren durch unsachgemäße Verarbeitung der Platten verursacht. Wie in der Abbildung 4-22 zu erkennen ist, wurden die Plattenstücke nicht überlappend verlegt. Es kann gemutmaßt werden, dass zur Materialeinsparung Reststücke verarbeitet wurden. Nach Aufzeigen der Mängel mit Thermographieaufnahmen und der Stellungnahme des Herstellers zu den Verarbeitungsregeln wurden die Schwachstellen beseitigt.

#### 4.4.6 Vorhangfassade

##### 4.4.6.1 Vorbemerkung

Die Transparenten Bauteile sind in *Holz-Glas-Fassade* und *Stahl-Glas-Fassade* sowie Türen und RWA-Kuppeln zu unterscheiden. Die Holz-Glas-Fassade bildet Fensterbänder in den Aufenthaltsräumen im Hauptgebäude aus. Die Stahl-Glas-Fassade wurde für das Foyer die Verkehrsflächen und dem Verbinder genutzt. Der AN-Fassade entwickelte aus den Vorgaben technische Lösungen. Nachfolgend werden die Fassaden beschrieben und der Bauverlauf exemplarisch mit Abbildungen dargestellt.

##### 4.4.6.2 Holz-Glas-Fassade

Im Hauptteil des Gebäudes kommt in den Arbeits- und Unterrichtsräumen eine Holz-Glas-Fassade in Pfosten-Riegel Konstruktion zum Einsatz. Die Rahmen und Flügelelemente sind aus Holz. Die Holz-Glas-Fassade nimmt eine Fläche von  $A = 200 \text{ m}^2$  ein. Davon sind ca.  $120 \text{ m}^2$  verglast. In die Fassade sind 36 opake öffentbare Flügel aus Holz eingesetzt. Die Flügel nehmen eine Fläche von ca.  $33 \text{ m}^2$  ein. Kontaktschalter in den Flügeln geben den Zustand, offen oder geschlossen an die GLT weiter. In den nachfolgenden Abbildungen wird die Holzfassade kurz nach dem Einbau in die Stahlbetonwände und nach Fertigstellung des Gebäudes gezeigt. Mit dem Einbau und Anschluss an die Wände wurde Luftdichtheit der Räume erreicht. Im Inneren kommt der Werkstoff Holz deutlich zu Geltung, währenddessen von außen, die graue Farbgebung der Stahl-Glas-Fassade aufgriffen wurde und sich von dieser nicht absetzt (vgl. nachfolgenden Abbildungen).

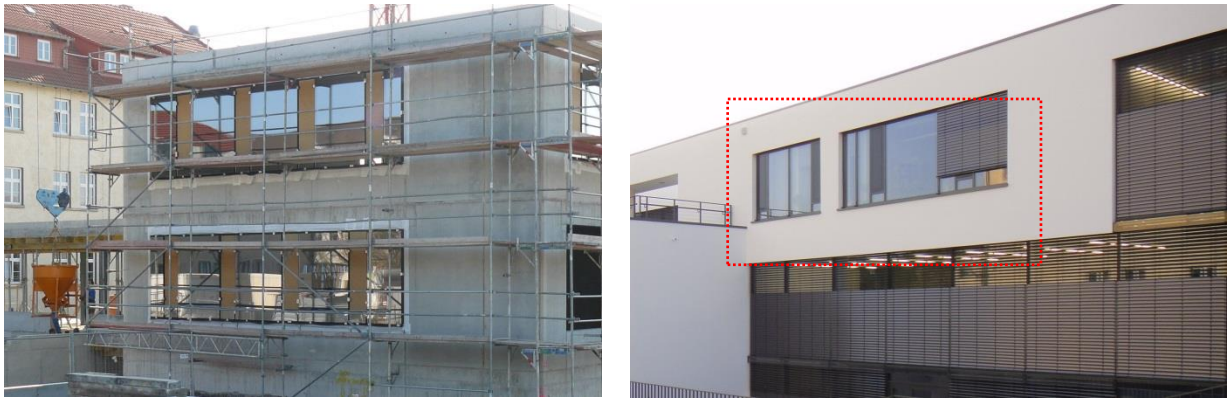


Abbildung 4-23: links: Holzfassade nach dem Einbau (außen Planungslabor EG und OG)  
rechts: Holzfassade im fertigen Zustand (von außen rot markiert)



Abbildung 4-24: links: Holzfassade nach dem Einbau (innen, kleiner Hörsaal) rechts: Holz-  
fassade im fertigen Zustand (innen, Computerpool)

Laut der Dokumentation des AN-Fassade wird mit der Drei-Scheiben-Verglasung bei einer Verglasungsstärke von  $d = 44 \text{ mm}$ , ein  $U$ -Wert für die Verglasung der Holzfassade von  $U_g = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht. Mit dem  $U$ -Wert des Rahmens (Fassadensystem bei EBS 44 mm) von  $U_f = 0,81 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht die Gesamtkonstruktion einen  $U$ -Wert der Fassade von  $U = 0,99 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Damit wurden die vorgegebenen Anforderungen an den  $U$ -Wert genau erfüllt. Als Verglasung kam u.a. das Fabrikat GEWE-therm 3-fach-0.6 (Stand 2011) der Firma Scholl zum Einsatz. Der Verglasungsaufbau ist laut Lieferunterlagen wie folgt:

- Float  $d = 6 \text{ mm}$  ODER Ein-Scheiben-Sicherheitsglas (ESG)
- Scheibenzwischenraum (SZR)  $d = 14 \text{ mm}$
- Float  $d = 4 \text{ mm}$
- Scheibenzwischenraum (SZR)  $d = 14 \text{ mm}$
- Float  $d = 6 \text{ mm}$  oder Ein-Scheiben-Sicherheitsglas (ESG)

Der Scheibenzwischenraum (SZR) ist mit Argon befüllt. Die äußere Scheibe ist auf der dem Raum zugewandten Seite, die innere Scheibe auf der dem Raum abgewandten Seite, mit einer Low-E (Wärmeschutz) Beschichtung ausgeführt. Der Gesamtenergiedurchlassgrad beträgt nach Herstellerkatalog  $g = 0,5$ . In den Katalogangaben stimmt die Stärke der äußeren Scheiben mit  $d = 4 \text{ mm}$  nicht mit denen in den Lieferscheinen angegeben  $d = 6 \text{ mm}$  überein. Es ist zu vermuten, dass es sich um eine Sonderanfertigung handelt oder eine Produktmodifikation vorgenommen wurde. Berechnungen mit der Software GURDIAN CONFIGURATOR nach EN 401 ergaben einen  $g$ -Wert, des tatsächlichen Verglasungsaufbaus, wie im Lieferschein angegeben, von  $g = 0,48$  [22]. Damit



liegt der tatsächliche  $g$ -Wert um den Zahlenwert 0,1 bzw. 10 Prozentpunkte niedriger als der geforderte. Im LV-Fassade war der  $g$ -Wert der Verglasung als  $g \leq 0,58$  angegeben. Ein Wertebereich wäre hier sinnvoll gewesen. Der niedrigere  $g$ -Wert vermindert den Energieeintrag durch die Verglasung und damit den Kühlenergiebedarf. Im Gegensatz dazu erhöht sich der Heizenergiebedarf tendenziell. Der Anschluss zwischen Stahlbetonwand und Rahmen wurde mittels verklebten Dichtbändern hergestellt. Anschließend wurde die Rahmen überdämmt. In den nachfolgenden Abbildungen werden der Rahmenverbund der Drei-Scheibenverglasung und der Anschluss der Holz-Glas-Fassade an die Stahlbetonwand gezeigt. Die Holz-Glas-Fassade wurde März 2011 eingebaut.



Abbildung 4-25: links: Nahaufnahme des Rahmenverbundes der Drei-Scheiben-Verglasung mit Konventionellen Rahmen (innen, kleiner Hörsaal) rechts: Holzfasse in Bau mit Anschluss an Stahlbetonwand (März 2011)

#### 4.4.6.3 Stahl-Glas-Fassade

Die Stahl-Glas-Fassade, mit meist raumhohen Verglasungen, schließt die Gebäudehülle im Bereich der Dachterrasse, dem Foyer sowie beidseitig den Verbinderbau.

Im Bereich des Verbinders kamen augenscheinlich verschiedene Fabrikate der Verglasung zum



Einsatz. Detailliert Nachweise zu den eingesetzten Verglasungen liegen nicht vor. Laut den Erklärungen des AN-Fassade beträgt der  $U$ -Wert der Verglasung einheitlich  $U_g = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Mit dem Fassadenpfosten  $U_f = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  und Fassadenriegel  $U_r = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  kann ein  $U_{cw} = 0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$  ausgewiesen werden [23]. Der Nachweis wurde exemplarisch für einen  $A = 200 \text{ m}^2$  umfassenden Teil der Fassade entsprechend der DIN EN 13947:2007-07 [24] erbracht.

Der Nennwert der Fassade  $U = 0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$  ist damit kleiner (höherwertiger) als die gemachten Anforderungen  $U = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  und übertrifft die Wärmedämmeigenschaft deutlich. Wird für die gesamte Fläche der Stahl-Glas-Fassade ein  $U$ -Wert von  $0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$  angenommen.

Abbildung 4-26: links: Einbau der Verglasung im Verbinder mittels Kran (16.08.2011)

#### 4.4.6.4 Fugendurchlässigkeit, Luftdurchlässigkeit Fassaden

Gemäß den Vorgaben aus der EnEV 2007 Anlage 4 Tabelle 1 [18], aufgegriffen auch im Wärmeschutzgutachten, müssen Fenster und Türen die Fugenluftdurchlässigkeit für bewegliche Rahmen nach DIN EN 12207:2000 Klasse 3 [25] erfüllen. Die Holzfensterelemente, die in der Stahl-Glas-Pfosten-Riegel-Fassade bzw. in Holz-Glas-Fassade eingebaut wurden, erfüllen diese Anforderung. Die Fassadentüren wurden im LV-Fassade hinsichtlich der Fugendichtheit nicht spezifiziert. Laut der Dokumentation des AN-Fassade entsprechen die außen Türen der Klasse 1 bis 2. Damit erfüllen die Außentüren die Anforderungen den EnEV nicht.

Die gemessene Luftdichtigkeit des Gebäudes ist vergleichsweise sehr dicht. Es kann vermutet werden, dass die Abweichung von der nach EnEV geforderten Dichtigkeitsklasse für die Türen keinen bedeutenden Einfluss auf die Luftdichtheit des Gebäudes haben. Es wurde jedoch vereinzelt Schwachstellen an den Außentüren festgestellt. Die Luftdichtigkeit der Vorhangfassade wurde nicht spezifiziert. Laut der Dokumentation des AN-Fassade [23] entspricht diese der höchsten Klasse „A E“ nach DIN 12 152:2002 [26].

#### 4.4.7 Luftdichtheit der Gebäudehülle

Zur Qualitätsprüfung des Bauwerks und für die Nachweisführung im Rahmen der Zertifizierung nach BNB beauftragte der Bauherr die Messung der Luftdichtheit des Gebäudes mittels Blower-Door-Test. Für die Messung wurden alle RLT-Klappen geschlossen (nicht verklebt). Öffnungen die im Betrieb gewöhnlich geschlossen sind, wie beispielsweise Anschluss an die Entwässerung über Geruchverschluss wurden verklebt.



Abbildung 4-27: Blick auf eingebauten Ventilator für Blower-Door-Test (Aufnahmedatum 5.7.2012)





Abbildung 4-28: Abgeklebte Abwasserleitung bei fehlende Geruchverschluss zur Vorbereitung der Haustechnik, für Blower-Door-Test (Aufnahmedatum 5.7.2012)



Abbildung 4-29: Leckageortung mittels Thermoanemometer am Türblatt (Aufnahmedatum 5.7.2012)

Die Messung wurde am 5.7.2012 durchgeführt. Es wurde ein Bericht mit 13 Seiten erstellt. Es wurden keine erheblichen Mängel festgestellt. Es wurden Leckagen an allen Außentüren an den oberen und unteren Ecken sowie an Bauelemente der WC Spülkästen im ersten OG festgestellt. Die gemessene Luftdichtheit war bei Unterdruck höher als bei Überdruck. Dies kann auf undichte Bauteile zurückgeführt werden die bei Überdruck im Gebäude nach außen öffnen z.B. durch undichte bzw. falsch eingestellte Außentüren oder Rückschlagklappen [27]. Die Außentüren wurden nach dem Test justiert. Eine Wiederholungsmessung fand nicht statt.

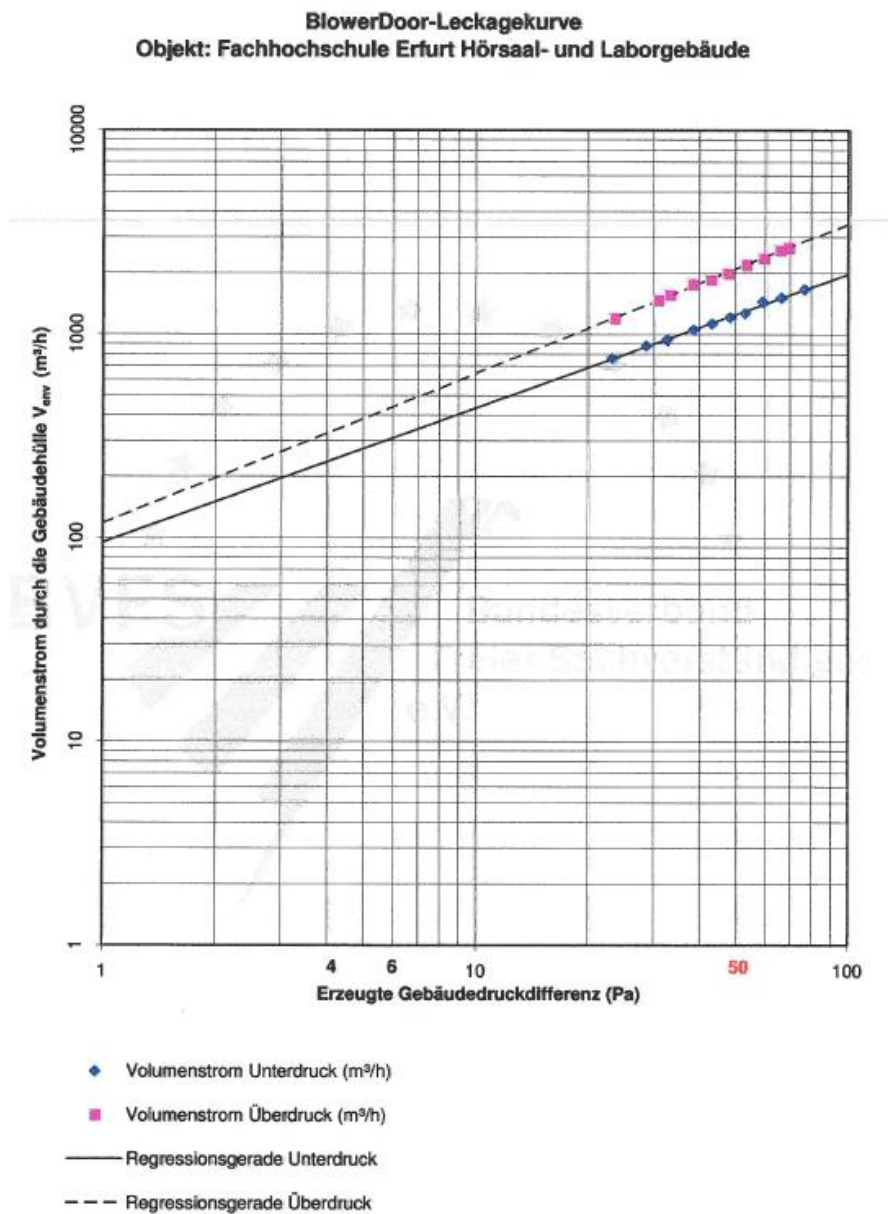


Abbildung 4-30: Messprotokoll der Blower-Door-Messung aus [27]

Grundlage für Berechnung der Messgrößen waren die Angaben zur Gebäudegeometrie aus dem Energiesparnachweis vom 18. 10.2010 (siehe Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Blower-Door-Messung nach DIN EN 18829 [27]

Messgröße	Messwert	Anforderungswert DIN 4108-7 (2001) [28]
$n_{50}$	$h^{-1}$	0,25
$w_{50}$	$m^3/m^2h$ NGF	0,86
$q_{50}$	$m^3/m^2h$ Hüllfläche	0,45
		3,0

Tabelle 4-6: Eingangsgrößen für Kennwertbildung aus Blower-Door-Messung

Bruttovolumen	$V = 8235 \text{ m}^3$
Nettovolumen berechnet aus $8235 \cdot 0,8$	$V = 6588,32 \text{ m}^3$
Nettogrundfläche NGF	$A = 1932,3 \text{ m}^2$
Gebäudehüllfläche	$A = 3693 \text{ m}^2$

Im Ergebnis kann die erreichte Luftdichtheit des Gebäudes mit  $n_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$  als sehr dicht bezeichnet werden. Zum Vergleich, die Anforderung des Passivhauskonzeptes liegen bei  $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$  [29].

#### **4.4.8 Wärmebrücken**

##### **4.4.8.1 Anlass und Problemstellung**

Wärmebrücken sind als Unregelmäßigkeit in der thermischen Hülle unvermeidbar und haben Einfluss auf den Transmissionswärmestrom. Im Rahmen dieses Berichtes werden die folgenden Punkte erörtert.

- i. Bewertung der Wärmebrücken im Planungsprozess
- ii. Bewertung der geplanten Wärmebrücken durch PSI
- iii. Optimierungspotentiale in den Details
- iv. Bewertung der Ausführung der Details-

##### **4.4.8.2 Wärmebrücken im Planungsprozess**

###### **4.4.8.2.1 HU-Bau**

Im Planungsprozess wurden keine detaillierten Annahmen bzw. Berechnungen zur Ausführung der Wärmebrücken getroffen. Jedoch wurden auf eine möglichst wärmebrückenfreie, sich am Passivhausstandard orientierten, Konstruktion fokussiert. So wurde im Energiebericht zur HU-Bau [30] Passivhauskomponenten für die Ausführung spezifiziert. Es wurde außerdem ein möglichst wärmebrückenfreie Ausführung angestrebt.

###### **4.4.8.2.2 AFU-Planung Ausführungsplanung**

In der Ausführungsplanung wurden Vorgaben zu Wärmebrücken im Textteil des LV-Fassade, in der zeichnerischen Darstellung der Konstruktionsdetails sowie im Wärmeschutznachweis gegeben die nachfolgend dargestellt werden.

In den Vorbemerkungen zum LV-Fassade [31] wurde zu Wärmebrücken vorgeben:

###### *1. Passivhaus*

*„Es wird darauf hingewiesen, dass bei der gesamten Konstruktion die Anforderungen an ein Passivhaus eingehalten werden müssen. Die gewählten und angebotenen Systeme müssen für diesen Einsatzzweck zugelassen sein. „*

###### *4. Bauphysikalische Anforderungen*

*Die bauphysikalischen Anforderungen sind den Gutachten zur thermischen Bauphysik und zum baulichen Wärmeschutz zu entnehmen. Bezüglich der thermischen Anforderungen an Rahmen, Verglasung, Randverbund Isolierglas, etc. sind die Angaben aus der Bauteilbeschreibung zu o.g. Gutachten zu berücksichtigen*

*Fassadenanschlüsse zu Rohbauteilen:*

*Die Anschlussbereiche sind unter Verwendung von Formstücken aus Mineralfaserdämmplatten so auszubilden, dass Wärmebrücken ausgeschlossen sind. Die Dicke der Dämmstreifen darf 40 mm an keiner Stelle unterschreiten.*

*Nachweise:*

*Alle an die Fassadenkonstruktion gestellten Anforderungen sind durch den AN unaufgefordert nachzuweisen und durch Tests (Wärmebildkamera, Blower-Door) zu hinterlegen. Dies ist in die Einheitspreise einzurechnen und wird nicht gesondert vergütet.*

In den Einzelpositionen im LV wurde pauschal *Wärmebrückenfreiheit* gefordert.

In den Vorbemerkungen des LV Fassade wird Bezug genommen auf den Wärmeschutznachweis [16]. In dieser Unterlage wird hinsichtlich der Wärmebrücken, vor allem in Bezug auf den Wärmeschutznachweis Angaben gemacht. Hinsichtlich der Wärmebrücken wird gefordert:

### *4.3 Wärmebrücken*

*Der Einfluss der konstruktiven Wärmebrücken ist bei neu zu errichtenden Gebäuden so gering wie möglich zu halten.*

*Gemäß EnEV Anlage 2, Nr. 2.5 sind die Transmissionswärmeverluste infolge Wärmebrücken durch einen Zuschlag auf den Wärmedurchgangskoeffizienten zu berücksichtigen. In den rechnerischen Nachweisen wird der Einfluss der Wärmebrücken mit einem pauschalen Zuschlag  $\Delta U_{wb} = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  berücksichtigt.*

*Im Zuge der weiteren Planung ist besonderes Augenmerk auf die unten stehenden entwurfsbedingten Wärmebrücken zu richten:*

- Anbindung der Decke unter Verbinder an die Gründungsbauteile*
- Anbindung der Stützen Dachterrasse an die Decke über Hörsaal*
- Anbindung der Decke im Außenbereich über Dachterrasse an die Dachdecke über OG. Da eine konstruktive Trennung dieser Bauteile im Übergangsbereich nicht möglich ist, muss eine Verlängerung der Wärmeübertragungslänge (z.B. 50 cm Dämmung im Übergangsbereich) oder eine vollflächige Bekleidung der verbundenen Bauteile mit Wärmedämmmaterialien erfolgen.*

Durch den Architekten wurden Details der Fassadenausbildung erstellt und als sogenannte Objektplanung dem Auftragnehmer der Fassade übergeben. Die nachfolgende Abbildung 4-31 zeigt exemplarisch das Detail des Fenstersturzes mit außenliegendem Sonnenschutz und vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF) aus der Objektplanung. Der AN-Fassade entwickelte aus der Planungsvorgabe eine sogenannte Werkplanung. Die Werkplanung wurde umgesetzt.

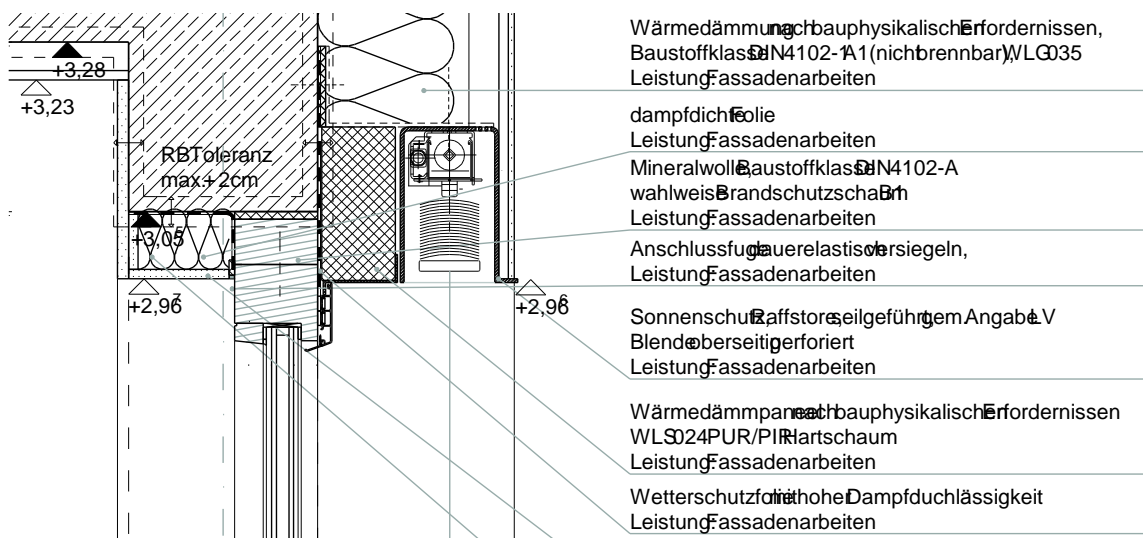


Abbildung 4-31: Ausschnitt aus Schnitt-Detail Anschluss Holz-Fenster an Fassade [21] ARC-5-D-2612-1

Aus den gemachten, zum Teil nicht eindeutigen, Vorgaben für den AN Fassade, wurde der Standpunkt des Monitorings-Teams entwickelt, dass die Fassade wärmebrückenfrei im Sinne des Passivhaus-Konzeptes auszuführen sei und dies durch den AN Fassade nachzuweisen wäre. Das Passivhaus-Konzept definiert wärmebrückenfreies Konstruieren, wenn Bauteilanschlüsse einen längenspezifischen Wärmebrückenverlustkoeffizient von gleich oder weniger als  $\psi \leq 0,1 \text{ W/mK}$  beträgt [29].

Der AN-Fassade lehnte eine solche Ausführung und Nachweisführung ab. Tatsächlich ist festzustellen, dass an keiner Stelle der Leistungsbeschreibung ein konkreter Wert für die Qualität der Wärmebrücken, definiert beispielsweise über den Wärmebrückenverlustkoeffizient, vorgegeben wurde. Auch wurde in den einzelnen Positionen nicht der Passivhausstandard oder ein Bezug dazu, hinsichtlich verlangt.

Im Verlauf der Ausführung kam es zu kontroversen Diskussionen zwischen Architekt, AG und Monitoring-Team mit dem AN-Fassade hinsichtlich der Ausführungsqualität der Fassade. Dies betraf neben den Wärmebrücken auch andere Punkte (siehe Abschnitt 4.4.3.2 Seite 33 und Abschnitt 4.4.3.2 Seite 33). Festgestellte Abweichungen zwischen der Werkplanung und der Objektplanung veranlasste den AG zur exemplarischen Prüfung der Wärmebrückenverlustkoeffizient für einen Fensteranschluss. Beispielsweise wurde vermutlich die Wärmedämmung hinter dem außenliegenden Sonnenschutz (vgl. Abbildung 4-31) nicht wie gefordert in WLG 024 sondern in WLG 032 [32] ausgeführt. Durch das Ingenieurbüro Dr. Krämer wurden aus der Objektplanung und der Werkplanung der Wärmebrückenverlustkoeffizient berechnet und verglichen. Es zeigten sich Abweichungen zwischen Planung und Ausführung. Die Ergebnisse sind in der

Tabelle 4-7 präsentiert, negative Werte bedeuten eine Verbesserung der Wärmedämmung im Vergleich zum ungestörten Bauteil.

Eine weitergehende Untersuchung anderer Anschlüsse konnte der Bauherr aus wirtschaftlichen Gründen nicht leisten. Zur weiteren Bewertung der Problemstellung der Wärmebrücken wurde im Rahmen des Monitoring-Projektes eine Studienarbeit [33] zur Bewertung der Wärmebrücken des Gebäudes betreut. Basis für die Berechnungen war die Objektplanung des Architekten. Die 2D Berechnungen wurden mit dem Programm PsiTherm [34] zur Wärmebrückenberechnung entsprechend DIN EN ISO 10211 [35] durchgeführt.

Tabelle 4-7: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Wärmebrückenverlustkoeffizient

Bauteil	$\Psi$ in W/mK	
	Objektplanung (Planung)	Werkplanung (Ausführung)
Sturz	0,019	0,05
Brüstung	-0,042	0,022
Seite	-0,015	0,03

Ziel der Studienarbeit war es, einen individuellen Zuschlagswert  $\Delta U_{WB}$  für die gesamte Gebäudehülle des Gebäudes zu berechnen. Dieser wird in diesem Bericht festgesetzt als Summe aus den Produkten aus längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient und der dazugehörigen Länge, bezogen auf die Hüllfläche des Gebäudes.

$$\Delta U_{WB} = \frac{\sum \Psi \times l}{A} \quad \text{Gl. 1}$$

Aus dem Vergleich des individuellen  $\Delta U_{WB}$  mit dem pauschalen Zuschlagswert für Bauteile von  $\Delta U_{WB}$  0,1 W/m<sup>2</sup>K oder mit individuellen  $\Delta U_{WB}$  anderer Gebäude können unter Umständen Rückschlüsse auf die Güte der Wärmebrücken geschossen werden. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn alle wesentlichen Wärmebrücken des Gebäudes berechnet wurden. Im Rahmen der Studienarbeit wurden aus den Details der Objektplanung 75 Wärmebrücken identifiziert. 23 dieser Wärmebrücken überschritten den Grenzwert von  $\psi \leq 0,1$  W/mK

Vierzehn von diesen 23 konnten als bedeutsam für den Einfluss auf die thermische Hülle eingeordnet werden. Der individuelle Zuschlagswert für das gesamte Gebäude beträgt der  $\Delta U_w = 0,0315$  W/m<sup>2</sup>K. Am bedeutsamsten konnte eine Wärmebrücke im Sockelbereich bestimmt werden. Diese macht 40 %  $\Delta U_w$  aus. Grund dafür ist die fehlende Wärmedämmung auf der Innenseite und unterhalb der Streifenfundament des Hauptgebäudes.

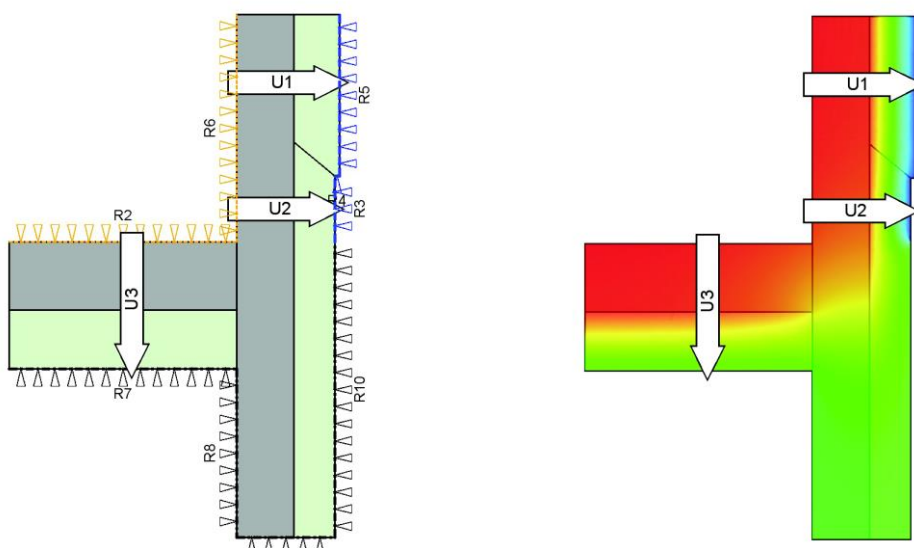


Abbildung 4-32: Vereinfachte Darstellung des Sockelbereichs mit Streifenfundament aus der Wärmebrückenberechnung [33]

Ebenso stellt der Anschluss der Fassade des Verbindungsbauwerks an den Grund eine Schwächung der thermischen Hülle dar. In der Abbildung 4-33 ist der Anschluss des Verbinders im Detail dargestellt.

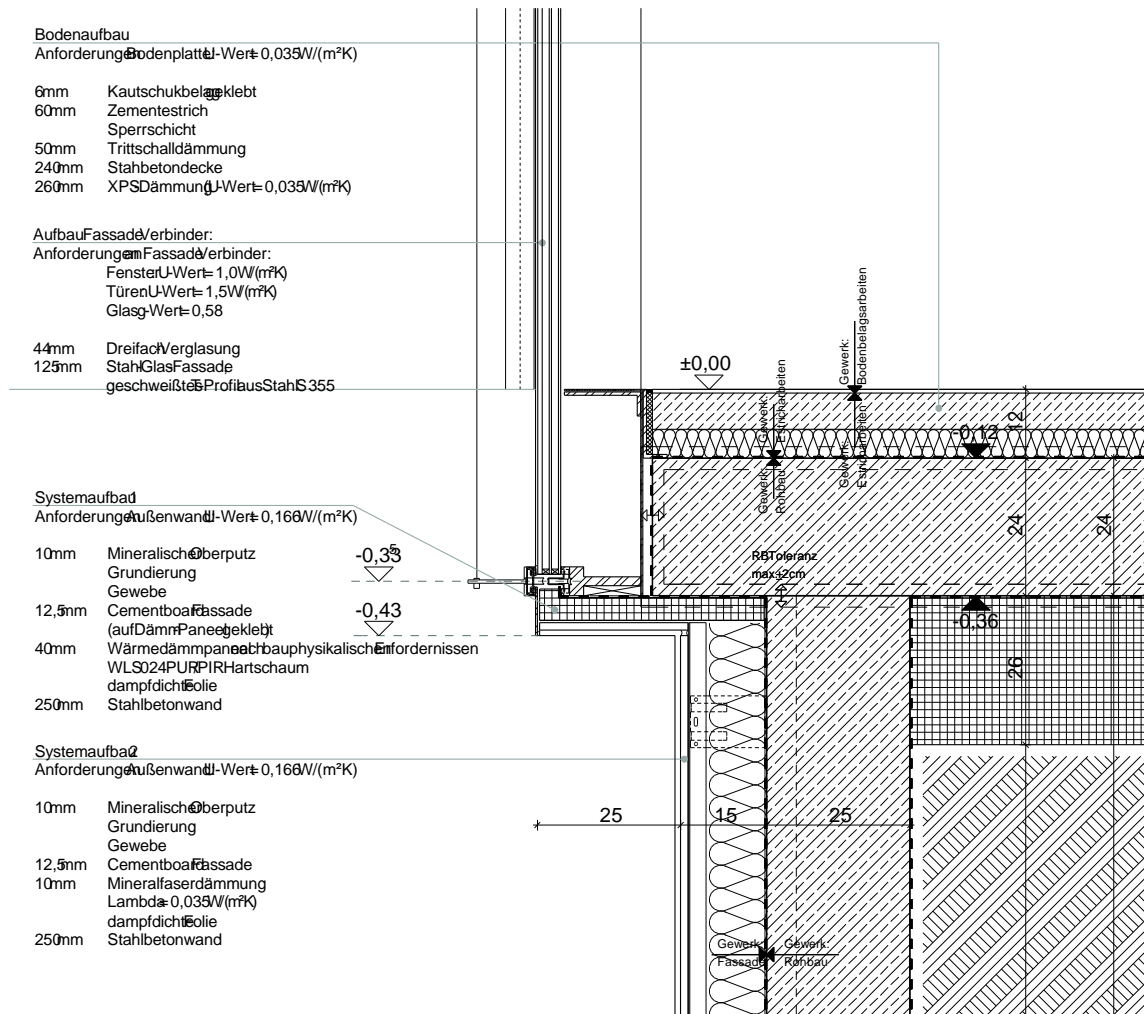


Abbildung 4-33: Ausschnitt aus Schnitt-Detail Fassade Verbinder an Grund [36]

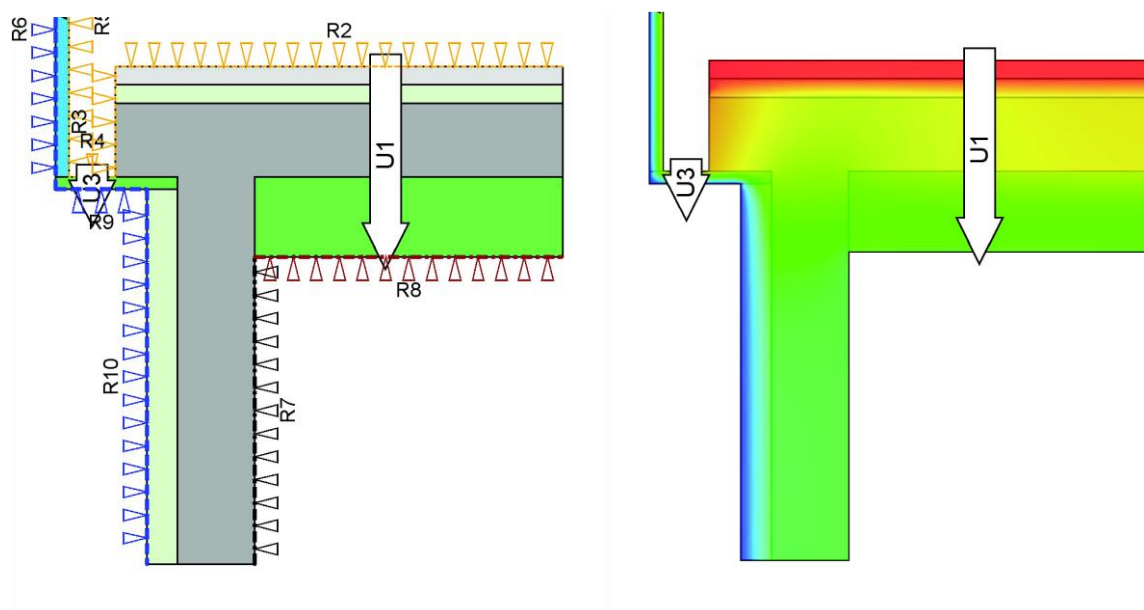


Abbildung 4-34: Vereinfachte Darstellung des Sockelbereichs Verbinderbauwerks mit Streifenfundament aus der Wärmebrückenberechnung [33]



### 4.4.8.3 Ergebnisse Wärmebrückenberechnung

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass die vorgegebenen Konstruktionsdetails kaum Schwächen der thermischen Hülle verursachen. Der individuelle Zuschlagswert für das gesamte Gebäude beträgt der  $\Delta U_w = 0,0315 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Lediglich die Anschlüsse im Bodenbereich bieten deutliches Verbesserungspotential. Durch eine Wärmedämmung der Streifenfundamente könnte der Zuschlagswert deutlich von  $\Delta U_w = 0,0315 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf  $0,025 \text{ W/m}^2\text{K}$  reduziert werden [33]. Die Differenz von individuellem Zuschlag zur pauschalen Annahme von der  $\Delta U_w = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  beträgt  $0,0685 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Durch eine Berücksichtigung des berechneten Wärmebrückenzuschlagsfaktors in der Energiebedarfsberechnung hätte der Energiebedarf weiter gesenkt werden können. Durch die detaillierte Berechnung kann neben der Prüfung und Optimierung der Anschlüsse auch ein genereller Nutzen hinsichtlich des Wärmeschutznachweis erzielt werden. So erscheint es denkbar, dass im Wärmeschutznachweis bei detaillierter Betrachtung der Wärmebrücken der gleiche  $H_t$ -Wert mit weniger Wärmedämmstärke der umschließenden Hülle erreicht werden kann. Neben den Wärmebedarf beeinflussen Wärmebrücken auch den Transmissions-Wärmeverlust für die Bestimmung der normativen Heizlast nach DIN EN 12 831 [37]. Im Beiblatt 1 der Norm [38] wird für die Berechnung der Transmissionswärmestroms durch Wärmebrücken ein analoges Verfahren wie in DIN V 18 599 definiert. Die Heizleistung für die Bemessung der Heizungsanlage könnte reduziert werden. In der Heizlastberechnung für das HLG wurde bereits ein vermindertet Zuschlagswert von  $\Delta U_w = 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$  für die Wärmebrücken angenommen (Abschnitt 5.2 Seite 57).

### 4.4.9 Vakuumisolierpaneele VIP

#### 4.4.9.1 Motivation und Planung

Für die energetische Optimierung des Gebäudeentwurfs sollten besonders innovative Technologien bzw. Baustoffe eingesetzt werden. Mit Vakuumisolierpaneelen steht eine bekannte Technologie zur Erreichung höchster Wärmedämmeigenschaften von Baukonstruktionen auf kleinsten Raum zur Verfügung. Es ist zu konstatieren, dass dieser Technologie an Demonstration zur Marktdurchdringung fehlt. Es war angedacht die VIP an neuralgischen Punkten in der thermischen Hülle einzusetzen. Für die VIP wurden zunächst die folgenden Einsatzmöglichkeiten identifiziert.

- Im Bereich des Fenstersturzes, zwischen Einbaukasten des außenliegenden Sonnenschutzes und der Betonwand
- Als Dämmung unter der Dachterrasse, zur Reduzierung der Aufbauhöhe der Dachterrasse im OG um eine Barrierefreiheit Zugang zu ermöglichen.
- Außendecke unter dem Verbinder vor dem Foyer. Hiermit kann die lichte Höhe des Durchgangs erhöht werden.

Der zunächst geplante großflächige Einsatz wurde aus Kostengründen nicht umgesetzt. Im Rahmen des Bauprojektes wurden nur an einer Position Vakuumisolierpaneele zur Demonstration vorgesehen. Als Einsatzort wurde die Unterführung unter dem Verbinder vor dem Foyer bestimmt. Hiermit sollte die lichte Höhe des Durchgangs erhöht werden.





Abbildung 4-35: Blick auf den Durchgang links: aus Ost, rechts: aus West

Als Fabrikat wurde ein VIP der Firma VACU-ISOTEC gewählt. Die VIP-Dämmschicht aus Kiesel-säure ist mit einer 10 mm umlaufenden Schaumpolystyrol und beidseitiger Kaschierung mit 4 mm Kunststoffrecyclingplatte ummantelt. Die Wärmeleitfähigkeit des VIP-Moduls ist  $\lambda = 0,005 \text{ W/mK}$ . Hinsichtlich des Brandverhaltens ist Baustoff der Baustoffklasse B1 zuzuordnen. Die Gesamtdicke beträgt  $d = 28 \text{ mm}$ . Die VIP sollten vollflächig auf eine Fläche von  $113 \text{ m}^3$  auf der Stahlbetondecke mit systemzugehörigem Kleber befestigt werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt das VIP mit metallisch glänzender Oberfläche umschlossen von einer Schutzschicht aus Schaumpolystyrol.



Abbildung 4-36: Foto eines Musters der VIP-Dämmung

#### 4.4.9.2 Ereignisse in der Bauausführung

Im Rahmen der Bauausführung kam es ab dem Sommer 2011 zwischen dem Objektleiter/ Planer Architektur, dem Bauherrn und dem AN-Fassade zum Streit über die sachgemäße Ausführung der Befestigung der VIP. Der AN-Fassade vertrat den Standpunkt, dass die im LV beschriebene Befestigung mittels Kleber nicht zulässig sei und eine technische Lösung mit zusätzlicher Vergütung entwickelt werden müsse. Im März 2012 trat der Bauherr an das Monitoring-Team heran, die VIP Dämmung evtl. nicht zu installieren. Es wurde dargelegt, dass aus Sicht des Bauherrn, der einzige Grund an der Vakuumdämmung festzuhalten die Erwähnung dieser neuartigen Dämmung im Antrag zu diesem Monitoringprojekt war. Es wurde befürchtet, dass ohne Verwendung der VIP, Fördergelder zurückgezahlt werden müssten. Die Absicht, die VIP nicht zu installieren wurde mit den oben genannten Schwierigkeiten begründet. Zu diesem Zeitpunkt war der Baufortschritt be-

reits soweit verzögert, dass eine Verlängerung des Monitoring-Projekts für die Zielerreichung beantragt werden musste. In Hinblick auf die Rückzahlung der Fördergelder konnte durch das Monitoring-Team keine Aussagen gemacht werden. Im Ergebnis wurden die VIP-Paneele auch mittels haltender Unterkonstruktion befestigt.



Abbildung 4-37: Blick auf Anker für Haltekonstruktion der VIP (Aufnahmedatum 03.05.2012)



Abbildung 4-38: Blick auf verschlossene Abdeckung der VIP (Aufnahmedatum: 29.05.2012)

Eine Dokumentation zum Einbau der VIP durch Bilder oder Bautagebücher wurden dem Monitoring-Team, trotz mehrfacher Anfrage an Objektleiter bzw. Bauherren nicht übergeben. Endgültige Kostenkennndaten sind nicht bekannt. Rückblickend kann konstatiert werden, dass der hohe Aufwand zur Durchsetzung der Installation der VIP und die negativen Folgen auf den weiteren Bauverlauf im Vergleich zum Nutzen sehr hoch war und evtl. auf eine Installation hätte verzichtet werden sollen. Des Weiteren kann formuliert werden, dass Leistungsbeschreibungen stets eindeutig formuliert sein sollten.

## 4.5 Heiz- und Kühldecken

### 4.5.1 Vorbemerkungen

Um Umweltenergiequellen und -senken nutzbar zu machen, sind niedriger Temperaturdifferenzen zwischen Übertragungssystem und Umweltquelle anzustreben. Um auch bei niedrigen Temperaturdifferenzen leistungsgerechte Versorgung sicherzustellen, sind im Vergleich zu konventionellen Systemen große Übertragungsflächen notwendig. Diese Flächen werden durch Nutzung (Aktivierung) der raumumschließenden Bauteile erschlossen. Als Fachbegriff hierfür hat Thermoaktivierte Bauteilsystem (TABS) etabliert.

Das gewählte System kann als vollflächig abgehangene Trockenbauplatten mit darin integrierten Kapillarrohrmatten beschrieben werden. Die Rückseite der Platten ist wärmegeklämt.

Es unterscheidet sich daher konstruktiv deutlich von anderen TABS wie Betonkernaktivierung, im Raum verorteten Heiz- und Kühlsegel oder eingeputzte Kapillarrohrmatten. Die grundsätzliche Wirkweise ist jedoch identisch.

Das System lässt sich wie folgt charakterisieren.

Vorteile

- Thermische leichte Bauweise durch Abhangdecke mit zusätzlicher Dämmung auf der Rückseite ermöglicht schnelle Reaktionszeiten (Zeit von Betriebsbeginn, mit Durchströmung der Platten, bis erreichen der Betriebstemperatur auf der Oberfläche, weniger als 5 Minuten)
- Verbindung von thermischer Aktivierung und Akustikelementen möglich
- Schaffung von Installationsraum (Lüftungskanäle, oder sonstige Medien unter abgehangener Decke, Wände)

Nachteile:

- hoher Planungs- und Überwachungsaufwand in den Gewerken (Heizung, Elektro, Trockenbau)
- leichte Bauweise macht aktive Kühlung im Sommer erforderlich
- theoretische Gefahr der Beschädigung der oberflächennahen Rohre

Das gewählte System wurde durch den Hersteller, die Klimadomo GmbH aus Kölleda in Thüringen, bereits erfolgreich vertrieben und kann als bewährte technische Lösung angesehen werden. Der Hersteller setzt die Platten aus konventionellen Gipskartonplatten und Kapillarrohrmatte zusammen. Untersuchungen im Rahmen eines energetischen Monitorings im realen Betrieb waren jedoch nicht bekannt. Daher kann diese Arbeit als relevante Demonstration eines innovativen Bauproduktes angesehen werden.

### 4.5.2 Planungs- und Bauablauf

Dem Hersteller des Systems wurde durch Architekt und Fachplaner detaillierte Angaben zum Gebäude und sonstigen Installationen gemacht. Der Hersteller entwickelte daraus eine Werkplanung für die Installation mit detaillierten Verlege- und Anschlussplänen. Aus diesen ging die Position jeder der einzelnen Platten hervor. Die Platten wurden auf die Baustelle geliefert und durch das Gewerk Trockenbau montiert. Für die Aufnahme der Platten wurde konventionelles Tragsystem aus verzinkten Stahlblechprofilen verwendet. Für den Anschluss der Platten an die hydraulische



Verteilung wurden Polypropylen-Rohre, teils im Tichelmannsystem, durch das Gewerk Heizung in dem Zwischenraum zwischen Rohbaudecke bzw. Wand verlegt. Die Rohre in der Verteilung wurden mittels Kunststoffschweißen gefügt. Die Zuleitung zur Unterverteilung wurde in Stahlrohr ausgeführt. Die in die Gipskartonbauplatten eingelassenen Kapillarrohrmatten aus Polypropylen wurden an den Stammrohren mit flexiblen Schläuchen mit Steckkupplungen untereinander bzw. mit der Unterverteilung verbunden.

Die Rückseite der Platten wurde mit einer 4 cm starken Wärmedämmung mit  $\lambda=0,04$  versehen.

Nach der Installation wurden die Teilstrecken durch Druckprobe auf Dichtheit überprüft. Anschließend wurden die Plattenstöße verspachtelt.

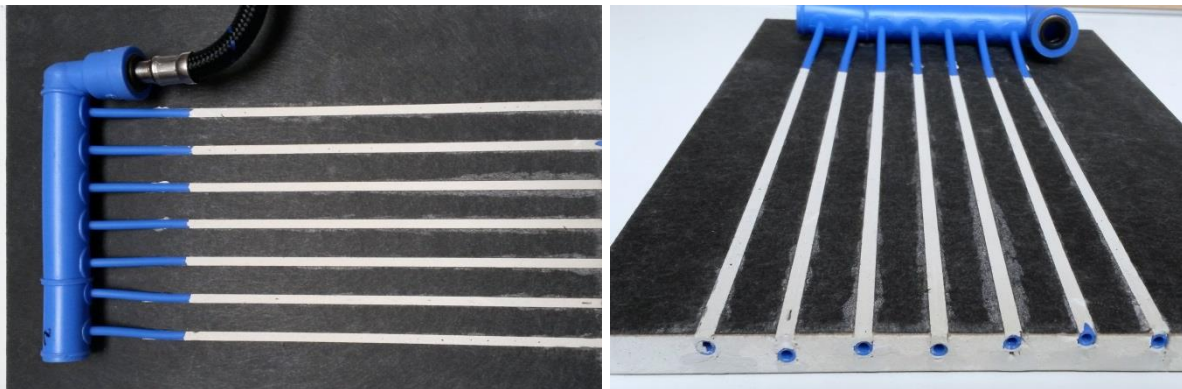


Abbildung 4-39: Foto eines Schnittmusters der verbauten Platten

Es wurde im Gebäude insgesamt ca. 1.500 m<sup>2</sup> Kühl- und Heizdecken sowie 150 m<sup>2</sup> aktivierte Wandfläche installiert. In den Unterrichtsräumen wurden entsprechend des Akustikgutachtens aktive Deckenelemente als Akustikelemente ausgeführt (siehe Abbildung 4-43).



Abbildung 4-40: links: patentierter Steckverbinder mit flexiblen Schlauch; rechts: Blick auf die Unterverteilung in aktivierter Hörsaalwand vor Montage der Platten



Abbildung 4-41: Unterkonstruktion und Verteilung vor Montage der Kühldecken



Abbildung 4-42: links: seitlicher Schnitt der Deckenkonstruktion, rechts: Rückseite eine vorgefertigten Platte



Abbildung 4-43: aktivierte Wand im fertigen Zustand mit Akustikelementen im oberen Bereich

Jeder Raum ist separat regelbarer. Für Büroräume mit einer NGF von 12 bis 20 m<sup>2</sup> ist ein Hydraulikkreis ausreichend. Für die größeren Räume, wie z.B. Hörsaal, Planungslabore wird aus einem Verteiler mehrere Heizkreise

## 5 Systembeschreibung TGA

### 5.1 Energiekonzept TGA

Neben der hochwärmegedämmten Gebäudehülle soll das Anlagenkonzept mit verschiedenen innovativen Komponenten sowie eine hoher Ausstattungsgrad der Raum- und Anlagenautomation einen niedriger Energieverbrauch und hoher Komfort erreicht werden.

### 5.2 Normative Heizlast

Für die Auslegung der Systemkomponenten Heizung wurde eine Heizlastberechnung nach DIN EN 12831:2003-08 [37] und Beiblatt [38] durch den Fachplaner TGA angefertigt [39]. Nachfolgend sind die Kenndaten dieser Berechnung dargestellt.

Tabelle 5-1: Annahmen und Randbedingungen zur Norm-Heizlastberechnung

Gebäudelage	moderate Abschirmung
Gebäudemasse	Schwer, $c_{\text{WirK}} = 50,0 \text{ Wh/m}^3\text{K} \cdot V_e$
Norm-Außentemperatur	$\theta_e = -14 \text{ }^\circ\text{C}$
Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz	$n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$
Innenraumtemperaturen	
Aufenthaltsräume	$\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Verkehrswege	$\theta_i = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
Technik und Funktionsräume	$\theta_i = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
Absenkdauer Heizbetrieb	7 h
Beheizte Gebäudenutzfläche	1.745,51 m <sup>2</sup>
Beheiztes Netto-Gebäudevolumen	5.332,88 m <sup>3</sup>
wärmeübertragende Umfassungsfläche	4.472,93 m <sup>2</sup>
Spezifischer Transmissionswärmeverlust	$H_T' = 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$
Zuschlag auf Wärmebrücken	0,05 W/m <sup>2</sup> K

Tabelle 5-2: Ergebnisse der Norm-Heizlastberechnung

Transmissionswärmeverluste	41,204 kW
Mindest-Luftwechsel (ohne RLT)	12,572 kW
Normheizlast	53,77 kW
flächenspezifische Normheizlast	30,81 W/m <sup>2</sup>
Volumenspezifische Normheizlast	10,08 W/m <sup>3</sup>
Wiederaufheizfaktor	$f_{\text{RH}} = 22,00 \text{ W/m}^2$

Die Auswertung der Berechnungsunterlage zeigte die folgenden unerwarteten oder dem Istzustand widersprechende Annahmen.

- Die Luftdichtheit wurde mit  $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$  angenommen. Dies widerspricht den Vorgaben für Gebäude bzw. Räume mit Zu- und Abluftanlage nach damals gültiger DIN 4108-7:2001-08 mit mindest  $n_{50} = 1,5^{-1}$  [28]. Der tatsächlich gemessene Wert beträgt  $n_{50}=0,25$  (vgl. Abschnitt 4.4.6 Seite 39).
- Die thermische Speichermasse des Gebäudes wurde mit schwer angenommen. Bereits im Wärmeschutznachweis wird von einer leichten Bauweise ausgegangen [16].
- Der Wärmebrückenzuschlag wurde mit  $\Delta U_{\text{WB}}=0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$  angenommen, obwohl keine bauseitige Ausführung der Bauteilanschlüsse nach DIN 4108 Beiblatt 2 oder Berechnungen nach DIN EN 10211 vorgesehen waren. Die gemachte Annahme liegt jedoch näher an den

tatsächlichen Umständen als der anzunehmende Zuschlag von  $\Delta U_{WB}=0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  (vgl. Abschnitt 4.4.8. Seite 45)

- iv. In der Heizlastberechnung bleiben die RLT-Anlagen unberücksichtigt.

### 5.3 Normative Kühllast

Für die Auslegung der Systemkomponenten wurde eine Heizlastberechnung nach durch den Fachplaner TGA angefertigt.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Kühllastberechnung

Gebäudelage	City
Gebäudemasse	
Klimazone nach DIN 4710	9
Kühllastzone	2
Jahresmittel der Außentemperatur	$\Theta_{me} = 7,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Raumtyp	M

Tabelle 5-4: Ergebnisse zur Kühllast Gebäude

Maximum der Kühllast	16 Uhr im Juli
Kühllast sensibel	$\phi = 57,031 \text{ kW}$
	$42 \text{ W/m}^2$
	$13 \text{ W/m}^3$
Davon durch:	
Personen	17,51 kW
Beleuchtung	14,14 kW
Maschinen	9,99 kW
Transmission Fenster	2,937 kW
Strahlung Fenster	10,29 kW
Außenflächen	2,83 kW
Sonstiges	-0,68 kW

Tabelle 5-5: Ergebnisse ausgesuchter Räume Kühllast

Raum	W	W/m <sup>2</sup>
Hörsaal groß	9,10	74
Computerpool	4,96	82
Planungslabor	6,46	55
Geschäftsführer (EG, Verbinder, Ost)	0,67	36
Arbeitsraum OG	0,66	56
Verkehrsfläche – Verbinder (West)	4,51	101

### 5.4 Komponenten im Detail

#### 5.4.1 Adsorptionswärmepumpe

Ziel des Förderprogramms war unter anderem die wissenschaftliche Begleitung von innovativen Komponenten, die wesentlich zur Reduktion des Primärenergieaufwandes im Gebäudebetrieb beitragen. Die eingesetzte Adsorptionswärmepumpe (AWP) Fabrikat SORTECH Typ greift dieses Ziel im besonderen Maße auf. In der zugänglichen Literatur waren keine Ergebnisse eines energetischen Monitoring für eine thermische angetriebene Adsorptionswärmepumpe, für die ausschließlich Nutzung im Heizbetrieb dokumentiert. Durch die angestrebten thermischen Arbeitszahlen der



Wärmepumpe von bis zu 1,3 könnte der Primärenergieaufwand für Fernwärme um 25 % gesenkt werden.

Der Adsorptionsprozess wird durch Fernwärme mit hoher Temperatur, bis ca.  $\theta_{VL} = 90\text{ °C}$ , angetrieben. Durch diesen Prozess wird Wärmeenergie einer Umweltenergiequelle mit niedrigem Temperaturniveau  $\theta = 5\text{ °}$  bis  $20\text{ °C}$  entzogen und auf einem mittleren Temperaturniveau bereitgestellt ( $\theta = 25\text{ °}$  bis  $35\text{ °C}$ ).

Die Entscheidung für den Einsatz der AWP war dem innovativen Charakter des Projektes geschuldet. Zur Erreichung der primärenergetischen Anforderung (Förderprogramm wie auch Wärmeschutznachweis) war der Einsatz nicht erforderlich, vor allem aufgrund des niedrigen Primärenergiefaktors der Fernwärme.

#### **5.4.2 Regenwasserzisterne**

An den Neubau grenzt das im Jahr 2000 erbaute Forschungsgewächshaus der Liegenschaft. Zu dem Gewächshaus gehören zwei große je  $1.200\text{ m}^3$  fassende Regenwasserzisternen.

Diese wurden vor dem Gewächshaus, zwischen den Neubau und dem Gewächshaus fasst vollständig ins Erdreich eingelassen. In diesen Zisternen wird das gesamte Regenwasser der Dachentwässerung gesammelt und im Gewächshaus bzw. für Grünflächen zur Bewässerung genutzt. Das Regenwasser wird nicht als Brauchwasser, für z.B. WC-Spülung oder ähnliches genutzt. Eine der beiden Regenwasserzisternen ist auch als Löschwasserreservoir vorgesehen. Mindestens  $250\text{ m}^3$  des Füllvolumens müssen als Löschwasserreserve vorgehalten werden.

Aufgrund der unmittelbaren Nähe zum Gebäude wurde die energetische Nutzung als Wärmequelle- und Wärmesenke des Regenwassers bereits in der frühen Phase der Planung vorgesehen. Das energetische Potential sollte mittels Wärmeübertrager in der Regenwasserzisterne erschlossen werden. In der Zisterne sollten dazu Rohrbündel bzw. über- oder durchströmte Platten montiert werden. Es wurden Kapillarrohrmatten oder PE-Rohre für die Ausführung angedacht.

Es sollte die Förderung des Regenwassers, also Entnahmen aus der Zisterne, vermieden werden.

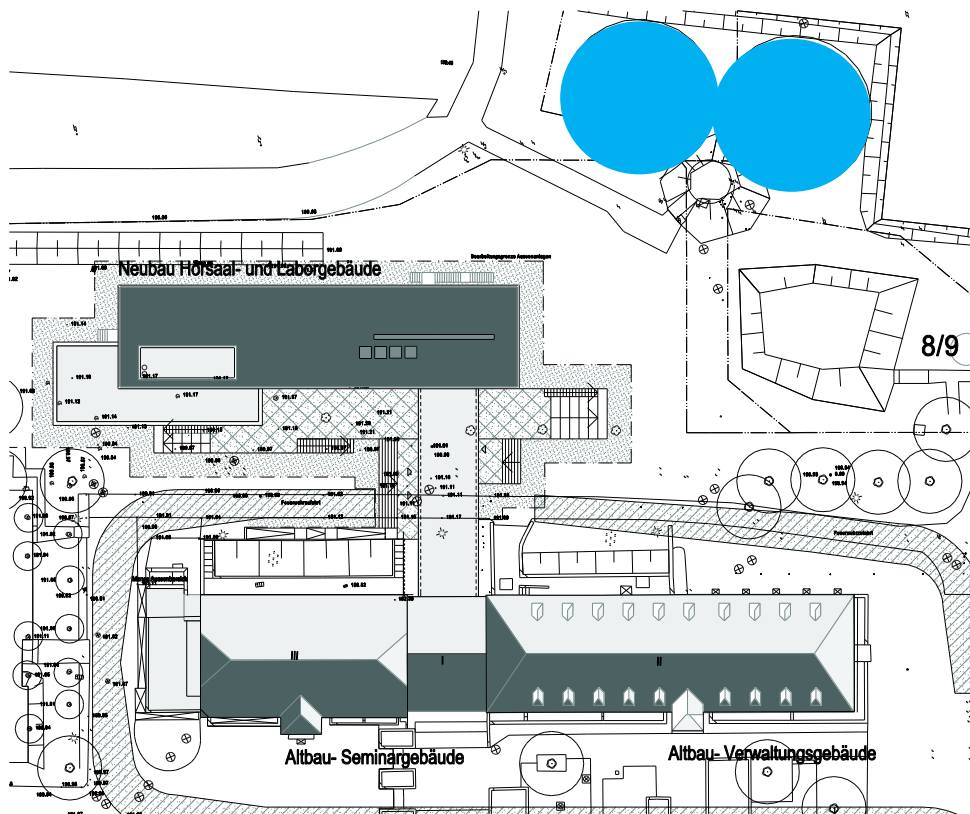


Abbildung 5-1: Lageplan mit markierten Regenwasserzisternen Ausschnitt aus [40]



Abbildung 5-2: links: oberirdischer Zugang zu beiden Zisterne, rechts: Blick auf den Zugang von innen

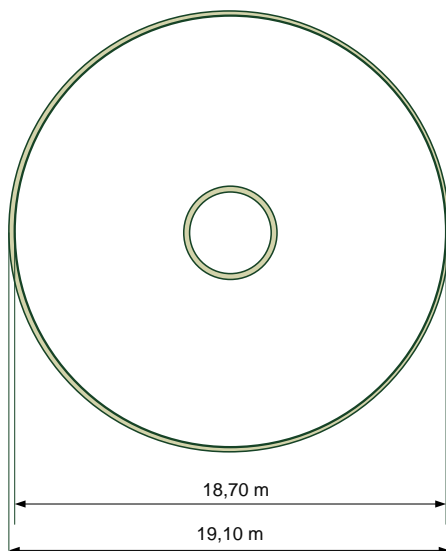


Abbildung 5-3: Skizze Grundriss der Regenwasserzisterne

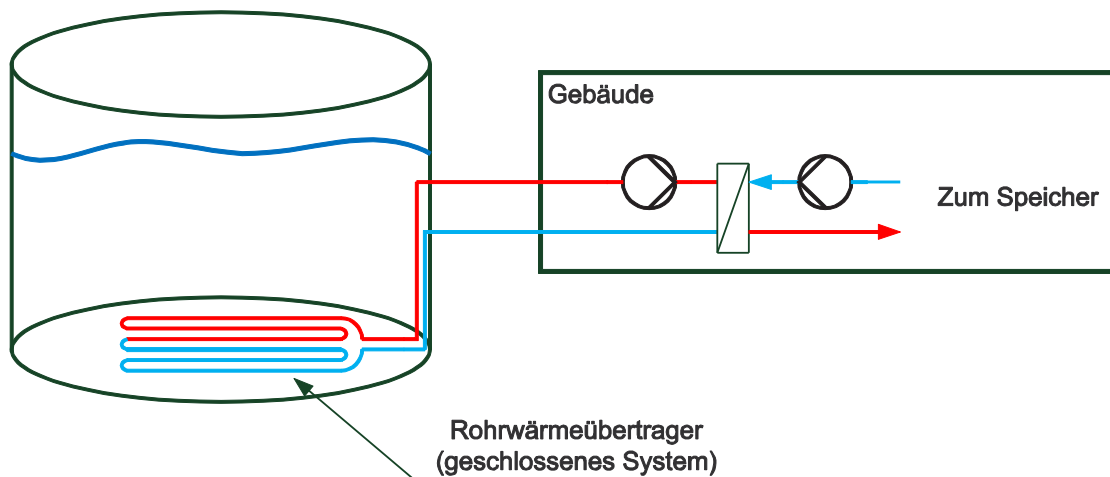


Abbildung 5-4: Prinzipskizze der geplanten Hydraulik zur thermischen Nutzung des Regenwassers

Detaillierte Berechnungen zeigten jedoch, dass die erforderliche thermische Leistungen über frei verlegte Rohr in einem stehenden Fluid (Regenwasser), mit geringer Temperaturdifferenz, nur mit sehr großer Rohrmantelfläche erreicht werden könnte [41]. Neben den begrenzten Leistungskennwerten, traten während der Ausführung größere baupraktische Probleme auf z.B. die Rohrmatten in der Zisterne zu befestigen. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wurde anstatt eines großflächigen Wärmeübertrager in der Zisterne das Konzept dahingehend geändert, dass Regenwasser aus der Zisterne mittels Pumpe in das Gebäude gesaugt, und dort mittels Plattenwärmeübertrager die energetische Nutzung realisiert wird. Bautechnisch ist die Umsetzung einfach. Aus dem Heizungsraum werden im Erdboden zwei Rohrstränge (Vor- und Rücklauf) an der obersten Stelle in die Zisterne geführt. In der Zisterne werden die Rohre auf den Boden gelegt (siehe Fotos Abbildung 5-6 Seite 62)

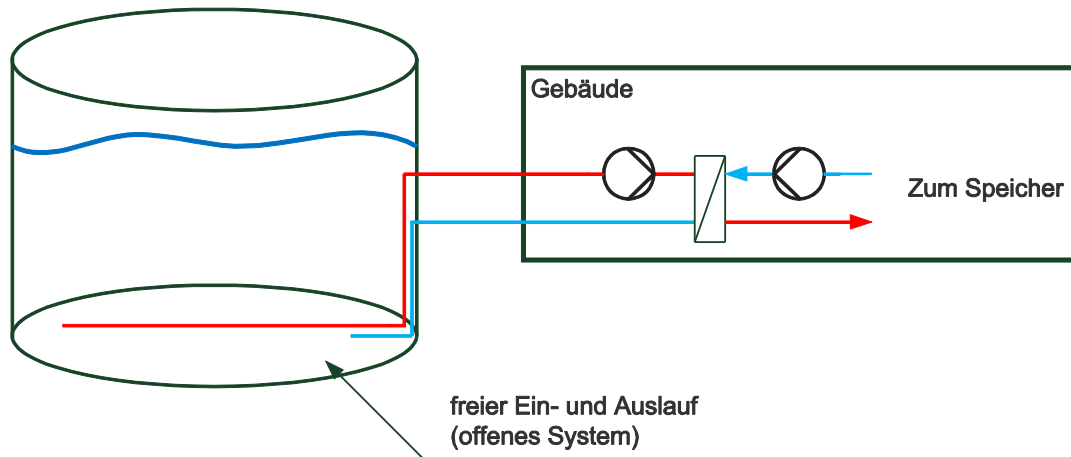


Abbildung 5-5: Prinzipskizze der gebauten Hydraulik zur thermischen Nutzung des Regenwassers



Abbildung 5-6: links: Rohreinführung an der Decke der Zisterne, links: freier Ein- und Auslauf für Regenwasser

Das hydraulische System entspricht daher nicht, wie ursprünglich geplant einem geschlossenen Kreislauf, sondern einem offenen hydraulischen System, welches durch das Regenwasser beaufschlagt wird (siehe Abbildung 5-5). Die Füllhöhe des Regenwassers ist variabel und liegt in der Regel unter der geodätischen Höhe des Heizungsraums. Dies hat zur Folge, dass eine geodätische Höhendifferenz überwunden werden muss.

In der ersten Planung für das geschlossene System mit Wärmeübertrager in der Zisterne wurde eine Umwälzpumpe im Neubau vorgesehen. Die Pumpe wurde für die neue Situation in der baubegleitenden Planung nicht auf die geänderten hydraulischen Bedingungen angepasst.

Die zu überwindende geodätische Höhe wurde nicht berücksichtigt. Auch wurde die praktische Begrenzung der maximal überwindbaren geodätischen Höhendifferenz bei Ansaugung nicht be-

wertet. Um ein ansaugen der Pumpe aus dem Heizungsraum zu gewährleisten, wurde ein Spül- und Füllventil installiert. Zusätzlich wurde durch den AN-Heizung am Einlassrohr ein Rückschlagventil installiert, was das Leerlaufen des Rohres verhindern soll. Diese Installationsarbeiten wurden bei wieder gefüllter Zisterne mit Drucklufttauchgerät unter erschwerten Bedingungen durchgeführt. Die durch das Monitoring-Team geäußerten Bedenken wurden nicht aufgegriffen. Als alternative wurde die Installation einer Tauchpumpe in der Regenwasserzisterne vorgeschlagen.

### 5.4.3 Brunnenanlage

#### 5.4.3.1 Vorbemerkungen

Die Grundwasserbrunnen dienen im Winter als Wärmequelle im Sommer als Wärmesenke. Die Brunnen wurden in der Planung ergänzend zur Nutzung der Regenwasserzisterne als „Fail Safe“ vorgesehen. Die Auslegung erfolgte anhand der berechneten erforderlichen Kühllast des Gebäudes. Es wurde zwei Brunnenanlagen mit jeweils einem Saug- und einem Schluckbrunnen errichtet. Zunächst war angedacht, lediglich die Lüftungsanlagen und nicht die TABS mit Brunnenwasser zu kühlen. Dies wurde als nicht praxisgerecht verworfen.

Die Saugbrunnen sind in unmittelbarer Nähe vom Gebäude verortet. In den Saugbrunnen sind Unterwasserpumpen installiert die vom Gebäude mittels FU zur Leistungsanpassung mit elektrischer Energie versorgt werden. Es Vorgabe der Genehmigungsbehörde, dass der Abstand zwischen Saugbrunnen und Schluckbrunnen mindestens 100 m beträgt. Die Schluckbrunnen liegen ca. 20 m auseinander.



Abbildung 5-7: Lageübersicht zur Brunnen auf dem Gelände der FH Erfurt Ausschnitt aus [40]

Tabelle 5-6: Kenndaten der Brunnenanlage als Wärmequelle und -Senke

	Brunnenanlage 1	Brunnenanlage 2
Rohrleitungsdimension	DN 65	DN 80
Rohrleitungslänge bis Gebäude	20 m	68 m
Rohrleitungslänge ab Gebäude	170 m	162 m
Rohrleitungslänge gesamt	190 m	230 m
Tiefe Saugbrunnen		
Maximaler genehmigter Förderstrom	7 m³/h	9 m³/h
Maximaler genehmigter Förderstrom Kurzzeit (1 bis 2 Tage)	8 m³/h	10 m³/h
Maximale Temperaturdifferenz	5 K	
Durchschnittliche genehmigte Entnahmemenge	60.000 m³/a	
maximale genehmigter Entnahmemenge	80.000 m³/a	
maximale thermische Leistung	41 kW	50 kW
maximale thermische Leistung Kurzzeit (1 bis 2 Tage)	47 kW	58 kW
elektrische Pumpenleistung		
spezifischer Druckverlust Rohrleitung bei Nennvolumenstrom	85 Pa/m	85 Pa/m
Druckverlust Rohrleitung Pumpe		
	Grundfos SP8A-7	Grundfos SP14A-5
Nennvolumenstrom der Pumpe	8 m³/h	14 m³/h
max. Wirkungsgrad $\eta$	60 %	60 %
Bereich	4 bis 11 m³/h	7 bis 18 m³/h
Förderleistung Pumpe	3,5 bis 1,7 bar	3,1 bis 1,4 bar
elektrische Leistungsaufnahme Pumpe	1,1 kW	1,5 kW

### 5.4.3.2 Planung und Genehmigung

Durch den Bauherrn wurde das Ingenieurbüro Krause für Geologie und Umwelt für die hydrogeologische Planung und Begleitung der Arbeiten beauftragt [43]. Zunächst wurde ein Antrag zur Errichtung der Brunnenanlagen am 07.07.2011 eingereicht. Durch die untere Wasserbehörde wurde daraufhin am 02.08.2011 eine Stellungnahme zur Testbohrung abgegeben. Vom 17.08 bis zum 02.09 wurden vier Brunnen geteuft. Nach der Bohrung wurden Pumpversuche vom 13.09 bis zum 23.09.2011 durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Versuche wurde eine hydrogeologische Dokumentation zum 20.10.2011 erstellt. Auf Basis des Gutachtens wird die wasserrechtliche Erlaubnis der Entnahme am 15.11.2011 erteilt.

### 5.4.3.3 Ausführung

Die Bohrungen wurde mit einem 500 mm Bohrdurchmesser auf 9 bis 10 m Tiefe geteuft. Das Grundwasser wurde in ca. 6 m Tiefe angeschnitten. In die Bohrlöcher wurden Brunnenrohre DN 250 eingebracht. Das Filterrohr beginnt ab einer Tiefe von ca. 6 m und ist mit einer Schlitzweite von 1 mm ausgeführt. Der Zwischenraum zwischen Brunnenbohrloch und Brunnenrohr wurden von unten beginnen mit Filterkies, Gegenfilter, Tonsperre und Bohrklein verfüllt. Die Druckleitungen sind in DN 80 bzw. DN 65 ausgeführt. In der ersten Planung waren die Leitungen aus den Brunnenstuben bis zum Gebäude, zunächst als Rohre mit Wärmedämmung und Begleitheizung ange-dacht. In der Ausführung wurden dann jedoch Rohre ohne Begleitheizung aber mit Wärmedämmung eingesetzt. Für die Leitung vom Gebäude zu den Schluckbrunnen wurden Rohre ohne Wärmedämmung verwendet.



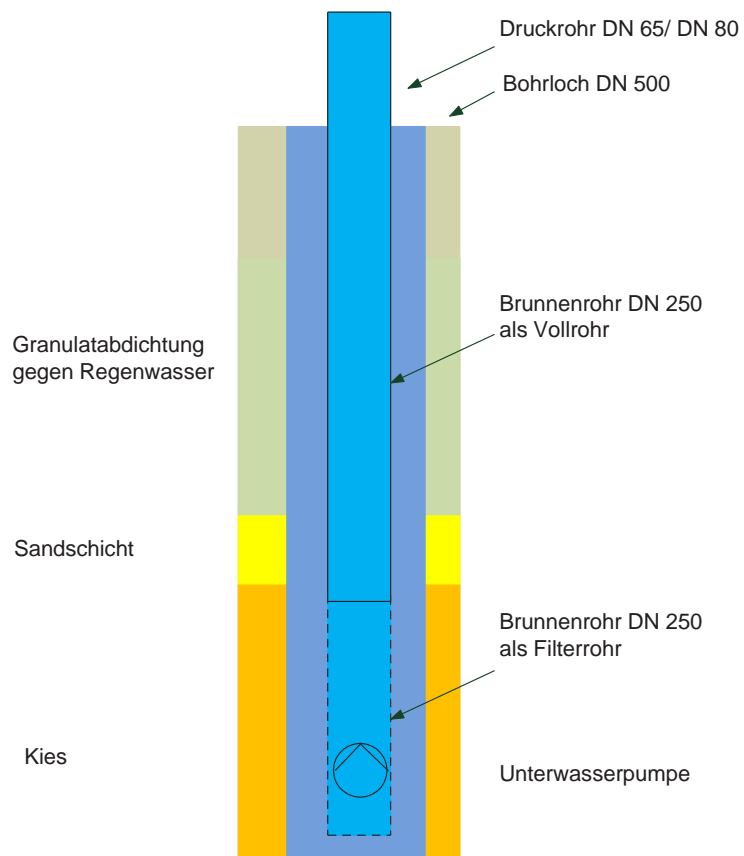


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung des Brunnenaufbau nach [48]



Abbildung 5-9: links: mobiles Bohrgerät für Saugbrunnen; rechts: Detail des Bohrers



Abbildung 5-10: links: Bohrgerät für Saugbrunnen Nr.2; rechts: Detail des Bohrer



Abbildung 5-11: links: Brunnenstube mit Rohrleitung für Grundwasser und Kabel zur Energieversorgung Pumpe. rechts: Blick in die Brunnenstube mit Rohrleitung und Absperrventil

### 5.4.3.4 Übergabe

Im Gebäude wird das Brunnenwasser jeweils über einen Plattenwärmeübertrager geführt. Parallel geschaltete Stromkreise mit jeweils einer UWP speisen den Speicher. Im Winter wird der Speicher von oben nach unten durchströmt. Damit wird wärmeres Wasser oben eingeleitet. Für den Som-



merbetrieb wird die Durchströmungsrichtung mittels Klappen umgestellt und kühleres Wasser unten eingespeist. Diese Umstellung war bis 2014 fehlerhaft und genau umgekehrt realisiert (vgl. Speicher)

### **5.4.3.5 Diskussion Hydraulik**

In der hydraulischen Auslegung der Tauchpumpe ging die geodätische Höhe von Grundwasseranschnitt bis zur Heizungszentrale mit ein. Ob die hydraulische Höhe im Betriebsfall zu überwinden ist, ist fraglich und konnte nicht abschließend geklärt werden. Mit Einleitung in den Schluckbrunnen wird auf einer tieferen geodätischen Höhe eingeleitet als entnommen, was theoretisch zur Folge haben könnte, dass die geodätische Höhe nicht zu überwinden ist bzw. zurückgewonnen wird. Geht die hydraulische Höhe in die Druckbilanz nicht ein, reduziert sich der Druckverlust der Brunnenanlage. Mit der Änderung der hydraulischen Anlagenkennlinie, würde sich der Betriebspunkt auf der Pumpenkennlinie verschieben, was wiederum zu einem höheren Volumenstrom führt. Im Betrieb konnte eine instabile Strömung festgestellt werden, die zu verschiedenen Problemen führte.

### **5.4.4 EDV-Kühlung**

#### **5.4.4.1 Vorbemerkungen / Planung und Umsetzung**

Im Untergeschoss des Gebäudes ist ein Raum für die Aufstellung bzw. den Betrieb der zentralen Rechentechnik vorgesehen. Die Rechentechnik findet in drei EDV-Schränken Platz die gekühlt werden müssen. Zunächst war für die Kühlung der Technik bzw. des Raumes eine konventionelle Kühlung mittels Split-Gerät vorgesehen. Auf Anregung des Monitoring-Teams wurde das Konzept geändert und die EDV-Kühlung in das Heiz- und Kühlsystem des Gebäudes integriert. Dies ist ohne den Einsatz von Klimakälte möglich. Im Sommer wird die EDV-Kühlung aus der Energiesenke Brunnen bzw. Zisterne gekühlt. Im Winter dient die Abwärme der EDV-Kühlung der Wärmepumpe als Wärmequelle. Auch wenn im Winterfall keine Wärmeabnahmen durch das Gebäude erfolgt, ist die Kühlung gewährleistet. Die Vorteilhaftigkeit des Systems sowie weitere Ausführungen zu diesem Thema wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit dargestellt, die unter [enob.info](http://enob.info) abgerufen werden kann [44]. Die Arbeit kommt zum Ergebnis, dass bezogen auf die konkrete Situation, mit einer sowieso zu errichtenden Brunnenanlagen, die gewählte Variante um bis zu 40 % günstiger ist und der Energieverbrauch deutlich gesenkt werden kann [44]. Daneben wurde auch die Anwendung von Kältemitteln vermieden. Die Bemessungsgröße für die Kühlung war die Angabe der IT-Abteilung FH-Erfurt, dass in der Endausbaustufe mindesten  $\dot{Q} = 14 \text{ kW}$  elektrische Leistung für die Rechentechnik und damit Kühlanforderung besteht.

Zu Beginn der Gebäudenutzung betrug die thermische Leistung nur 0,6 kW. Im Verlauf des Projektes wurde seitens der IT-Abteilung der FH Erfurt die zeitnahe Nutzung des Raumes wieder in Frage gestellt. Durch das Aufzeigen der großen Vorteile in der Kühlung wurde Anfang des Jahres 2015 ein Teil der IT-Infrastruktur des Standortes in den Raum verlegt. Damit erhöhte sich die thermische Leistung auf ca.  $\dot{Q} 1,5 \text{ kW}$ .

### 5.4.4.2 Technik

Für die EDV-Kühlung kommt ein wassergekühlter Serverschrank Fabrik Knürr Typ CoolLoop® zum Einsatz. Die maximale Kühlleistung ist bei einem Temperaturunterschied von  $\theta_{VL}=10\text{ °C}$  zu  $\theta_{VL} = 18\text{ °C}$  im Kühlmedium und Serverluft  $\theta = 20$  bis  $25\text{ °C}$  mit  $\dot{Q} = 30\text{ kW}$  angegeben. Das System besteht aus einer wassergekühlten Schrankeinheit in der die warme Server-Luft von einem Ventilator auf einen Luft-Wasser-Wärmeübertrager gefördert wird. Die thermische Leistungsregelung erfolgt über ein Drosselventil im Hydraulikkreis. Daneben ist ein konventioneller Umluftkühler zur Raumkühlung als Backup installiert. Die EDV-Kühlung ist an den zentralen Pufferspeicher direkt angeschlossen.

Mittels Umwälzpumpe wird das Fluid aus den Speicher zu Server bzw. Raumkühlung gefördert.

### 5.4.5 Betriebserfahrungen

Aus den Jahren 2013 bis Mitte 2015 können die folgenden qualitativen bzw. subjektiven Aussagen getroffen werden. Im Gebäudebetrieb wurden die Rohre in den aktivierten Bereich nicht beschädigt, hierzu bestanden im Vorfeld größere Bedenken. Trotz der direkten hydraulischen Verbindung (d.h. keine Systemtrennung) von diffusionsoffenen Rohrsystem Kapillarrohrmatten mit „schwarzen“ Stahlrohr mit Schweiß- und Schraubverbindung wurde keine Schäden durch Korrosion (z.B. Schraubgewinde) festgestellt. Die Korrosionsinhibitoren im Heizungswasser erscheinen bis zum heutigen Tag als wirksam.

### 5.4.6 RLT- Anlagen

Im Gebäude sind drei zentrale RLT-Anlagen zur Versorgung von Unterrichtsräumen sowie eine kleinere Zu- und Abluftanlage ohne WRG für die Belüftung der Nebenräume installiert. Die Zentralgeräte sind in fensterlosen Räumen im Untergeschoss des Gebäudes verortet. Die RLT-Anlage für die Labore ist im Heizungsraum installiert. Aus einem Zentralgerät werden die drei Unterrichtsräume „Planungslabor OG“, „Planungslabor EG“ und „Computerpool“ im EG versorgt. Um die Räume bedarfsgerecht zu versorgen, werden die Luftmengen über variable Volumenstromregler (VAV) je Raum vorgegeben. Diese sind jeweils im Zu- und Abluftkanal im Aufstellraum des Zentralgerätes verbaut. Die Ventilatorleistung soll über eine Kanaldruckmessung an den Bedarf dynamisch anpasst werden. Die Luft wird über das Dach angesaugt bzw. fortgeleitet.

Die beiden RLT-Anlagen „kleiner Hörsaal“ und „großer Hörsaal“ unterscheiden sich von der Anlage Planungslabor dadurch, dass diese Anlagen jeweils nur einen Raum versorgen. Die Luftmengenregelung erfolgt direkt am Ventilator. Die Zentralgeräte sind in einem separaten Raum neben dem Druckboden des großen Hörsaals bzw. unter dem kleinen Hörsaal installiert.

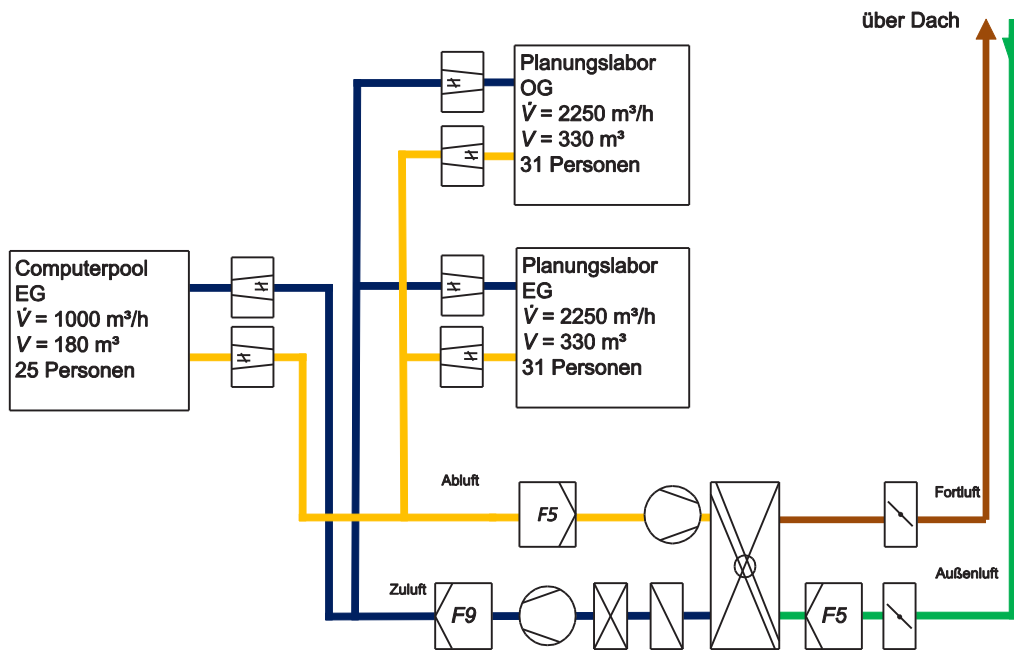


Abbildung 5-12: vereinfachtes Schema RLT-Anlage „Labore“

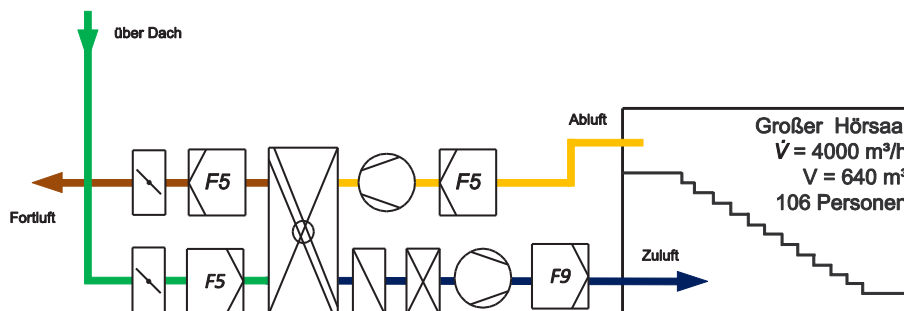


Abbildung 5-13: Schema RLT-Anlage „großer Hörsaal“

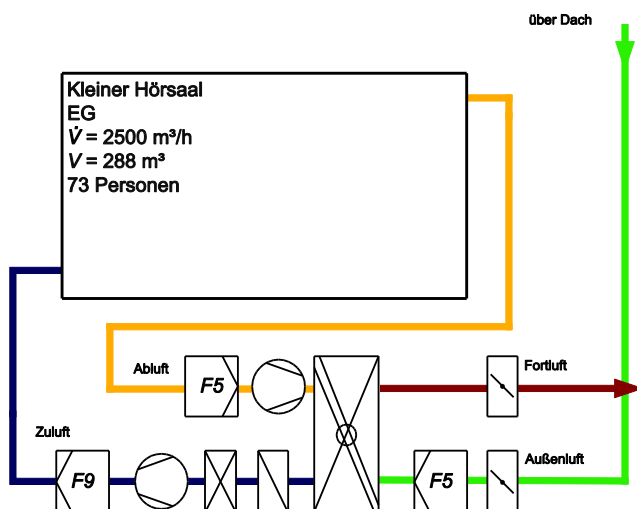


Abbildung 5-14: Schema RLT-Anlage „kleiner Hörsaal“

### 5.4.6.1 Messstellen Elektroenergieverbrauch

Der Elektroenergieverbrauch wird je RLT-Anlagen erfasst. Darin sind der Verbrauch der Ventilatoren, Umwälzpumpen für Luftkühler und Lufterhitzer, Antrieb WRG-Rotor, Stellantriebe sowie MSR-Technik enthalten. Anlagentechnik für Be- und Entfeuchten sind nicht installiert. Die Umwälzpumpen geben einen zuverlässigen Wert des Elektroenergieverbrauchs wieder und können separat bilanziert werden. Die wesentlichen Verbraucher der elektrischen Energie sind Motoren für den Antrieb der Ventilatoren zum Lufttransport. Aus den Unterlagen der technischen Dokumentation können für die 6 verbauten Ventilatoren der Hauptanlagen die folgenden Spezifikationen entnommen werden.

### 5.4.6.2 Zentralgeräte

Die Zentralgeräte unterscheiden sich nur hinsichtlich der Dimensionierung voneinander. Die Bauteile und deren Anordnung sind identisch. Die Anlagen ermöglichen die Behandlungsfunktionen Heizen und Kühlen. Die Heiz- und Kühlregister sind an das zentrale Kühl- und Heizsystem angeschlossen. Jeweils ein Rotationswärmeübertrager ermöglicht die Wärmerückgewinnung. Komponenten zur Be- oder Entfeuchtung sind nicht vorgesehen. Die Motoren sind als EC-Motoren ausgeführt.

Tabelle 5-7: Kennwerte der Ventilatoren in den RLT-Anlagen (Auslegung)

Einheit		RLT1 „kleiner Hörsaal“	RLT2 „großer Hörsaal“	RLT3 „Labore“
In der Zuluft				
Nennleistung Ventilator	kW	1,9	2,93	2,91
Nennleistung Motor	kW	3,0	3,4	3,3
Energieeffizienzklasse		C	B	A+
SFP Auslegungsbedingungen nach EN 13779	kW/ s m <sup>3</sup>	2,76	2,64	1,9
		SFP4	SFP4	SFP3
SFP (ENEV) saubere Filter	kW/ s m <sup>3</sup>	1,74	1,67	1,08
		SFP4	SFP4	SFP3
In der Abluft				
Nennleistung Ventilator	kW	1,2	1,89	2,29
Nennleistung Motor	kW	3	3,4	3,4
Energieeffizienzklasse		A	A+	A
SFP Auslegungsbedingungen nach EN 13779	kW/ s m <sup>3</sup>	1,73	1,70	1,5
		SFP4	SFP4	SFP3
SFP (ENEV) saubere Filter	kW/ s m <sup>3</sup>	1,14	1,13	0,9
		SFP3	SFP3	SFP3

### 5.4.6.3 Luftverteilung und Luftdurchlässe in die Räume

#### 5.4.6.3.1 Großer Hörsaal

Die Luftzuführung in den „großen Hörsaal“ erfolgt über einen Druckboden in die Stufen unter der festen Bestuhlung. Die Zuluft wird über Stufenquellauslässe eingebracht. Die Abluft wird über eine Schattenfuge zwischen Wand und Decke abgeführt.



Abbildung 5-15: links: Abluftdurchlass vor Installation Abhangdecke, rechts Zuluftdurchlass im Druckboden



Abbildung 5-16: links: Treppen des „großen Hörsaals“ mit Aussparung für Zuluft (in Bau) rechts: feste Bestuhlung ohne Verblendung und Leitdüsen



Abbildung 5-17: Druckboden von unten mit Aussparung für die Zuluft

Als Stufen-Quellluftauslass wurden perforierte Fronten mit dahinterliegenden Luftlenkdüsen gewählt.

#### 5.4.6.3.2 kleiner Hörsaal

Im Gegensatz zum „großen Hörsaal“ ist der Raum „kleiner Hörsaal“ mit mobiler Bestuhlung und Tischen ausgestattet. Die Luftführung im „kleinen Hörsaal“ erfolgt über einen großflächigen Quellluftauslass am unteren Teil der Wand. Über der Tafel wird die Abluft abgesaugt.

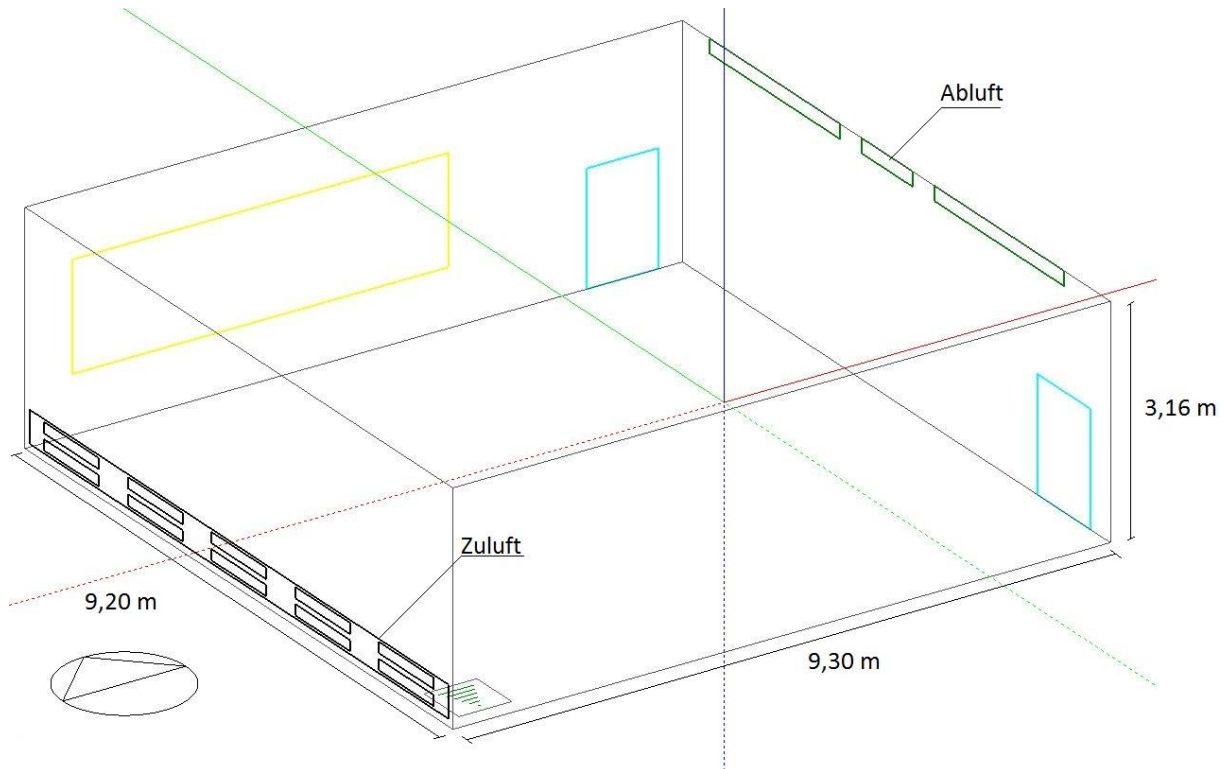


Abbildung 5-18: Isometrie Ansicht Raum „kleiner Hörsaal“ aus [45]

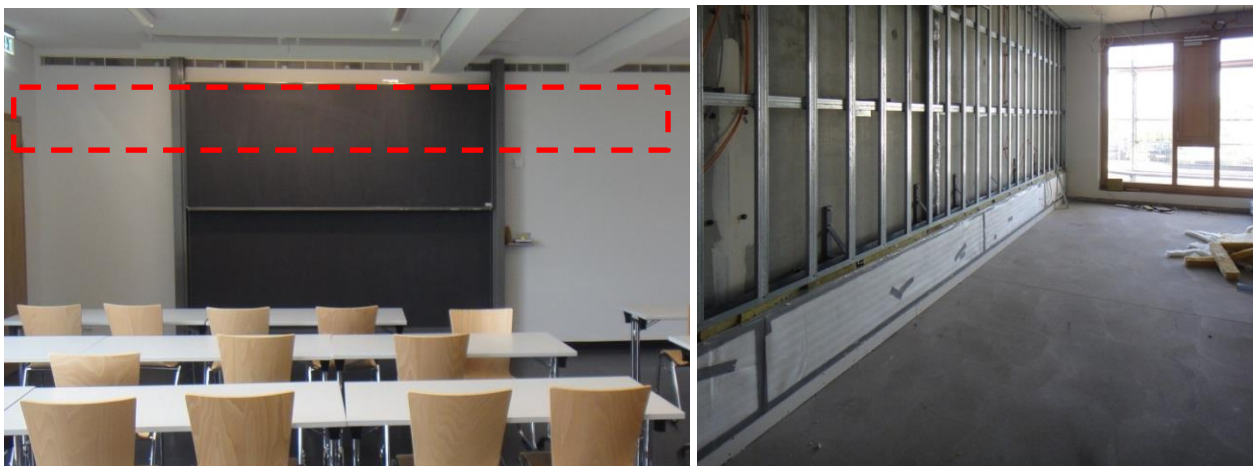


Abbildung 5-19: links:: Ansicht Abluftdurchlass „kleiner Hörsaal“; rechts: Blick auf Quellluftauslass im Raum „kleiner Hörsaal“ im Bau



#### 5.4.6.3.3 Planungslabore EG und OG

In den Räumen „Planungslabore EG“ und dem baugleichen „Planungslabore OG“ wird die Luft seitlich zur Sitzorientierung turbulent eingebracht.



Abbildung 5-20: links: Ansicht Zuluftauslass im Bau, rechts Anschlusskästen für Zuluftauslässe von unten

Die Zu- und Abluftauslässe sind örtlich nahe zueinander am Versorgungsschacht positioniert. Die Abbildung 5-21 zeigt die Durchlässe im fertigen Zustand. Die Schattenfuge für die Abluft ist kaum wahrzunehmen.



Abbildung 5-21: links: Ansicht Zuluftauslass rot markiert und Schattenfuge als Abluftdurchlass grün markiert rechts: Zuluftauslass im Bau

#### 5.4.6.3.4 Computerpool EG

Die Luftverteilung im „Computerpool“ erfolgt über ein Schlitzauslassband.

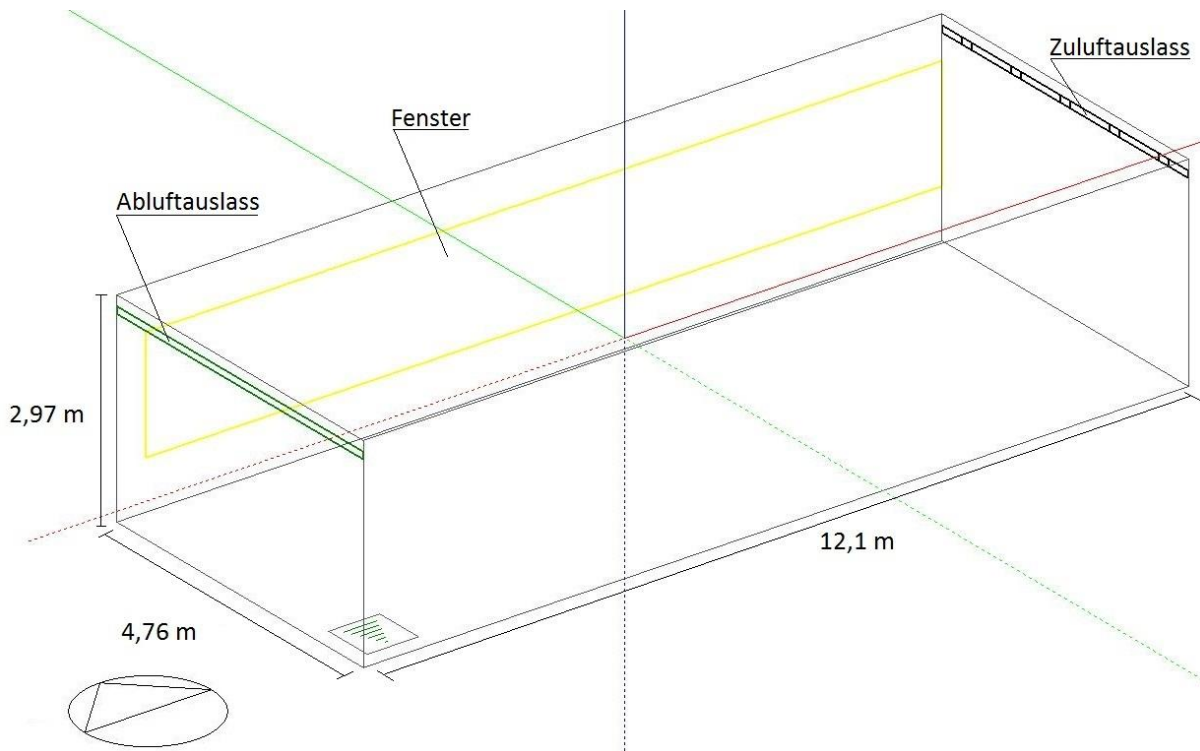


Abbildung 5-22: Isometrie Ansicht Computer Pool aus [45]

### 5.4.6.4 Ergebnisse

Untersuchungsergebnisse sind in den nachfolgend genannten Abschnitten dargestellt:

- Verbrauchswerte Abschnitt 10.7 Seite 164
- Wärmerückgewinnung RLT Abschnitt 10.9.3.4 Seite 179
- Nachtauskühlung mit RLT-Anlagen Abschnitt 10.10 Seite 182
- Strömungssimulation mit DesignBuilder Seite 125 Abschnitt 9.6

## 5.5 Reglungs- und Steuerungskonzept

### 5.5.1 Lastenheft Gebäudeautomation

Zusammen mit dem Planer Gebäudeautomation und dem Nutzer wurde für die Ausschreibung ein Lastenheft für die Umsetzung der Gebäude- und Raumautomation erstellt.

### 5.5.2 Detailplanung nach VDI 3814

#### 5.5.2.1 Vorbemerkung

Die Anforderungen an die Funktionen der Gebäudetechnik wurden im Vorfeld mit dem zukünftigen Betreiber, dem TGA- bzw. dem MSR-Planer abgestimmt und textlich in einem Lastenheft dokumentiert. Diese textlich formulierten Anforderungen an die regelungstechnischen Funktionen führen oft zu nicht eindeutig beschriebenen Funktionen.

Daher wurde nach der Vergabe der Leistung Gebäudeautomation, in fachlicher Abstimmung mit dem MSR-Planer und dem Nutzer, für die gebäudetechnischen Anlagen und die Raumautomation



eine Detailplanung entsprechend der VDI 3814 Blatt 6 [46] angefertigt. Die Detailplanung wurde dem ausführenden Unternehmen der GA zur Unterstützung übergeben.

Diese Beschreibungen konkretisieren das Lastenheft und dienen gleichzeitig der Dokumentation. Für die Beschreibung der technischen Lösung war es notwendig, das Gesamtsystem in mehrere Subsysteme aufzuteilen. Diese Aufteilung erfolgte nach dem Grad der technischen sowie logischen Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Komponenten und Anforderungen zueinander.

### **5.5.2.2 Umschaltung Heiz- und Kühlbetrieb**

Es ist nicht möglich im Gebäude gleichzeitig aktiv zu kühlen und zu heizen. Durch einen zentralen Umschaltbefehl wird zwischen Heiz-, Kühl- und Übergangsbetrieb unterschieden. Die Umschaltung hat zum Ziel, die gebäudetechnischen Anlagen entsprechend den jahreszeitlichen Witterungsbedingungen möglichst effizient mit hohem Komfort für den Nutzer zu betreiben. Die Zustände (Heiz-, Kühl-, und Übergangsbetrieb) wurden als Betriebsart definiert. Die Betriebsart wird in der nachgeschalteten Regelungslogik weiterverarbeitet. Die Umschaltung zwischen den Betriebsarten soll mittel- und kurzfristige Witterungsbedingungen sowie Nutzungszeiten berücksichtigen. Als physikalische Eingangsgröße werden die Außenlufttemperatur sowie verschiedene Zeitglieder für die Umschaltung aufgenommen. Im automatisierten Betrieb ist ein direkter Übergang von Heizbetrieb in Kühlbetrieb nicht vorgesehen. Mittels manueller Betriebsartumschaltung kann aber durch den Betreiber zwischen Heiz- oder Kühlbetrieb gewählt werden. Durch eine Rückschaltverzögerung soll ein kurzzeitiger Wechsel zwischen den Betriebszuständen vermieden werden. Die Betriebsart wirkt auf die nachgeordneten Funktionen der verschiedenen Räume (Hörsäle, Planungslabore, Büroräume) sowie der zentralen Anlagen (RLT-Anlagen, Wärmepumpen, Umweltquellen). Die Umschaltung hat zur Folge, dass sich Sollwerte, Steuer- sowie Regelungsaufgaben grundlegend ändern.

### **5.5.2.3 Hörsäle**

Die zwei Hörsäle werden über separate mechanische Lüftungsanlagen mit Außenluft versorgt. Aufgrund identischer Nutzungsart und Anlagentechnik findet das gleiche Regelungskonzept Anwendung. Die Regelungskonzepte der Hörsäle sind voneinander unabhängig. Die Lüftungsanlagen sollen nicht der Temperierung der Räume dienen. Die Kühl- und Heizlasten sollen primär über die thermoaktiven Deckenflächen abgedeckt werden. Die Zuluft wird entsprechend der Behaglichkeitsanforderung erwärmt bzw. gekühlt und richtet sich grundsätzlich nach der Raumsolltemperatur. Nur bei extremen Heiz- und Kühllasten und Raumnutzung sollen die statischen Heiz- und Kühlflächen durch die Lüftungsanlage ergänzt werden. Die Lüftungsanlagen sind zur Energieeinsparung mit WRG Systemen ausgerüstet. Die Konditionierung wird mit Heiz- und Kühlregistern realisiert, mit denen nicht gleichzeitig gekühlt und geheizt werden kann. Eine Mischkammer bzw. ein Umluftbetrieb ist nicht vorgesehen.

Die Abbildung 5-23 zeigt das Regelschema der Luftqualitätsregelung. Ziel ist es zu gewährleisten, dass die Raumlufkonzentration den festgelegten Grenzwert nicht überschreitet. Diese Vorgaben sollen mit möglichst geringem Energieaufwand erfüllt werden. Dazu ist es zweckmäßig die Zuluftmenge (entspricht der Außenluftmenge) in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub>-Raumlufkonzentration linear zwischen einem Einschaltpunkt (onset point) einem Maximalwert und einem Ausschaltpunkt (offset point) vorzugeben.

## 5 Systembeschreibung TGA

Raumluftqualität (CO<sub>2</sub>-Konzentration)

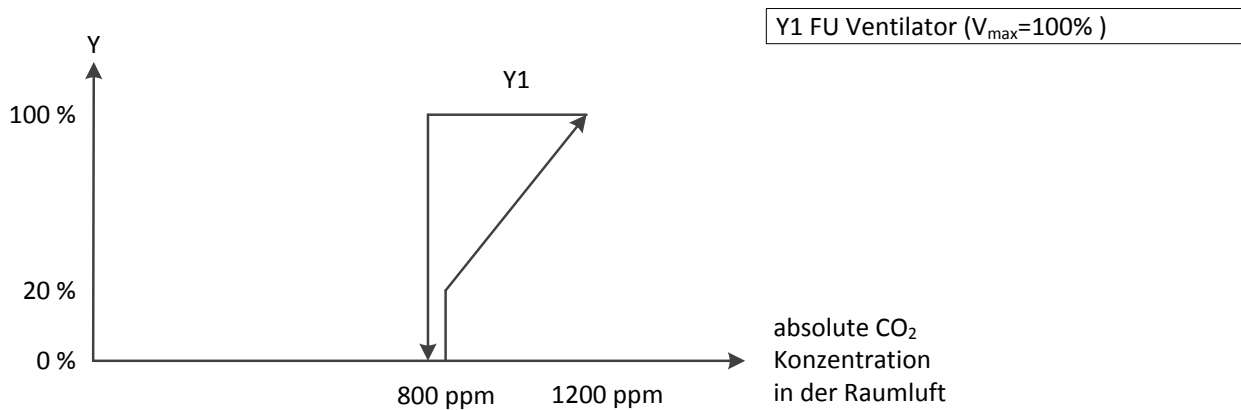


Abbildung 5-23: Regelschema der Luftqualitätsregelung mittels Erhöhung des Außenluftvolumenstromes über Drehzahlerhöhung Ventilator.

Heizen

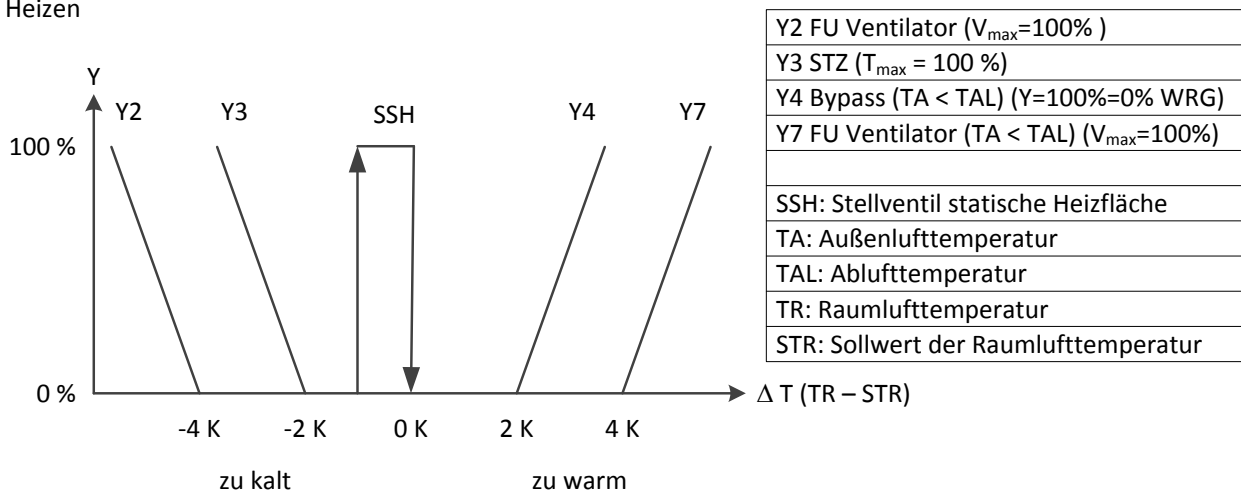


Abbildung 5-24: Schematische Darstellung der Kennlinien zur Raumlufttemperaturregelung für den Heizfall.

Kühlen

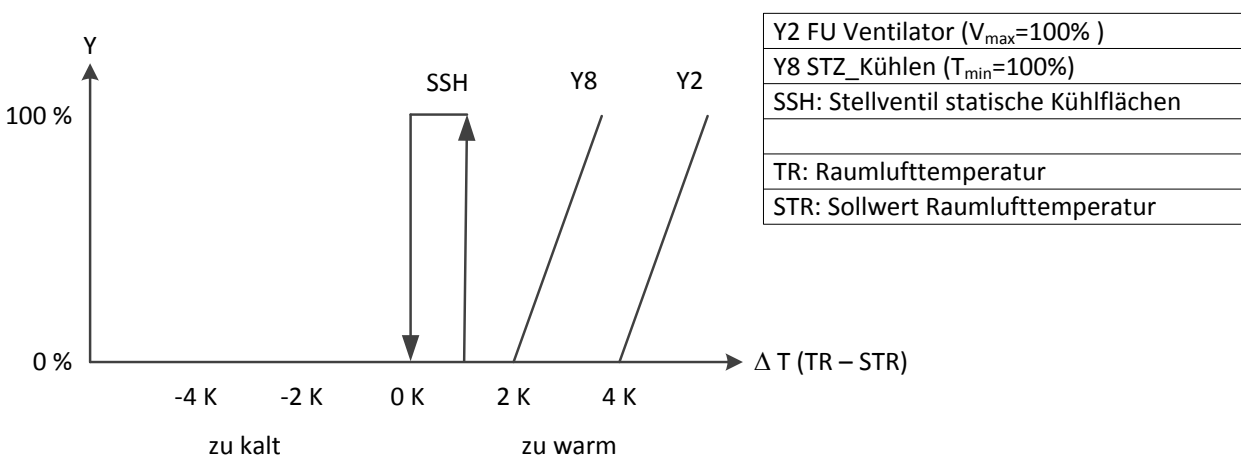


Abbildung 5-25: Schematische Darstellung der Kennlinien zur Raumlufttemperaturregelung für den Kühlfall

Die Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25 geben schematisch die Temperaturregelung für den Heiz- und Kühlfall wieder. Zu beachten ist dabei, dass die Bezeichnungen Kühl- und Heizfall sich hier

nicht auf die tatsächlich vorliegende Raumanforderung bezieht, sondern auf den aktuellen Betriebszustand entweder Heizen- oder Kühlbetrieb (siehe Abschnitt 5.5.2.1 Seite 74).

### 5.5.3 Umsetzung mit Honeywell CARE

In der Leistungsbeschreibung wurde Honeywell als Leitfabrikat für die Gebäudeautomation (GA) gewählt. Gleichwertige DDC-Anlagen konnten ebenso angeboten werden. Das Fabrikat Honeywell kam zur Ausführung. Die Gebäude- und Raumautomation ist in drei Informationsschwerpunkte ISP aufgeteilt. Ein ISP besteht aus einem frei programmierbaren Controller (DDC-Station) mit zugeordneten Ein- und Ausgängen, sowie einer Vorort-Visualisierung mit Möglichkeit des Handeingriffs. Die Controller sind BacNet zertifiziert mit LON-Feldbusanbindung.

Die Programme bzw. das MSR-Anwendungsprogramm für den Controller werden mit dem Design-Tool Honeywell Excel CARE<sup>®</sup> an einem PC erstellt und in den Controller geladen. Im Excel CARE sind bestimmte Anlagenregelungen vorkonfiguriert. Komplexe Aufgaben können durch freie Programmierung gelöst werden. Die Programmierung ist dabei größtenteils graphisch möglich. Hiermit ist eine intuitive Programmierung möglich. Der AN konnte auf den gemachten Vorgaben nach VDI 3814 Teil 6 (siehe Abschnitt 5.5.2 Seite 74) aufbauen. Der exemplarische Auszug in Abbildung 5-26 verdeutlicht den Ansatz. Die Rechtecke symbolisieren eine Funktion, z.B. ODER. „Von links“ werden Eingangssignale oder Zustände mit den Funktionsbausteinen verknüpft. „Nach rechts“ werden Zwischen- oder Ausgangsgrößen weitergegeben.

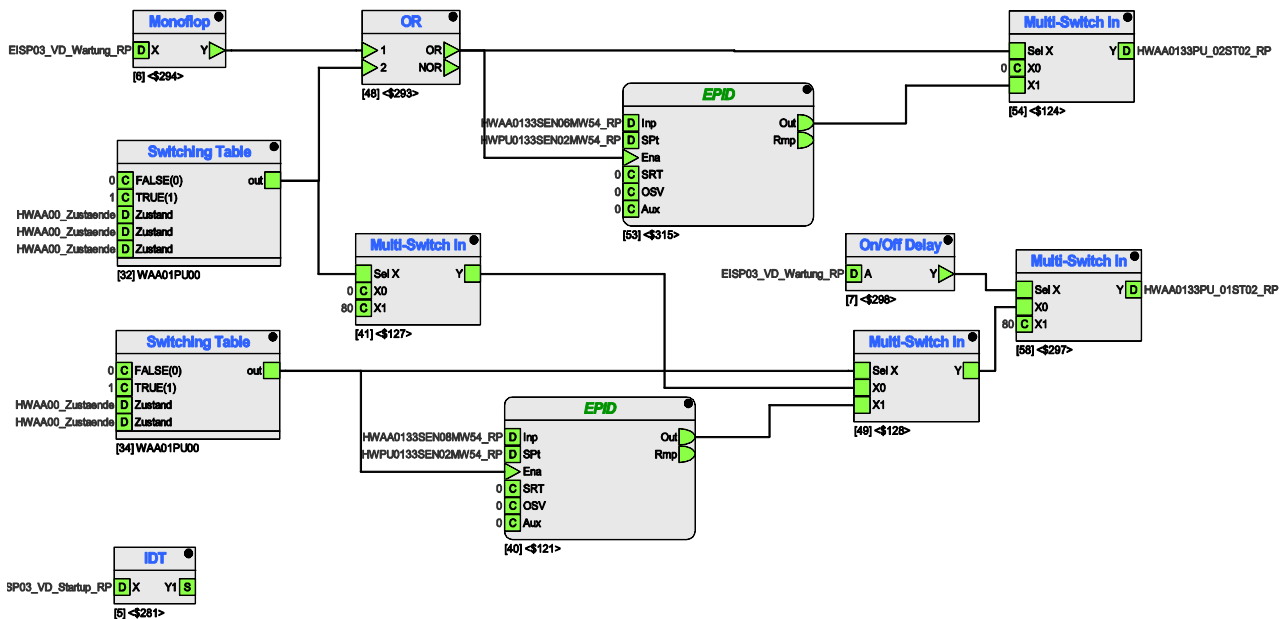


Abbildung 5-26: Darstellung der graphischen Programmier- und Verknüpfungsebene EXCEL CARE

Der exemplarisch gezeigte Auszug in der Abbildung ist vergleichsweise übersichtlich. Die Umgesetzten Anlagen erfordern weitaus komplexere Zusammenhänge, die oft auch graphisch nur noch schwer nachvollzogen werden können. Als nachteilig zu bewerten ist die fehlende Möglichkeit die geschriebenen Programme nicht virtuell simulieren bzw. emulieren zu können. So konnte die umfangreiche Programmierung erst im realen Gebäudebetrieb getestet werden. Durch die umfangreichen Anforderungen an die GA, wird die Programmierung zu einer hoch anspruchsvollen Aufgabe, bei der schon kleine Fehler zu größeren Störungen im Anlagenbetrieb führen können

### 5.5.4 Fensteröffnungskontakt

In der Gebäudeautomation ist hinterlegt, dass bei einem geöffnetem Fenster im Raumes die Funktionen mechanisches Lüften und konditionieren über TABS vollständig und die Funktionen Heizen über TABS auf ein Mindestmaß für Frostschutz begrenzt ist. In Räumen ohne Lüftungsanlage sind nur Kühl- und Heizfunktion betroffen. Diese Funktion dient der Energieeinsparung. Außerdem können die Signale für die Verschlussicherheit genutzt werden. Die Funktion ist durch Fensterkontaktschalter realisiert. In Räumen ohne Versorgung mittels RLT-Anlage wurden im Zusammenhang mit dieser Funktion keine Nutzerbeschwerden bekannt.

In den Unterrichtsräumen kam es im Zusammenhang mit dieser Funktion zu sehr deutlichen Beschwerden. Die Beschwerden waren nicht direkt an diese Funktion adressiert, aber teilweise durch diese bedingt.

Im allgemeinen Gebäudebetrieb konnte die folgenden Beobachtungen gemacht werden:

Zumeist in der Übergangszeit, wenn also keine Freigabe der Kühlung vorlag, und keine Nutzung des Raumes vorgesehen war, jedoch tatsächlich genutzt wurde, war der Raum nicht den Nutzererwartungen entsprechend konditioniert. Dies betraf die Luftqualität und thermische Behaglichkeit. Einige Räume (Planungslabor EG) waren oftmals überhitzt. Die Raumnutzer versucht durch öffnen der Fenster behagliches Raumklima herzustellen bzw. die wahrgenommen Luftbelastung abzuführen.

Die Fensteröffnung ist, auch aufgrund der vergleichsweise geringen Öffnungsfläche nicht wirksam. Das Öffnen der Fenster durch den Nutzer führte zum Stillstand der Lüftungsanlage und der Temperierung. Hierdurch verstärkte sich im Tagesverlauf der negative Verlauf. Um die Raumnutzer über die Funktionsweise aufzuklären, wurde an den Fensterflügeln folgende Information angebracht.

Achtung !

Mit Öffnen der Fenster wird die Klimaautomatik des Raumes unterbrochen.

Bitte nur für Stoßlüftung die Fenster öffnen, sonst geschlossen halten.



Abbildung 5-27: Information zur Funktionsweise Fensterkontakt und RLT-Anlage

Die Information, das Fenster möglichst nicht zu öffnen, ist für den Raumnutzer jedoch nur dann sinnvoll, wenn die Kühlung und die RLT-Anlage in Betrieb sind. War die Raumnutzung nicht geplant und dadurch vom Betriebsdienst nicht in den Anlagenkalender eingetragen, war die Lüftungsanlage deaktiviert. Dies war oftmals den konkreten Raumnutzern nicht bekannt, was das Vertrauen in Funktionsweise die „Klimatisierung“ der Räume nachhaltig beeinträchtigte.

Durch die komplexen Zusammenhänge der Anlage kann die Wirkung durch den Raumnutzer nicht nachvollzogen werden es kommt zum Eindruck: „geht nur manchmal“. Dies führt teilweise dazu, dass schon vorsorglich mittels Fensterlüftung der Raum „gekühlt“ wurde.

Empfehlung:

Der Raumnutzer sollte über ein dynamisches Display im Raum über den Anlagenzustand über Statusmeldungen informiert werden.

- a. Heizung/Kühlung aktiv, Fenster geschlossen halten
- b. Fenster ist geöffnet Heizung/Kühlung gesperrt
- c. Lüftungsanlage nicht freigegeben

Im fehlerbehafteten Betrieb konnte die folgende Beobachtung gemacht werden: Im Raum „großer Hörsaal“ war von Anfang an der Fensterkontakt defekt und meldete an die GA „Fenster auf“. Damit war die RLT-Anlage mit Kühl- und Heizfunktion der TABS deaktiviert. Dies führt von Beginn der Nutzung an zu ersten negativen Erfahrungen der Nutzer mit dem Gebäude.

### **5.5.5 Erfahrungen Gebäudeautomation**

- I. Im Jahresverlauf wird der Anlagentechnik drei zentrale Betriebszuständen ein: a) Heizen, b) Kühlen, c) neutral vorgegeben. Dem Gebäudenutzer sollte signalisiert werden, in welchen Modus das Gebäude aktuell betrieben wird, um sich darauf einzustellen zu können.
- II. Für die Funktionsprüfung der TGA Anlagen anhand der GA-Visualisierung, sind umfangreiche fernwirksame Steuereingriffe vorgesehen werden. Zum Beispiel: Pumpe an mit 60 % , Ventil in Stellung A-A. Auch sollten Eingangsparameter (Außentemperatur) simuliert werden können.
- III. In der Planung wurden Betriebszustände VDI 3814 Teil 6 zur Gestaltung der MSR-Technik dem AN-GA vorgegeben. Die Anzeige des aktuellen Betriebszustandes im jeweiligen Anlagenteil hat sich als sehr hilfreich zur Einschätzung des Betriebs erwiesen.
- IV. Historische Verlaufplots können zusammen mit spezifischen Systemwissen eine gute Einschätzung des Anlagenverhaltens liefern. Jedoch sind die Erkenntnisse begrenzt. Verbesserte Darstellungsmöglichkeiten wie beispielsweise der Carpet-plot, können mit gleicher Datenbasis eine bessere Einschätzung des Anlagenbetriebes geben.
- V. In der genutzten Visualisierung auf der Managementebene, benötigt die Darstellung eines oder mehrere Datenpunkte ein Jahresverlauf, mehr als 15 min.
- VI. Der AG sollte zur Überwachung der Arbeiten GA in der Inbetriebnahme-Phase, das von AN-GA genutzte Design-Tool nutzen können.

## 6 Datenmanagement, Visualisierung

### 6.1 Problem- und Zielstellung

In der Managementebene von Gebäudeautomationssystemen (GAS) werden Betriebsdaten der technischen Anlagen erfasst, die jedoch nur selten oder nur in begrenzter Form zur Betriebsüberwachung genutzt werden können. Oftmals werden lediglich Warn- oder Störungsmeldung erfasst bzw. sicherheitsrelevante Zustände überwacht.

Nachträglich in ein bestehendes GAS implementierte Funktionen sind oft kostenintensiv, da die Betriebsführung (Facilitymanagement) diese Arbeiten aufgrund fehlender Softwarelizenzen oder fehlender Kenntnis im Umgang mit der speziellen Software nicht eigenständig durchführen kann und auf externe Dienstleistung angewiesen ist. Aufgrund des gebäude- bzw. projektspezifischen Alleinstellungsmerkmals des Erstellers des GAS (Kenntnis, Lizenzen und Gewährleistung) muss in der Regel auch dieser Ersteller mit der Programmierung beauftragt werden.

Ziele des nachfolgenden Abschnittes ist es, am Beispiel des Hörsaal- und Laborgebäudes, Methode zu demonstrieren die es ermöglichen Daten aus der Gebäudeautomation für eine Überwachung und Analyse des Gebäudebetriebes sinnvoll mit erweiterten Funktionen nutzbar zu machen. Die dafür genutzte Software R-Project und PostgreSQL ist freiverfügbar und in Wissenschaft und Wirtschaft etabliert. Es werden speziell für die Analyse von Daten aus dem Gebäude nützliche Funktionen mit Code dargestellt. Diese Funktionen können genutzt oder erweitert werden.

Die Anwendung der gezeigten Methode erfordert Grundkenntnisse im Programmieren. In größeren Organisationen mit einer IT-Abteilung/Rechenzentrum sind diese in der Regel vorhanden. Diese Methode ist unabhängig von der Art der Gebäudeautomation und dem bestehenden GAS. Voraussetzung ist, dass auf diese Daten aus dem GAS zugegriffen werden kann.

Durch die Nutzung bekannter Opensource Technologien (R-Project, PostgreSQL) ist es denkbar, in Organisationen mit versiertem IT-Personal (Hochschulrechenzentrum, IT-Beauftragter, Datenbankadministrator) und bei gegebenen IT-Ressourcen die gezeigte Methodik mit geringen Kosten, in einem interdisziplinären Projekt umzusetzen. Die Umsetzung durch interne „Mitarbeiter“ ist außerdem angezeigt, da diese die Gebäude- und Anlagenstruktur kennen und die Schwerpunkte setzen können. Anpassungen oder Änderungen können ohne Dritte vorgenommen werden was hohe Kosten- und Zeitautonomie verspricht. Die Einarbeitung in eine bestehende Anlagenkonfiguration durch Dritte wäre mit sehr hohem Aufwand verbunden.

Motivation:

- Automation,
- Datenaufbereitung (Fehlende Daten, Zählerzurücksetzen, virtuelle Zähler)
- Anwendung durch
- Analyse (Sollwert vs. Ist-Wert und die Abweichung dazu)
- Bisherige Lösungen nicht leistungsfähig
  - Nur Zeitverlaufsplots
  - Nur starre Auswertemaske
  - Viele bessere Funktionen möglich
    - Carpetplot
    - Scatterplot
    - Benchmarks mit Modell

Feldgeräte (Sensoren, Aktoren):

Die Umweltzustände werden durch Sensoren auf der Ebene der Feldgeräte (der Anlage oder im Raum) aufgenommen. Dabei dienen diese Feldgeräte primär der Erfassung von Signalen für die Gebäudeautomation Regelungstechnik (Leistungsregelung in Abhängigkeit einer Temperatur). Im Gebäude wurden vor allem Zählleinrichtungen für das zusätzlich für das Monitoring installiert.

Raumlufttemperatur, Temperatur in hydraulischen Kreis, Sollwertkorrektur....

Aus den Informationen werden Stellsignale für die Aktoren erzeugt die dann das System beeinflussen.

Reglern Controller

Diese Informationsverarbeitung findet dabei in Reglern statt. Diese Regler bestehn in Komplexen Gebäude teilweise aus über microcontrolle oder „PC“ verarbeitet.

Im Projekt wird eine Vielzahl von Informationen zu Sensorwerten, Zuständen aus der Controller-ebene an die Management Ebene weitergegeben und dort gespeichert. Dafür wird das kommerzielle Produkt von INGA IBS verwendet.

Die Daten werden in Echtzeit visualisiert und können über eine Anzeige können historischen Daten im Zeitverlaufdiagramm betrachtet werden. Mit Expertenwissen und Systemkenntnis kann die Funktion bewertet werden. Die Bewertung von Zeitverlaufdiagrammen ist eine häufig durch Anlagenbetreiber angewandte Methode. Für viele Einsatzfälle ist die Nutzung eines Zeitverlaufdiagramms ungeeignet. Beispielsweise zeigen Funktionale zusammenhänge verschiedener Informationen. Hiermit kann auch nach funktionalen Zusammenhängen exploriert werden.

Auch die Visualisierung von Betriebsmustern durch sogenannten Carpetplots hat sich in den letzten Jahren als bewährte Methode durchgesetzt. Berechnungen sind im Produkt möglich, erfordern jedoch die Programmierung durch den Ersteller der Visualisierung und ist organisatorische nicht mit dem Monitoring verbunden.

Aus diesen Anforderungen heraus ist es notwendig einen von der GLT unabhängige Arbeitsumgebung für die Datenhaltung, Visualisierung und Bewertung vorzusehen. Die Einrichtung einer solchen Arbeitsumgebung ist dem Themengebiet der Informationsverarbeitung zuzuordnen. Aus der GLT werden die Daten eines Tages täglich in einer Accessdatei auf einem Webserver abgelegt. Dieser Webserver ist mit GLT-Netz der Hochschule verbunden. Dieser WEB-Server ist mit dem Internet verbunden. Die Daten stehen daher auch außerhalb des GLT und Hochschulnetzes zur Verfügung.

Die Rohdaten eines Tages werden als Datei abgelegt und sind als Liste strukturiert. Die Daten werden/manuell (automatisiert ist jedoch auch möglich) mittels R-Project auf einen Arbeitsrechner heruntergeladen. Die Daten werden dann als Accessdatei mittels R-Project geladen und über eine Schnittstelle in die PostgreSQL Datenbank geschrieben. Die Tagesdaten werden an die vorausgegangenen Daten angehängt es entsteht so eine Liste.

Eine Datei mit den Definitionen der Datenpunkte kann über SQL Abfragen einzelnen Datenpunkte über einen beliebigen Zeitraum abgerufen werden. Diese Informationen sind Bestandteil der Datenbank. Der Zugriff auf die Datenbank nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch (Zugriffszeit) diese Zugriffszeit ist jedoch wesentlich kürzer als die Zugriffszeit auf die Daten im GLT-historische Ansicht.

Hinsichtlich der Organisation der Datenverarbeitung kann zwischen dem konventionellen und dem besonderen (für das Monitoring) unterschieden werden.

### Status quo der Anlagenüberwachung (Normalfall)

Wie viele Betreiber nutzt auch die Liegenschaftsverwaltung der FH Erfurt für die Anlagenüberwachung eine schematische Visualisierung der Anlagen mit Anzeige von Messwerten bzw. Zuständen in Echtzeit. Mit Expertenwissen lässt sich der Anlagenzustand einschätzen (z.B. Heizen an oder aus). Außerdem können an definierten Objekten Eingangsparameter für die Regelung, wie beispielsweise kalenderabhängige Sollwerte oder manuelle Umschaltung von Betriebszuständen vorgegeben werden. Die Einrichtung einer solchen Visualisierung erfolgt durch ein Fachunternehmen. Änderungen können durch den Betreiber im Regelfall nicht vorgenommen werden. Für die Betriebsüberwachung ist daneben die visuelle Bewertung der historischen Zeitreihen mehrerer Messwerte bzw. Zustände von Bedeutung. Mit Systemkenntnis und Expertenwissen kann aus dem Verlauf der Messwerte in der Zeit und zueinander der Anlagenzustand eingeschätzt bzw. Fehler identifiziert werden. Diese Charts können intuitiv über die Visualisierung aufgerufen werden. Bis zu acht Zeitreihen sind im genutzten Fabrikat graphisch darstellbar. Über eine Exportfunktion können jeweils acht Zeitreihen im ASCII-Format als csv-Datei exportiert werden. Andere Darstellungsmöglichkeiten oder mathematische Operationen sind für den Bediener nicht möglich. In der konkreten Situation der Liegenschaftsverwaltung der FH-Erfurt, ist die Abfrage von größeren Datenmengen mit sehr langen Bereitstellungszeiten verbunden. So benötigt der Aufruf der Historie eines Jahres für einen Datenpunkt eines Elektroenergiezählers im 5 Minuten Raster für ein Jahr 22 Minuten.

Aus den genannten Gründen ist die Nutzung der Visualisierung des Managementsystems für das Monitoring und für die Inbetriebnahme und Optimierung nur bedingt geeignet.

### Kosten

Die Messtechnik für das Monitoring wurde mit der Gebäudeautomation ausgeschrieben und umgesetzt. Die Kosten für Gebäudeautomation betrugen insgesamt 200 T€, wovon 50 T€ zusätzliche Messtechnik ausmacht. Im Rahmen des Gebäudebetriebes und des Monitorings werden rund 2.500 Datenpunkte erfasst und weitergegeben.

Im einfachen Ansatz wurden so 80 €/ pro Datenpunkt für liefern und montieren ohne Planung verausgabt. Nicht alle Datenpunkte sind für das Monitoring von Interesse. Jedoch der überwiegende Teil.

## 6.2 Umwälzpumpen

Die 15 eingesetzten Umwälzpumpen im hydraulischen System, sowie zwei Frequenzumrichter für die Drehzahlregelung der Brunnenpumpen geben den kumulierten Elektroenergieverbrauch an das GLT/GAS weiter. Im Rahmen des energetischen Monitorings wurden 6 Umwälzpumpen mittels Elektronenergiezähler direkt separat erfasst. Aus dem Vergleich zwischen den Daten Elektroenergiezähler (EZ) mit den Elektroenergieverbrauch Umwälzpumpen (UWP) kann festgestellt werden, ob die Information aus den Umwälzpumpen zuverlässig und genau genug ist, um für Monitoring genutzt zu können. Die Tabelle 6-1 zeigt exemplarisch den monatlichen Verbrauch im Jahr 2014, berechnet aus den Zählerständen des EZ und der UWP. Der Verbrauchswert aus dem EZ liegt 16 kWh über dem der UWP die Abweichung beträgt im Jahr 4 % (bezogen auf den Wert des EZ). Die Abweichung zwischen Energiezähler und Ausgabewert der Pumpe sind mit 1 kWh pro Monat als gering einzuschätzen. Die Gründe könnten auf numerische Problem/Ursachen zurückzuführen sein. Abschließend kann konstatiert werden, dass die Ausgabewerte der Pumpen in der Regel



sehr gut für ein energetisches Monitoring bzw. zur Betriebsüberwachung geeignet sind. Im Rahmen des Monitorings Fehler in der Datenübertragung festgestellt (siehe .

Tabelle 6-1: Gegenüberstellung monatlicher Verbrauchswerte der elektrischen Energie einer Umwälzpumpe zu Messwert des Wirkenergiezählers aus dem Jahr 2014

	Einheit	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Wirkenergiezähler	kWh	94	66	46	4	9	3	3	3	3	23	58	51
Ausgabewert Umwälzpumpe	kWh	92	65	44	2	7	2	1	2	2	23	57	51
Differenz absolut kwh	kWh	2	1	2	2	2	1	2	1	1	0	1	0
prozentuale Abweichung	%	2	2	4	45	21	37	70	36	32	2	2	1

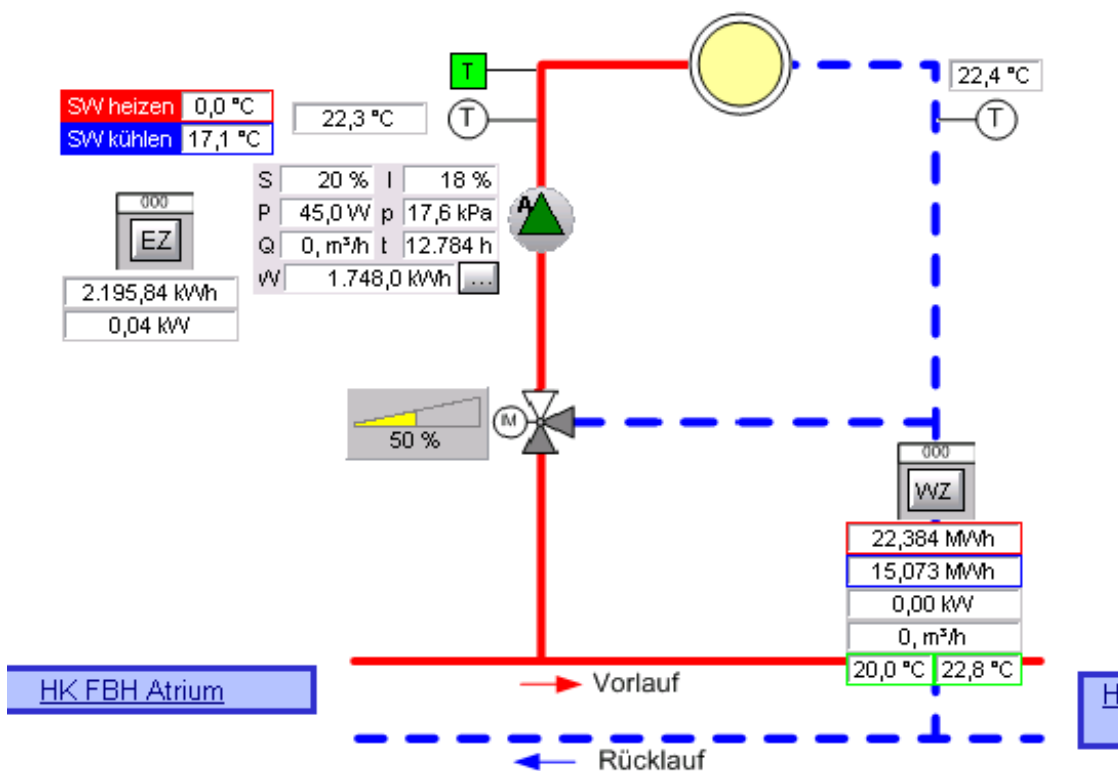


Abbildung 6-1: Screen-Shot aus der Visualisierung des Gebäudemanagment

## 6.3 Messdaten-Integration

### 6.3.1 Vorbemerkung

Das durchgeführte Monitoring basiert auf den Messdaten des GLT-Systems des Gebäudes. Der gesamte Prozess der Datenaufbereitung und Analyse wurde mit Opensource Software umgesetzt.

Die dafür genutzte Software wird nachfolgend eingegangen und eine Übersicht zu Quellen im Zusammenhang mit den Themen dieses Projektes gegeben.

### 6.3.2 R-Project

Die freie Programmiersprache R dient der statistischer Berechnung Analyse und Darstellung und bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Datenanalyse. In den letzten Jahren war auch im wissenschaftlichen Bereich

Im Zusammenhang mit der Analyse von Daten aus dem Bereich der Anlagen- und Gebäudetechnik sind einige Quellen bekannt die kurz aufgeführt werden. Teilweise werden in den Arbeiten auch beispielhaft Codes zur Anwendung im Zusammenhang mit den dort beschriebenen Problemen wiedergegeben.

	Projekt	Quelle
Characterization and optimized control by means of multiparameter controllers	Monitoring Date-nalyse	[47]
Model-Based Approach for Performance Monitoring of Commercial Buildings	Grundlagen	[48]
Gebäudebetrieboptimierung. Verbesserung von Optimierungsmethoden und Optimierung unter unsicheren Randbedingungen.		[49]
Burhenne Sebastian		
David Feige	MC-Simulation	
Prognose des Energieverbrauchs von Haushalten unter Einsatz maschineller Lernmethoden		

Unabhängig von Komplex „Gebäude“ und energetisches Montoring ist R ein weit verbreitet Tool für welches eine kaum zählbare Anzahl an Einführungen im Internet zur Verfügung stehen. Als eine hervorragende Einführung und gutes Nachschlagewerk kann in deutscher Sprache kann die Arbeit von Plank [50] genannt werden. Unter den gedruckten Werken zu Einführung ist [R in a Nutshell] zu nennen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden zur Verdeutlichung auswählte Problemstellungen R-Skripte dargestellt. Datenpunkte und Notation sind wie folgt

Tabelle 6-2: beispielhafte Notation in R

#	Kommentarfunktion
IP63030120	Datenpunkte sind in R-Projekt als Objekt mit Adressschlüssel der GLT/GAS und IP definiert. Ein Datenpunkt ist ein Objekt der Klasse data.frame mit zwei Spalten. Zeitstempel und Messwert (timestamp und value)

<-	weist ein neues Objekt zu, von links nach rechts
IP63030120[,1]	Mittels eckige klammern Klammern wird auf eine Spalte oder ein Objekt zugegriffen.

### 6.3.3 Wget

Die Software Wget ist ein unter GNU-Lizenz veröffentlichtes Tool (FTP-Client) zum Download von Daten von u.a. FTP-Servern. Über eine Batch-Datei kann der Download vereinfacht bzw. automatisch erfolgen. Das Programm kann auch über R-Project angesprochen werden. Somit kann die Steuerung ausschließlich über R-Project erfolgen. Für die Nutzung des Programms muss dieses installiert werden.

Nachfolgend ist der Programmcode wiedergeben um den gesamten Inhalt auf dem Server „ftp://BEZEICHNUNG\_FTP\_SERVER“ im Verzeichnis DATENORT mit dem SPEICHERORT abzugleichen. Mit dem gegebenen Beispiel werden nur Daten heruntergeladen, die im SPEICHERORT noch nicht vorhanden sind. Durch kopieren des Programmcodes in eine Txt-Datei und umbenennen der Datei in \*.bat (Batch-Datei) wird eine Ausführungsbereite Datei erzeugt.

```
cd C:\Users\SPEICHERORT

wget -m --ftp-user=BENUTZERNAME --ftp-password=PASSWORT
"ftp://BEZEICHNUNG_FTP_SERVER/DATENORT/*"
pause
```

Es gilt der Anspruch die leicht adaptierbare Methoden anzulegen und darzustellen.  
Die Messdatenintegration besteht aus den nachfolgenden Stufen.

- i. Export der Monitoring-Daten aus der GLT auf Webserver
- ii. Datenhaltung mit PostgreSQL
- iii. Abfrage Auswertung der Daten mit R-Project

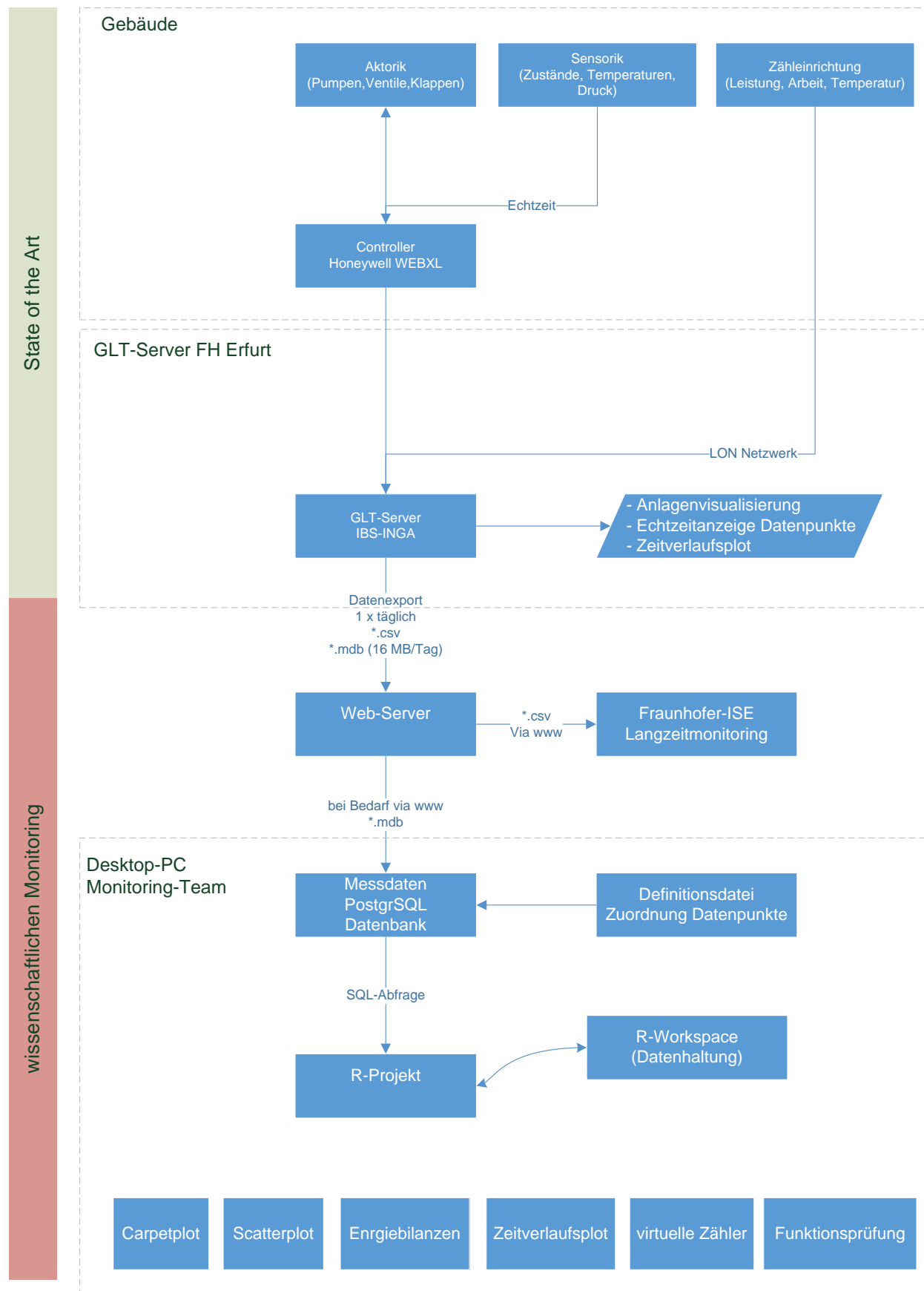


Abbildung 6-2: Struktur der Datenintegration und Funktionen zur Überwachung und Analyse des Gebäudebetriebs

### 6.3.4 Export der Monitoring-Daten aus der GLT auf Webserver

Vom GLT-Rechner wurde täglich ein MS-Access Datenbankfragment auf einen Webserver zur Verfügung gestellt. Dies wurde als Routine mittels Batchprozess angelegt. Die Umsetzung des Exports auf den Webserver wurde im Rahmen der Leistung GA des Bauprojektes aus den Mitteln des Forschungsvorhabens beauftragt.

Die MS-Access Datei wurde aus der Gebäudeleittechnik IBS Version 8.08 des Herstellers INGA täglich auf dem GLT-Rechner abgelegt. Hierfür war zusätzlich die Beschaffung des Softwaremodul IBS-XLpro notwendig. Neben der MS-Access Datei wurde parallel zu diesem eine \*.csv Datei mit weniger Informationen für das externe Langzeitmonitoring umgesetzt. Die graphische Auswertungen des Langzeitmonitorings können unter <http://enob.ise.fraunhofer.de> [51] abgerufen werden. Die Datenübertragung vom GLT-Rechner auf den Webserver erfolgte mittels SSH Verschlüsselung. Der Webserver ist Teil der IT-Infrastruktur der Hochschule und wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes mit genutzt. Er ist via Internet zu erreichen. Der Zugang zum Server ist mittels Passwort geschützt. Die Datenbankfragmente sind nicht verschlüsselt und lassen sich ohne weiteres öffnen und auslesen. In den MS-Access Daten gibt es nur eine numerische Kennzeichnung über einen IP-Index, der es ermöglicht die Daten den tatsächlichen Prozessen zuzuordnen. Die Information welcher IP\_Index welchen Prozess bzw. Messstelle kennzeichnet, ist in einer sogenannten Definitionsdatei gespeichert. Dies bedeutet, dass es mit den Rohdaten alleine nicht möglich ist, Daten einem konkreten Datenpunkt (z.B. Temperatur in einem bestimmten Raum) zuzuordnen. Hiermit wird organisatorisch der Datenschutz verbessert.

Grundsätzlich lässt sich dieser Webserver gegen einen anderen Speicherplatz für die Daten aus der GLT ersetzen. Auf dem Server werden keine Rechen-, bzw. Chronoperationen durchgeführt. Für die kontinuierliche Betriebsüberwachung ist denkbar und empfehlenswert, wichtige Routinen auf einem Server zu implementieren.

Der Export aus dem IT-Netz der Gebäudetechnik auf einen Webserver war aus zwei Gründen angezeigt.

- Zur Bereitstellung von Daten für Dritte (Langzeitmonitoring FHG ISE)
- Sicherungsanforderung der Liegenschaftsverwaltung an das IT-Netz
- problemlose Bereitstellung der Messdaten für das Monitoring

### 6.3.5 Zuverlässigkeit Export der Rohdaten

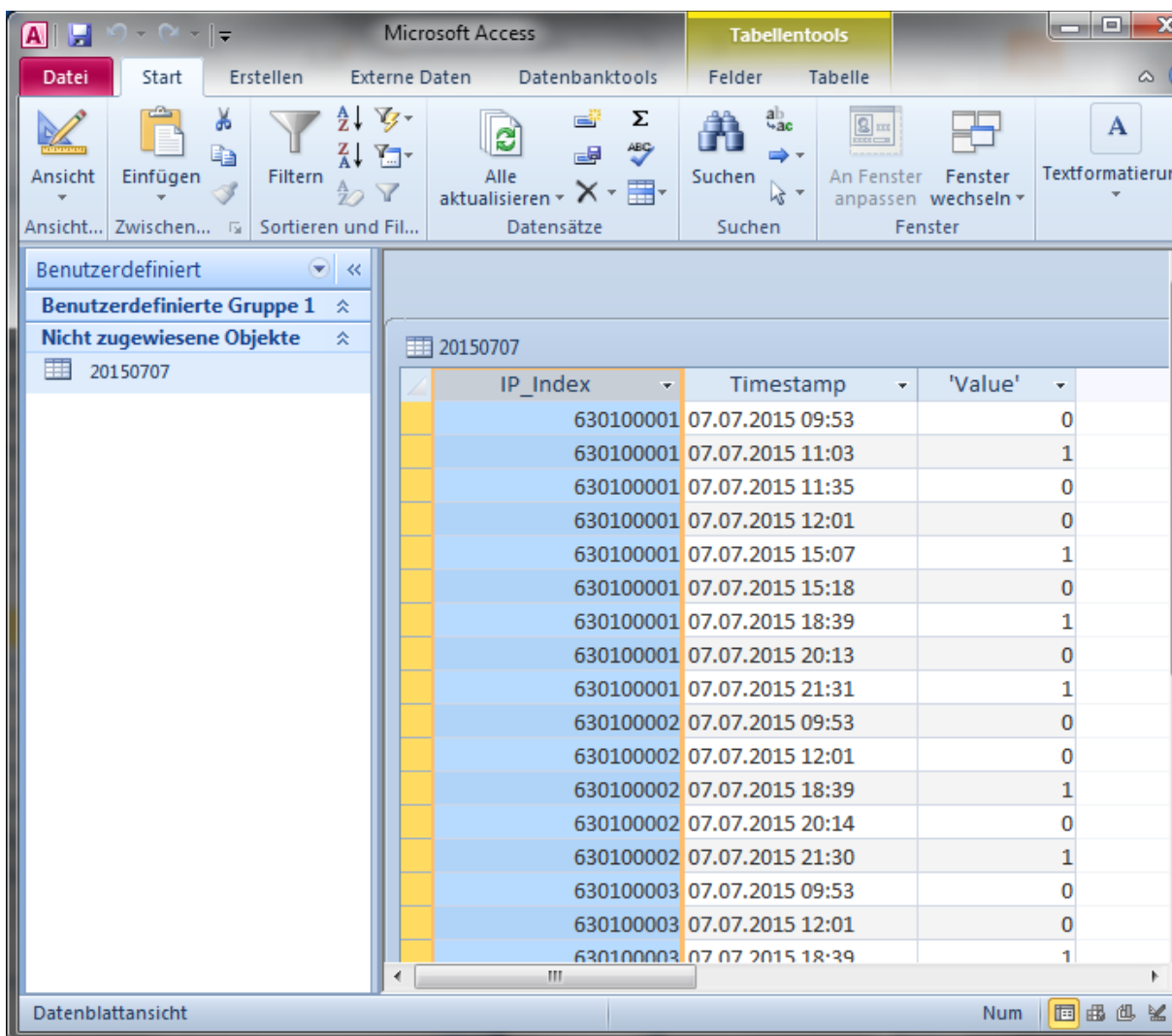
Die Verfügbarkeit der Datenbereitstellung kann als „im Großen und Ganzen“ als zuverlässig bewertet werden. Fehler im Zusammenhang mit der Datenbereitstellung traten selten auf.

Schwerwiegendster Fehler im Datenexport aus der GLT auf den Webserver war eine sporadisch wiederkehrende Unterbrechung der Exportroutine. Grund dafür war der „Absturz“ der Datenaufzeichnung in der GLT-Software. Die Ursache hierfür wiederum konnte nicht mit letzter Sicherheit geklärt werden. Es kann vermutet werden, dass der gleichzeitige Zugriff mehrerer Clients des GLT-Systems auf die GLT-Datenbank zur Störung führte. Das Fehlen der Datei für den Export führte vermutlich zu einem Versagen der gesamten Routine zum Datenexport. Ein automatisches Wiederanlaufen der Routine wurde augenscheinlich nicht implementiert.

Die Störung konnte aus organisatorischen Gründen nicht durch das Monitoring-Team, sondern nur durch einen externen Service beseitigt werden. Die Problembehebung durch den externen Service erfolgte nach Feststellung des Fehlers umgehend.

### 6.3.6 Format der Rohdaten

Eine MS-Access-Datei mit den Rohdaten eines Tages enthält drei Spalten und bis zu 250.000 Zeilen Einträge. Die Größe dieser Daten beträgt zwischen 9 und 13 MB pro Tag. Die erste Spalte *IP\_Index* gibt die Zuordnung der Einträge in den nachfolgenden Spalten. Die Spalte *Timestamp* gibt den Zeitpunkt des erfassten Wertes in der Spalte 'Value' wieder. Die Spalte *Value* enthält den Status, bzw. Messwert. Der IP-Index in der ersten Spalte ist vorlaufend, die Informationen zu den verschiedenen Datenpunkten demnach aufeinander folgend. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung 6-3 nachzuvollziehen. In dem dort gezeigten Beispiel beginnt der IP\_Index mit „63010001“ nach dem letzten Eintrag um 21:00 beginnt darauf folgend der nächste Eintrag „630100012“. Insgesamt werden unter IP\_Index 2495 Datenpunkte erfasst. Dem Beispiel ist auch zu entnehmen, dass die zeitlichen Abstände zwischen den Status- bzw. Messwerte nicht gleich groß sind.



IP_Index	Timestamp	'Value'
630100001	07.07.2015 09:53	0
630100001	07.07.2015 11:03	1
630100001	07.07.2015 11:35	0
630100001	07.07.2015 12:01	0
630100001	07.07.2015 15:07	1
630100001	07.07.2015 15:18	0
630100001	07.07.2015 18:39	1
630100001	07.07.2015 20:13	0
630100001	07.07.2015 21:31	1
630100002	07.07.2015 09:53	0
630100002	07.07.2015 12:01	0
630100002	07.07.2015 18:39	1
630100002	07.07.2015 20:14	0
630100002	07.07.2015 21:30	1
630100003	07.07.2015 09:53	0
630100003	07.07.2015 12:01	0
630100003	07.07.2015 18:39	1

Abbildung 6-3 : Screenshot der Datenstruktur einer MS-Access Rohdatenbank

Die Umstellung von Sommer auf Winterzeit war in den Rohdaten nicht konsistent, so wurden Zeitstempel angelegt, die es in der Mitteleuropäischen Zeitzone nicht geben kann.

Anhand der kumulierten Zählerwerte wurde ein weiteres Problem im Zeitstempel deutlich. So sind Messwert die mit dem Zeitstempel 00:00:00 Uhr abgelegt wurde, um einen Tag bzw. 24 Stunden verschoben. Der Messwert wurde anstelle von 23:59 Uhr am Ende des Tages auf 00:00 des gleichen Tages verschoben. Dies wird in der Abbildung 6-4 deutlich. Dort ist der Zählerwert am

25.10.2015 um 00:00 Uhr größer als der nachfolgende um 00:05, was jedoch per Definition ausgeschlossen ist.

IP_Index	Timestamp	'Value'
630301202	25.10.2013 00:00	138781
630301202	25.10.2013 00:05	138469
630301202	25.10.2013 00:10	138470
630301202	25.10.2013 00:15	138470
630301202	25.10.2013 00:20	138471
630301202	25.10.2013 00:25	138471
630301202	25.10.2013 00:30	138471
630301202	25.10.2013 00:35	138472
630301202	25.10.2013 00:40	138472
630301202	25.10.2013 00:45	138473
630301202	25.10.2013 00:50	138473
630301202	25.10.2013 00:55	138474
630301202	25.10.2013 01:00	138474
630301202	25.10.2013 01:05	138475
630301202	25.10.2013 01:10	138475
630301202	25.10.2013 01:15	138476
630301202	25.10.2013 01:20	138476

Abbildung 6-4: Screenshot Rohdaten mit Fehlerhaften Wert Zeitstempel

In den Rohdaten der Umwälzpumpen zeigten sich fehlerhafte versetzte Zählerwerte die auf die Datenbereitstellung vor der GLT zurückzuführen sind.

### 6.3.7 Definitionsdatei

Als Definitionsdatei wird eine Tabelle verstanden deren Inhalt eine Beschreibung der verschiedenen aufgenommenen Messdaten gibt. Diese Tabelle wurde mit Beginn der Datenaufzeichnung einmalig angelegt. Die Tabelle enthält für jeden der rund 2.500 Datenpunkte die folgenden Einträge:



Tabelle 6-3: Einträge der Definitionsdatei

Eintrag	Bespieleintrag	Bemerkung zum Zweck für Monitoring
IP_Index	630301203	
Liegenschaft	63	ohne
Gebäude	1	ohne
Anlage	ELT HV	Auswahl bestimmter Anlagen, z.B. „Wärmepumpe“
Infopunkt	EZ Wirkleistung	Information zum DP
Adresse	11063001EGHV0133Z__01MW87	ohne
Einheit	kW	Einheit der Messgröße

### 6.3.8 Datenhaltung mit PostgreSQL

Die Rohdaten aus der GLT-Software werden täglich als MS-Access Datenfile bereitgestellt. Die Anforderung an die Datenhaltung war unter anderem über den gesamten Messzeitraum Messdaten schnell verfügbar zu machen. Auf Basis mehrere MS-Access Datenfiles erschien dies nicht möglich. Für die Verlaufsdarstellung eines Datenpunktes über ein Jahr hinweg müsste 365-mal eine MS-Access Datenbank geöffnet werden. Die zunächst naheliegende Speicherung der Daten in einer MS-Access Datenbank scheidet aus, da MS Access auf 2 GB begrenzt ist. Beispielsweise nutzt die GLT-Software als Basis die täglich abgelegten MS-Access Daten, wobei sich sehr lange Zugriffszeiten ergeben.

Für die Speicherung von großen Datenvolumina sind **relationale Datenbanken** (PostgreSQL, MySQL) nicht die optimale Lösung. So genannte No-SQL, Key-Value Database wie beispielsweise (**HDF**) **Hierarchical Data Format** haben sich in der Wissenschaft zur Verwaltung großer Datenvolumina bewährt. Auch stehen Schnittstellen von R beispielsweise zu HDF5 zur Verfügung. Jedoch ist der Umgang mit der Schnittstelle und der Datenbank für die hier gesuchten Lösungen nicht ohne weiteres adaptierbar. Mit mehr Aufwand und Kenntnis über die Struktur der Datenbank sind evtl. deutliche Verbesserungen in der Zugriffszeit im Vergleich zur nachfolgend präsentierten Lösung möglich.

Vor dem Hintergrund der Ziele und der zur Verfügung stehen Ressourcen fiel die Entscheidung für die zusammenfassende Speicherung der Rohdaten, sowie der Definitionsdatei für eine PostgreSQL Datenbank. Durch die Implementierung der Definitionsdatei können über verschiedene Auswahlabfragen verschieden Datenpunkte abgefragt werden.

Um die Daten vom Webserver herunterzuladen, die Daten aus der MS-Access-Datei zu entnehmen und in die PostgreSQL Datenbank zu schreiben, wird die Programmiersprache R mit den für die Aufgaben notwendigen Zusatzpaketen genutzt. Die automatisierte Ausführung wird bei Bedarf durch eine Batchdatei durchgeführt. Das Script ist so aufgebaut, dass zunächst der letzter Eintrag in der Datenbank ermittelt wird. Dann wird mittels Schleife für jeden Tag die Datei vom Webserver heruntergeladen, über ein ODBC Schnittstelle ausgelesen und der Inhalt in die PostgreSQL Datenbank geschrieben.

Die Datenabfrage aus der PostgreSQL Datenbank ist in zwei Stufen getrennt. In der ersten Stufe werden die auszuwählenden Datenpunkte nach Anforderung ermittelt. In der zweiten Stufe werden ein oder mehrere Datenpunkte aus der Datenbank über einen definierten Zeitraum abgerufen. Die Daten der PostgreSQL Datenbank können in einer lokalen Arbeitsumgebung z.B. unter C:\Program Files\PostgreSQL\9.3\data abgelegt werden.

### 6.3.9 Routinen

Zur Verstetigung des Monitoring sollten die Daten automatisch bearbeitet werden. Im Windows Betriebssystem können wiederkehrende Aufgaben über kalendergesteuerte Ausführung von Befehlen (sogenannte Chronjobs) über den Befehl zur *Aufgabenplanung* (C:\Windows\system32\taskschd.msc) automatisiert werden. In der *Aufgabenplanung* wird der Start einer Batch-Datei vorgegeben. In dieser ist beispielsweise der Start eines R-Skriptes welches dann den Datenimport in eine Datenbank vornimmt dargestellt. Der komplexe Ablauf über Chronob ,Batchdatei, R-Script für den Import von MS-Access to PostGresQL kann mit hoher Wahrscheinlichkeit auch kompakter gelöst werden.

```
Batch-Datei:
cd C:\
C:\\"Program Files"\R\R-3.0.2\bin\i386\R.exe CMD BATCH --vanilla
--slave "E:\0 FHE\01 home\11_Arbeitsordner_EnOB\0 Monito-
ring_Daten\Verarbeitung_R\Datenbank_EnOB_schreiben_postgres.r"
pause
if exist "E:\0 FHE\01 home\11_Arbeitsordner_EnOB\0 Monito-
ring_Daten\Verarbeitung_R\Datenbank_EnOB_schreiben_postgres.r.Ro
ut" "E:\0 FHE\01 home\11_Arbeitsordner_EnOB\0 Monito-
ring_Daten\Verarbeitung_R\Datenbank_EnOB_schreiben_postgres.r.Ro
ut"
```

Abbildung 6-5: Batch-Datei

### 6.3.10 Flächen und Randparameter

Nachfolgend wird dargestellt, wie mittels einfacher Tabellierung von Räumen und Flächen mit Zuordnung eines Attributes Anlangen und Flächen spezifische Kennwerte gebildet werden können. Gebäude können mittels flächenspezifischer Kennzahlen miteinander verglichen werden. Das gleiche gilt auch für Teile des Gebäudes bzw. konkrete Anlagen (Heizungskreis, Lüftungsanlage) untereinander. Durch solche Vergleiche dieser Teilenergiekennwerte können Schlüsse abgeleitet werden.

Die Flächen müssen geeignet erhoben werden. Die Information zu Gebäude- oder Teilgebäudefläche setzt sich aus der Größe der Fläche, also einen Zahlenwert in m<sup>2</sup>, und einem Flächentyp bzw. -art zusammen. Eine im Bauwesen genutzte Flächenart ist die Kategorisierung nach DIN 277 [52]. Für die energetische Bewertung ist eine Kategorisierung nach Nutzungsrandbedingungen entsprechend DIN EN V 18 599 Teil 10 [53] sinnfällig. Werden konkreten Anlagen, die durch diese versorgten Flächen zugeordnet, ist ein Vergleich auf Anlagenebene möglich. Beispielsweise kann so der spezifische Energieverbrauch von Heizkreis Nr. 1 mit Heizkreis Nr. 2 verglichen werden. Neben energetischen Fragenstellungen können auch weitere Aufgaben des Gebäudemanagement bearbeitet werden.

Die Feststellung der Flächen DIN 277 auf Raumebene ist Bestandteil der Dokumentation im Rahmen der Gebäudeerrichtung.

Tabelle 6-4: beispielhafte Tabellierung von Räumen und Flächen mit Zuordnung von Attributen

	Raum Bezeichnung	Fläche in m²	Fläche nach DIN 277	Nutzungen	RLT-Anlage
Raum 1.1.1	Büro GF	20	NF 1	1	Anlage 1
Raum 1.1.2	Büro	200	NF 2	2	Anlage 1
Raum 1.1.3	Teeküche	20	NF 1	17	Anlage 3
Raum 1.1.F	Flur	40	FF	19	Keine Anlage
...	...	..		...	

Die für die energetische Bewertung im Betrieb hilfreiche Einteilung der Gebäudeflächen nach DIN EN V 18 599 Teil 10 erfolgt im Rahmen der Genehmigungsplanung oftmals aggregiert auf Zonenebene. Für die Anwendung der Kategorisierung nach den Nutzungsrandbedingungen, kann der detailierungsgrad des Raumes entsprechend der tatsächlichen Nutzung oder nach Zonierung in der Planung die Klassifizierung erfolgen.

Auch über Filterfunktionen in Verbindung mit der =TEILERGEBNIS(9;VON:BIS) im Tabellenkalkulationsprogramm Excel können Flächenkennwerte abgeleitet werden. Die Filterfunktion der Spalten beschreibt die Eigenschaft (z.B. nur Flächen nach DIN „NF 1“ und Nutzung nur „1“) ergibt das Ergebnis Fläche = 20 m²

Alternativ dazu kann in Excel auch Summe wenn(Summe;Bereich1;kriterium1;Bereich2;Kriterium2) genutzt werden.

Tabelle 6-5: beispielhafte Tabellierung von Räumen und Heizkreisen

Zähler	Räume	Verbrauchsart	Verbrauch in MWh
Heizkreis 1	1.1.1;1.2.1;1.1.3	Heizen	10000 kWh
Heizkreis 2	Raum 1.1.F	Heizen	

Tabelle 6-6: beispielhafte Zählern und Räumen

Zähler EM -1	Räume	Verbrauchsart
Wirkzähler 1	1.1.1;1.2.1;1.1.3	Beleuchtung
Wirkzähler 2	Raum 1.1.F	Beleuchtung
Virtueller Zähler Licht 1 +2		

Excel eignet sich aufgrund der intuitiven Handhabung hervorragend für die Eingabe von Daten. Die Möglichkeiten zur Auswertung sind jedoch begrenzt. Für die weitere Verarbeitung kann in Excel eine einfache List mit allen Räumen angelegt werden, denen dann spezifische Eigenschaften in den Spalten zu geordnet werden. Diese Tabelle kann dann mittels der Excel-Funktion speichern unter \*.csv exportiert werden. Alternativ kann auch mit dem Paket [RPAKET] direkt aus Excel eingelesen werden. Der nachfolgende Code gibt den Import der Tabelle nach R und die Erzeugung des Objekten Raum\_Tabelle wieder. Die Tabelle und alle erzeugten Ergebnisse weder am Ende des Codes in eine Workspace-Datei gespeichert. So ist erneutes einladen der csv-Datei nicht mehr notwendig. Alternativ zum direkten Import nach R-Project ist auch die Verwaltung in den Informationen in der Postgresql Datenbank möglich.

## 6.4 Datenaufbereitung

### 6.4.1 Vorbemerkung

Die Datenaufbereitung kann in drei Arbeitsschritte eingeteilt werden.

- i. Prüfen und Aufbereiten der rohen Messdaten
- ii. Aggregieren
- iii. Ausgabe von Ergebnissen entsprechend der Zielsetzung

Für die verschiedenen Typen von Sensoren sind spezifischen Funktionen zur Aufbereitung notwendig die im Folgenden an Beispielen demonstriert werden.

### 6.4.2 Energiezähler

#### 6.4.2.1 Unstetigkeit eines Energiezähler

Zähleinrichtungen zur Erfassung eines Energiestromes speichern den Wert des kumulierten Verbrauchs auf der Feldebene. Dieser Zählerwert wird kontinuierlich an die Datenbank übergeben. Diese Funktion gewährleistet, dass auch unabhängig von etwaiger Störung im übergeordneten System den Verbrauch erfasst werden kann. Der typische Verlauf der übermittelten Werte eines Zählers ist stetig steigend.

An die Datenbank übermittelte Zählerwerte können aus verschiedenen Gründen den ständigen Charakter verlieren. Gründe können die Installation eines neuen Zählers als Ersatz für einen bestehenden, der Verlust des gespeicherten Zählerwertes, die Änderung/Manipulation des Zählerwertes oder Störungen in der Speicherung auf der Feldebene sein. Diese Fehler müssen zunächst erkannt und daraufhin adäquat korrigiert werden.

#### 6.4.2.2 Korrektur kumulierter Verbrauchswert

Die im Gebäude eingesetzten Umwälzpumpen des Fabrikats GRUDFOSS Typ MAGNA mit Anbindung an LON-Netzwerk geben eine Vielzahl von Betriebsinformationen weiter (siehe auch 82 Abschnitt Seite 6.2). Eine dieser Informationen ist der kumulierte Energieverbrauch.

Verursacht durch unbekannte Gründe im System der GLT ist der übermittelte Zählerwert der verbrauchten Elektroenergie für einige Umwälzpumpen in der Datenbank nicht stetig steigend. Es ist in der Abbildung 6-6 deutlich zu erkennen, dass der nicht korrigierte Wert „nach oben“ und „nach unten“ springt.

Intuitiv ist aus dem Verlauf der Rohdaten (schwarz) in der Abbildung 6-6 abzuleiten, dass durch die Korrektur der Werte, ein plausibler Verlauf berechnet werden kann. Die Sprünge können mit  $R$  durch die Prüfung des stetig steigenden Verlaufs des Wertes „erkannt“ werden. Durch die Berechnung des Betrages des Versatzes, kann dieser ausgeglichen werden. Dabei ist für einen Sprung „nach unten“ die Prüfung der Datenreihe mit  $\text{Wert}_i > \text{Wert}_{i+1}$  leicht möglich. Der Sprung „nach oben“ muss durch eine Schwelle  $S$  definiert werden. Es liegt dann ein Fehler in der Messdatenerfassung vor wenn  $(\text{Wert}_{i+1} - \text{Wert}_i) > S$ . Diese Schwelle kann, wie im Beispiel gezeigt, aus Erfahrungswerten, festgelegt werden oder aus statistischen Kenngrößen der Messreihe berechnet werden. Aus der Differenz der kumulierte aufeinanderfolgenden kumulierten Energieverbrauchswerte ( $\text{Wert}_{i+1} -$

Wert  $\sigma$ ) kann ein der Verbrauch zu jeder Verbrauchsperiode bestimmt werden. Für diese Zeitreihe des Verbrauchs kann die Standardabweichung mit R bestimmt werden.

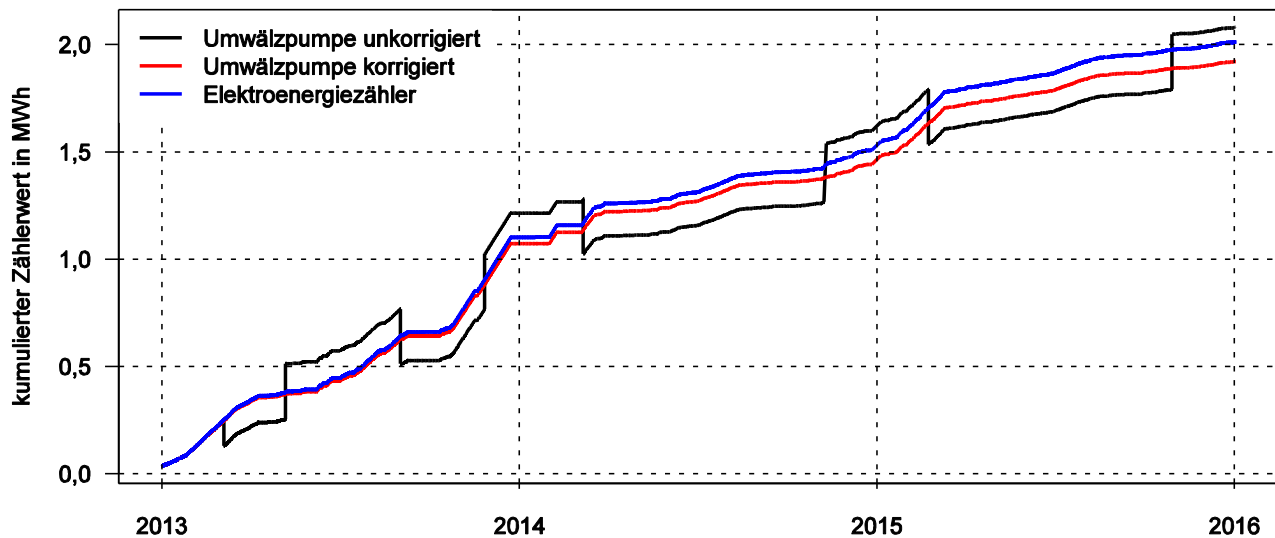


Abbildung 6-6: Verlauf der kumulierten Zählerwerte einer Pumpen vor und nach Messwertkorrektur im Vergleich zu Elektroenergiezähler

Die Standardabweichung der Verbrauchswerte kann Ausgangswert für die Identifikation der Fehlerstelle dienen. Mittels Filterung (löschen) der Zählerwerte aus der Zeitreihe dessen Verbrauch größer ist als die Standardabweichung multipliziert mit einem festzulegenden Faktor, können Ausreißer bereinigt werden. Anschließend kann aus den Verbrauchswerten der Perioden der kumulierte Energieverbrauch durch Addition zusammen geführt werden.

### 6.4.2.3 „Nullwert“ eines Energiezähler

Neben den beschriebenen komplexen Fehlern im Verlauf des kumulierten Energieverbrauchswertes können auch einfache „Nullstellen“ im Zeitverlauf ein Problem darstellen. Dies vor allem dann, wenn der Wert zu Beginn oder Ende eines Intervalls zur Verbrauchsbestimmung steht. Mit R können diese Fehler einfach mit folgendem Befehl beseitigt werden

Code 6-1: Identifizieren eines Messwertes mit „0“ und Filtern des Wertes mit R-Project

```
Fehlerhafte_Daten      # ist eine Zeitreihe mit Messwerten in
Spalte 2

# Extraktion der fehlerfreien Daten, durch Auswahl in Spalte
[,2] nur # Daten, bei denen der Messwert größer als Null ist:
Fehlerfreie_Daten<- Fehlerhafte_Daten[Fehlerhafte_Daten[,2] >0,]

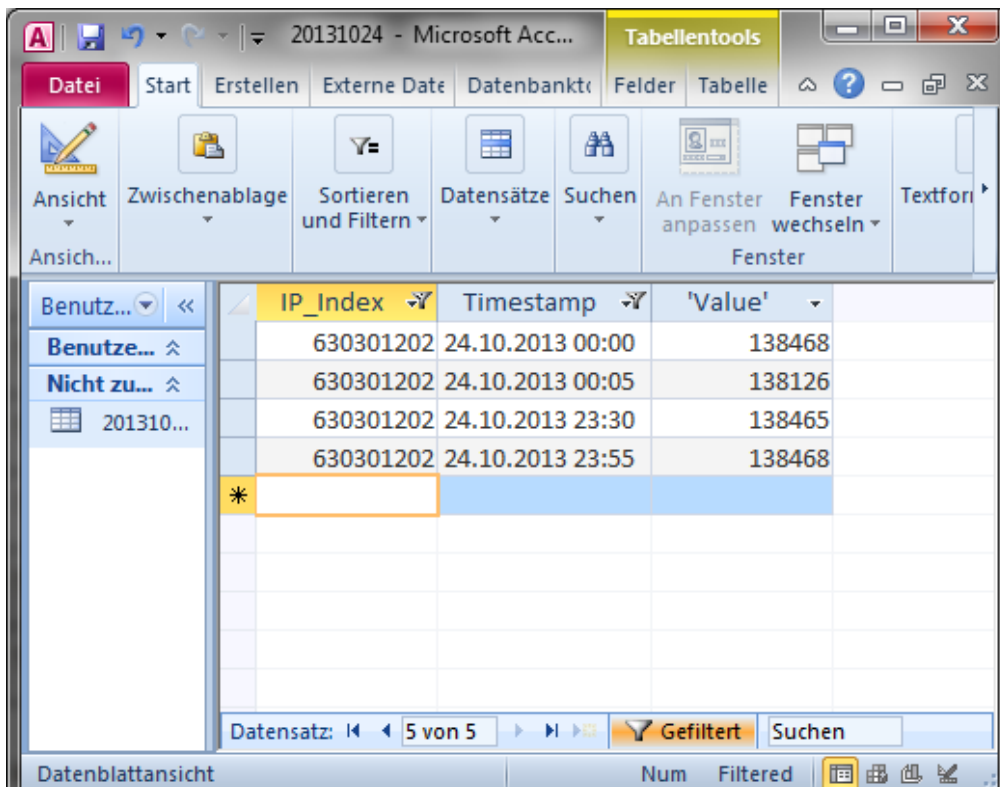
# Extraktion der fehlerhaften Daten, durch Negation mittels „!“
Fehler_Daten          <- Fehlerhaf-
te_Daten[!Fehlerhafte_Daten[,2] >0,]
```

### 6.4.3 Fehler im Zeitstempel

Eine andere Fehlerquelle war die ungenaue Weitergabe des Zeitstempels (timestamp) zum Zählerwert. Dabei ist der Umgang mit der **Zeitzone** sowie die Umstellung von Winter MEZ UTC+1 auf Sommer MESZ UTC+2 sowie der **Datumswechsel** also der Zeitraum von 23:59 Uhr hin zu 00:00 Uhr von Bedeutung. Das folgende Beispiel beschreibt den Sachverhalt.

In dem Verlauf des kumulierten Zählerwertes eines EZ konnten regelmäßig wiederkehrender Unstetigkeit zur Uhrzeit 00:00 festgestellt werden. Diese Abweichung wird besonders deutlich wenn der Verbrauch zwischen Zählerwerten dargestellt wird. Der Erstellung einer Zeitreihe mit dem Verbrauch zwischen zwei Zählerwerten im Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden**. Ein weiterer Fehler im Zusammenhang mit der Zeitumstellung in der Roh-Daten ist ein Zeitstempel der die Umstellung der von Winterzeit (Normalzeit auf Sommerzeit) hier werden Zeitstempel erzeugt, die nicht vorhanden sind. Namentlich sind dies Zeitstempel zwischen 2:00 und 3:00 Uhr am Tag der Umstellung. Es ist anzumerken, dass die Herausforderung diese Fehlerbeseitigung in der eindeutigen Automatisierung und der Reinform der Fehlerbeseitigung zu sehen ist. Aggregieren und Bearbeiten von Messdaten Seite 96 beschrieben. Grundsätzlich bieten sich für die Behandlung dieses Fehlers auch das Löschen aller Werte um 00:00 an.

Es zeigt sich, dass der Fehlerwert mit dem Datum DD.MM.YYYY um 00:00 Uhr dem Wert in der Zeitreihe des Folgetages (DD (Tag) + 1 Tag) entspricht. Augenscheinlich wurde der Messwert vor 24:00 Uhr aufgezeichnet jedoch mit dem Zeitstempel 00:00 Uhr gespeichert. Durch die Verschiebung der Werte zur Uhrzeit 00:00:00 um einen Tag kann die Messreihe plausibel korrigiert werden. Der Zählerwert des Hauptzähler Elektro betrug nach Roh-Daten am 24.10.2013 um 23:50 138.468 kWh. Zum nächsten Zeitschritt am 25.10.2013 um 00:00:00 Uhr 138.781 kWh zum nächstfolgenden am 25.10.2013 um 00:02 138.469 kWh. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Verlauf in den Roh-Daten der MS-Access-Datenbank.



Benutz...	IP_Index	Timestamp	'Value'
Benutze...	630301202	24.10.2013 00:00	138468
Nicht zu...	630301202	24.10.2013 00:05	138126
201310...	630301202	24.10.2013 23:30	138465
	630301202	24.10.2013 23:55	138468
*			

Abbildung 6-7: Screenshot der Roh-Daten in MS-Access mit nicht plausiblen Zählerverlauf

Die Zeitreihe am nächsten Tag weist ein vergleichbares Bild auf. Es ist zu erkennen, dass der Wert des 25.10. gut zur Reihe am 26.10. passt. Die originalen Daten in der GLT bestätigen dies ebenso.

Tabelle 6-7 : ausschnitte Zählerwerte IP630301202

Zeilen-nummer	Timestamp	'Value'	Timestamp	'Value'
	Tag 1		Tag 2	
1	2013-10-24 23:50:00	138.468	2013-10-25 23:50:00	138.780
2	2013-10-24 23:55:00	138.468	2013-10-25 23:55:00	138.781
3	2013-10-25 00:00:00	138.781	2013-10-26 00:00:00	138.953
4	2013-10-25 00:05:00	138.469	2013-10-26 00:05:00	138.782
5	2013-10-25 00:10:00	138.470	2013-10-26 00:10:00	138.782

Der Verlauf der Werte ist eindeutig nicht plausibel. Im Gegensatz zum dem im Abschnitt 6.4.2.2 Seite 93 beschriebenen Fehler, ist nicht der Wert der kleiner ist als sein Vorgänger (Zeile 4 in der Tabelle 6-7 ) nicht plausibel, sondern der Vorgänger in der Zeile 3. Für die Korrektur wird aus dem Zeitstempel ein Faktor gebildet. Dieser Faktor repräsentiert die Uhrzeit 00:00:00. Mit diesem Faktor werden zu ändernden Zeitstempel Werte

### Identischer Zeitstempel in einer Zeitreihe

Weiterer Fehler war ein oder mehrere identische vorkommende Zeitstempel in einer Zeitreihe sein. Dies wird Verursacht zum Beispiel aus der Zeitumstellung. Mit der R-Funktion duplicated bezogen auf die Spalte des Zeitstempels kann eine Prüfung erfolgen ob reihen identische Zeitstempel enthalten. Mit der Negierung der Funktion kann die Auswahl aller nicht doppelten Werte erfolgen, die dann als korrigierte Zeitreihe weiterverarbeitet werden können.

```
#prüfen ob und wo der ein Zeitstempel doppelt ist
> IP630301202 [duplicated(IP630301202[,1]),]

# Prüfen der Zeitreihe
IP630301202[23825:23832,]

# löschen in Form der Erzeugung eines neuen Objektes ohne den
Fehlerhaften wert
IP630301202_be<-IP630301202 [!duplicated(IP630301202[,1]),]
```

Ein weiterer Fehler im Zusammenhang mit der Zeitumstellung in der Roh-Daten ist ein Zeitstempel der die Umstellung der von Winterzeit (Normalzeit auf Sommerzeit) hier werden Zeitstempel erzeugt, die nicht vorhanden sind. Namentlich sind dies Zeitstempel zwischen 2:00 und 3:00 Uhr am



Tag der Umstellung. Es ist anzumerken, dass die Herausforderung diese Fehlerbeseitigung in der eindeutigen Automatisierung und der Reinform der Fehlerbeseitigung zu sehen ist.

## 6.5 Aggregieren und Bearbeiten von Messdaten

### Periodische Energiemengen aus Zählerwerten

Aus dem Verlauf von kumulierten Energieverbrauchswerten als Zeitreihe (Zählerwerten) kann der Verbrauch zwischen zwei Zeitpunkten mit  $\text{Wert}_{i+1} - \text{Wert}_i$  bestimmt werden. Diese Zeitreihe des Verbrauchs kann für die Charakterisierung des Betriebs sowie die Fehlererkennung genutzt werden. Mittels der R-Funktion „difftime“ kann der Start- und Endwert der gewünschte Zeitspanne vorgegeben werden. Somit können Energieverbrauchswerte für beispielsweise Tage, Stunde, Wochen oder Quartale gebildet werden.

### Ereignisbezogener Split der Energiemengen aus Zählerwert

Für die Berechnung von zustandsbezogenen Verbrauchswerten ist die Auftrennung von Verbrauchswerten notwendig. Beispiel für diese Anwendung sind Untersuchungen zum Elektroenergieverbrauch von Pumpen während aktiver Kühlung oder des Heizbetriebes. Das Ereignis bzw. die Bedingung für die Aufteilung kann mittels diskreten Werts 0/1 oder sogenannter Faktoren (Bedingungen) beschrieben werden.

Grundsätzlich kann der kumulierte Verbrauchswert am Ende und Anfang der definierten Periode genutzt werden ( $\text{Wert}_{\text{Ende}} - \text{Wert}_{\text{Start}}$ ).

## 6.6 Mittlere Außenlufttemperatur

Für die Berechnung der Heizgradtage werden die Temperaturwerte in Stundenwerte gemittelt. Für Zeiträume (X Stunden) mit Datenausfällen wurde zwischen Messwerten interpoliert.

Die Außentemperatur wird mittels COV change of value Verfahren in der Datenbank abgelegt. Dies bedeutet, dass Messdaten nur dann abgelegt werden, wenn auch eine Änderung des Messwertes um eine festgelegte Größe registriert wurde. Die nachfolgende Abbildung 6-8 (Seite 98) illustriert dies für eine kurze Periode. Die geschriebenen Messwerte sind durch schwarze Punkte dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die Messdaten in unregelmäßigen zeitabständen aufgezeichnet wurden. Die lineare Verbindung zwischen den einzelnen Punkten, entspricht der vereinfachenden Annahme, dass die tatsächliche Temperatur zwischen den Punkten linear verläuft.

Aggregierte Angaben (z.B. Tagesmittelwert, rollendes Mittel) zum Verlauf der Außentemperatur sind von hoher Bedeutung für die Analyse des Gebäudebetriebes. Es ist zu beachten, dass unter dem Mittelwert des Verlaufs einer Messgröße ein zeitlich gewichteter Mittelwert gemeint ist und nicht der Mittelwert der aufgezeichneten Daten. Um aus den vorliegenden unregelmäßig aufgezeichneten Daten zeitlich gemittelte Werte generieren zu können, wird die Messreihe um zeitäquidistante Punkte auf den linear verlaufenden Verbindungen zwischen den Messpunkten der Rohdaten ergänzt bzw. umgewandelt. In der nachfolgenden Abbildung sind dies die roten Punkte. Der arithmetische Mittelwert dieser äquidistanten Datenreihe entspricht mit guter Näherung dem tatsächlichen zeitlichen Mittelwert. Damit wird eine numerische Methode zur Zeitgewichtung der Messwerte gefunden. Für die gezeigte Zeitreihe in der Abbildung 6-8 ergibt sich ein Mittelwert für die Rohdaten von  $\bar{\theta}_e = -0,2 \text{ °C}$  und für die aufbereitete Zeitreihe von  $\bar{\theta}_e = -1,1 \text{ °C}$ . Dieser Unterschied ist für die gesamte Messreihe nicht repräsentativ.

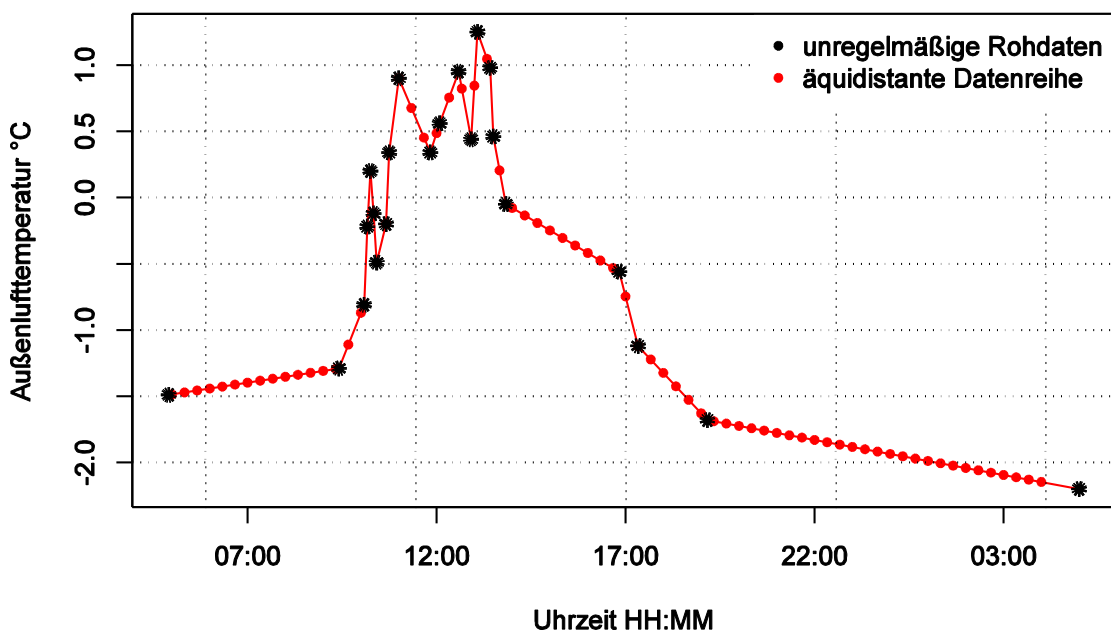


Abbildung 6-8: Exemplarischer Verlauf nicht äquidistante Rohmessdaten und äquidistante Datenreihe für Bestimmung des Mittelwertes

Das Berechnen des niedrigsten Zweitages-Temperatur kann aus dem Mittel von 48 Stunden oder dem laufenden Mittel von  $n=2$  Tagesmittel erfolgen.

## 6.7 Leistungswerte (z.B. Solarstrahlung)

Die Verarbeitung von Messwerten der Leistung (z.B. Solarstrahlung in  $W/m^2$  oder elektrische Energie) zur Bildung von stündlichen Mittelwerten erfordert ein anderes Vorgehen als bei den Temperaturwerten. Die Problemstellung ist hier, auch innerhalb einer grundsätzlich äquidistanten Messreihe, dass auch diese mit Datenausfällen behaftet sein können und aufzubereiten sind. Ob die Zeitreihe in äquidistanten Abständen vorliegt kann mit dem R-Befehl `is.regular(DATEN, strict = TRUE)` aus dem Package ZOO [54] festgestellt werden.

Ist der Verlauf der erfassten Messgröße sehr dynamisch, so ist eine Interpolation zwischen zwei gegebenen Messpunkten nur dann möglich, wenn der Abstand zwischen den Messpunkten gering genug ist.

Das Vorgehen ist prinzipiell das folgende: Zunächst sollen längere Zeiträume ohne Messdaten identifiziert werden. Um dies zu erreichen, wird die bestehende Zeitreihe mit etwaigen fehlenden Messwerten um eine äquidistante Zeitreihe, ohne Messwerte ergänzt. Liegen zu dem Zeitraum keine Messdaten vor, so wird statt dessen ein „NA“ gesetzt. Der Abstand zwischen zwei Punkte der ergänzenden Messreihe, sollte so gewählt werden, dass dieser der noch vertretbare Abstand für eine Interpolation ist. In der nachfolgenden Grafik sind im obersten Verlauf die Rohdaten mit Messdatenausfall am 05.06.2015 erkennbar. Eine Interpolation zwischen den Messpunkten am Beginn und am Ende des Ausfalls, würde zu falschen Ergebnissen führen. Die aufbereiteten stündlichen Messdaten sind in der Mitte der Grafik dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf grundsätzlich plausibel ist. Der erste aufbereitete Messwert nach dem Ausfall unterschätzt jedoch den tatsächlichen Verlauf. Dies ist der Konvention geschuldet, jeden möglichen Stundenwert aus-

zugeben. Für eine nachfolgende Umrechnung der Leistung in eine Energiemenge pro Tag, ist die Abweichung gegenüber den tatsächlichen Verhältnissen am geringsten.

Das hier gewählte Beispiel diene der Demonstration der Methode. Tatsächlich werden Fehlstellen durch die Messung aus dem KMF ergänzt.

Dies ist notwendig, um in der weiteren Verarbeitung eine maximale Spannweite für die Interpolation zwischen zwei Messwerten sinnvoll berücksichtigen zu können.

Im nächsten Schritt werden alle Messwerte in der neuen Zeitreihe auf z.B. 10 min Zeitpunkte gesetzt. Wird das Mittel eines Leistungsmesswerts über ein Intervall von einer Stunde gesetzt kann hieraus direkt die Energiemenge abgelesen werden. Liegt die Leistung in anderen Zeitabständen vor, so muss die Leistung entsprechend der Zeitdifferenz zwischen zwei Messpunkten in einer Energiemenge umgerechnet werden. In der Praxis sind Energiemengen bzw. Leistungskennwerte über ein Intervall von 15 min für elektrische Energie üblich. Dies ist vor allem dann relevant, wenn ein Leistungspreis in die Energiebezugskosten eingeht.

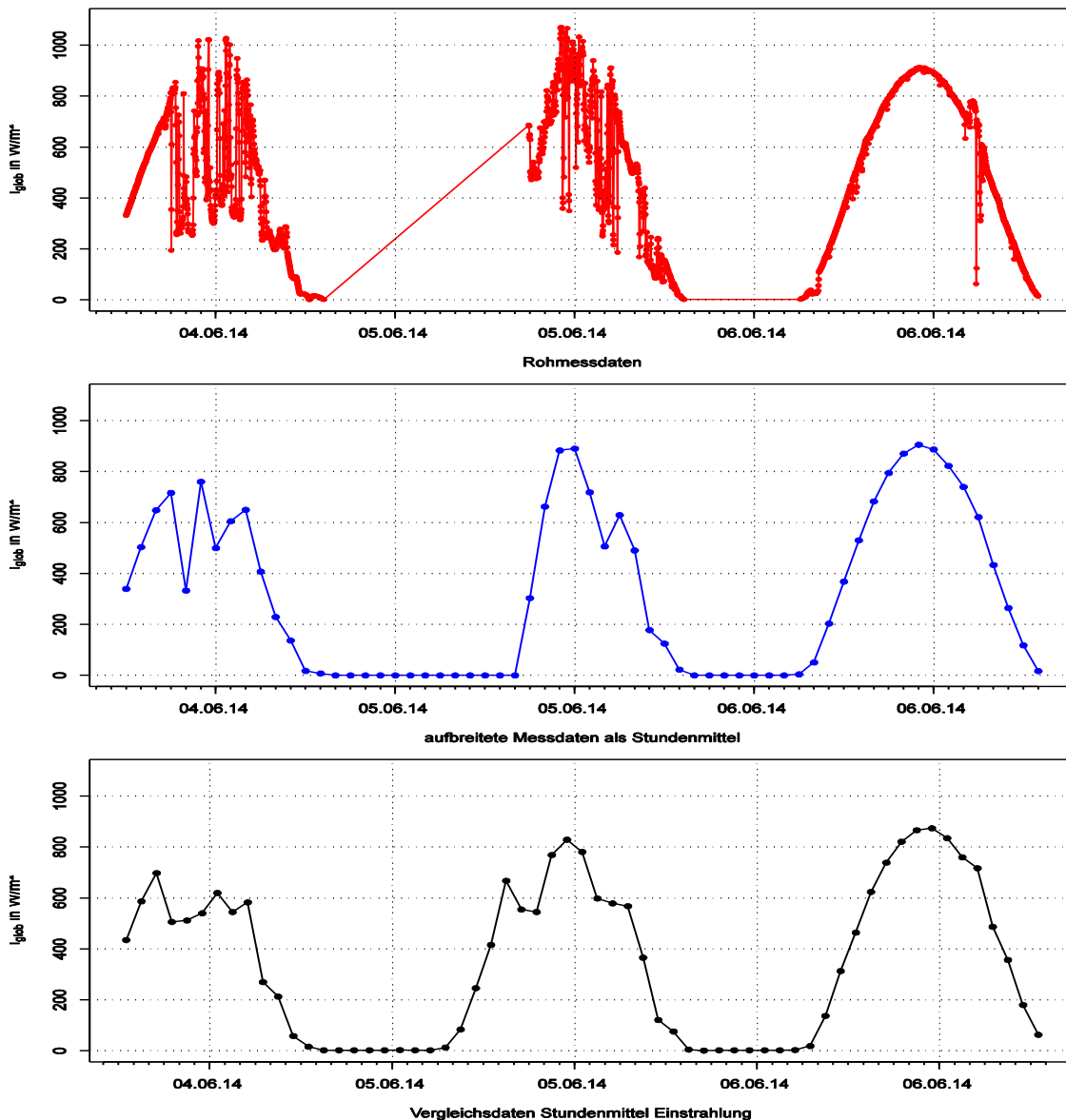


Abbildung 6-9 Verlauf der Messdaten der Solarstrahlung, oben Rohdaten, Mitte Stundenmittel der aufbereiteten Daten, unter Vergleichsmessung aus KMF

## 6.8 Tagessummen

Der kleinste zyklisch wiederkehrende Zeitraum ist der Tag. Mittels Bestimmung von Tagessummen von Verbräuchen oder Zuständen können spezifische Betriebsmuster erstellt und bewertet werden. Die Eingangsgröße für die Bestimmung von Tagessummen können entweder kumulierte Zähl- oder Leistungsdaten sein.

Die Bestimmung von Tagesummen aus Messwerten einer Leistung, benötigt einen äquidistanten Verlauf des Messwerts. Wurde der Messwert im COV Verfahren aufgezeichnet, so ist ein Vorgehen wie im Abschnitt der Außentemperaturen erforderlich.

Durch Multiplikation des Leistungsmesswertes mit der Größe des Zeitintervalls in dem der Messwert gültig ist, kann die Energiemenge berechnet werden.

$$E = \sum_{i=1}^n W_i \cdot t_i \quad \text{Gl. 2}$$

mit:

W	Messwert der Leistung
t	Zeitintervall (z.B 1h, ¼ h , 1 min )
E	Energie

Bei äquidistanten Zeiträumen kann über das arithmetische Mittel der Leistung der Messreihe die Energiemenge bestimmt werden. Der Mittelwert, multipliziert mit dem Zeitintervall des Betrachtungszeitraums, ergibt die Energiemenge. Beträgt beispielsweise die mittlere Einstrahlungsleistung der letzten zwei Stunden 100 W, beträgt die Einstrahlungsenergie 200 Wh.

$$E = \overline{W} \cdot (t_n - t_i) \quad \text{Gl. 3}$$

Wird der Mittelwert der Leistung für eine Stunde berechnet, so entspricht dies der Energiemenge pro Stunde.

## 6.9 COV- chang of value

Um einen COV aus Betriebsdaten zu bewerten, besteht hinsichtlich der Aggregation auf Stundenbasis die Möglichkeit, entweder die Rohdaten zunächst mit 1 min zu verbinden, dann die fehlenden Daten aufzufüllen. Oder als Alternative die Daten ohne weiteres über eine Stunde zu mitteln. Die graphische gestützte Bewertung, zeigt keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Methoden.

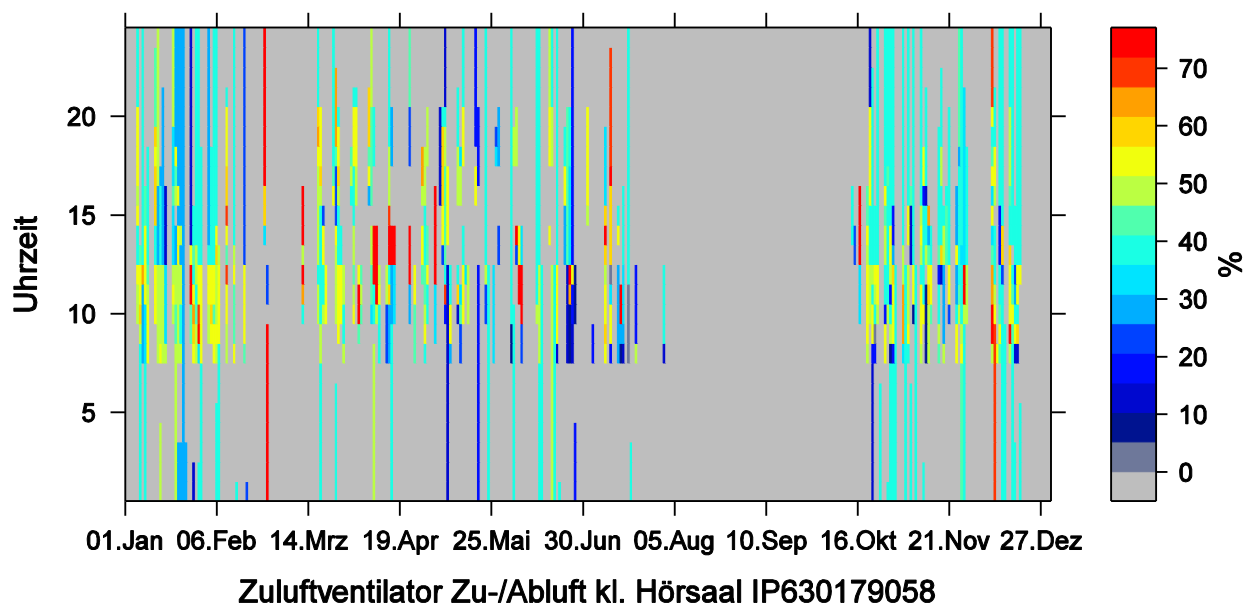


Abbildung 6-10: Stunden-Werte

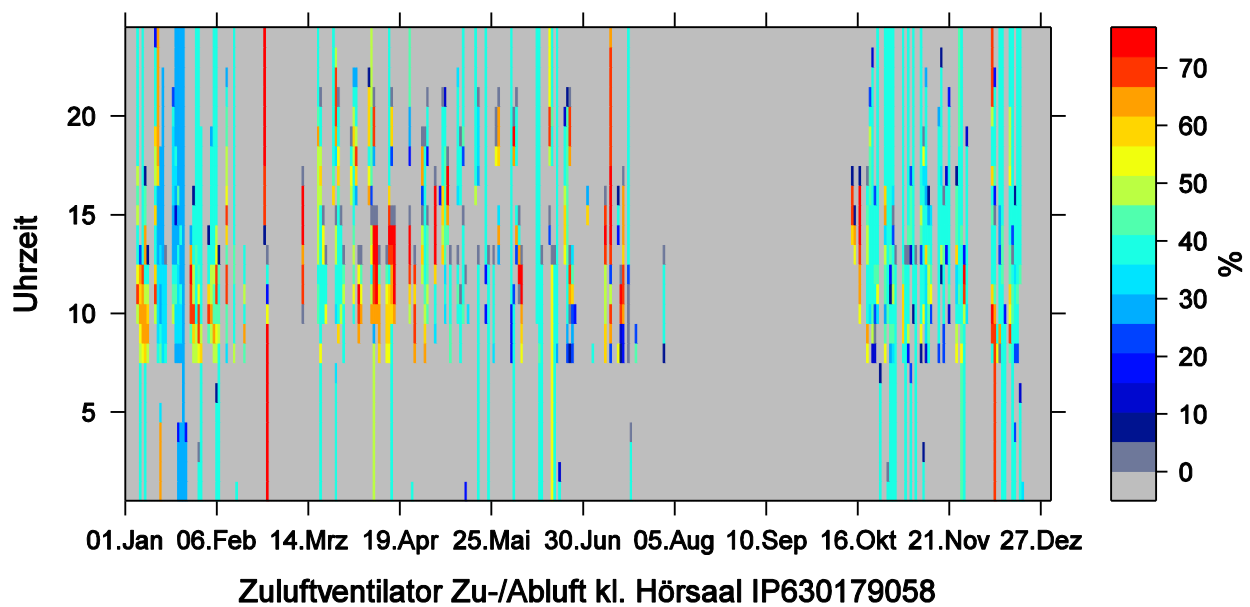
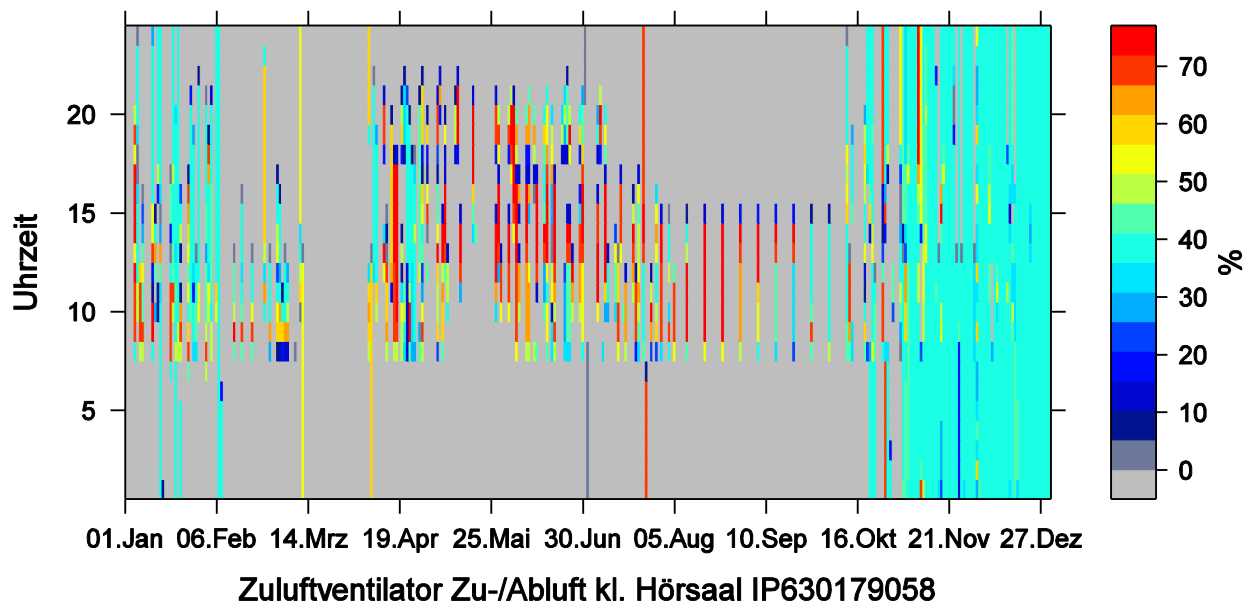


Abbildung 6-11: Minuten-Werte



mi

Abbildung 6-12: Aggregierte Minuten-Werte

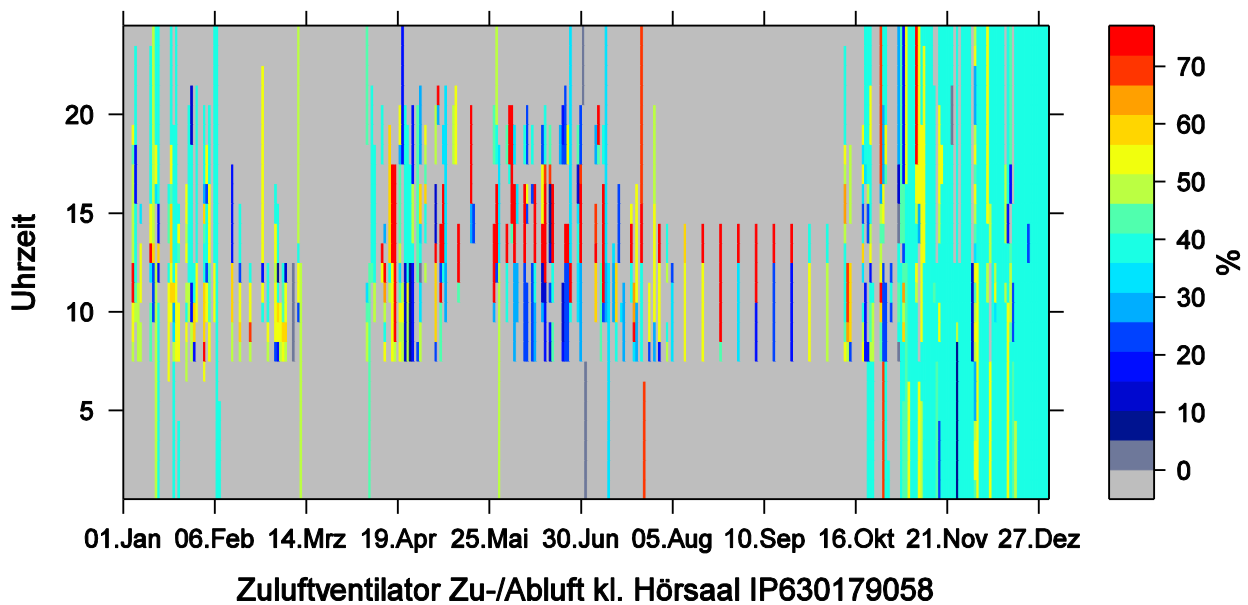


Abbildung 6-13: Aggregierte Stundenmittelwerte

## 6.10 Funktionen der Datenanalyse

### 6.10.1 Vorbemerkung

Mit den aufbereiteten Messdaten können verschiedene Darstellungen der Daten erzeugt werden. Vereinfacht formuliert kann zwischen graphischen Darstellungen und Verfahren mit numerischen Ergebnissen unterschieden werden. Die Graphischen Verfahren können durch einen fachkundigen

Betrachter subjektiv bewertet werden. Die numerischen Verfahren eignen sich zur objektiven Bewertung und insbesondere zur automatisierten Betriebsüberwachung.

### **6.10.2 Faktoren**

Oftmals bestimmten zunächst unbekannte Einflussgrößen den Energieverbrauch. Mittels statistischer Methoden ist es möglich diese Faktoren zu identifizieren und deren Einfluss zu quantifizieren. Das Programm R-Project dient grundsätzlich genau diesem Zweck.

Ein erster Schritt dieser Identifikation kann der einfache Vergleich der Daten nach Faktoren geordnet mittels Boxplot sein.

Die nachfolgende Grafik zeigt die statistischen Kennwerte des Energieverbrauchs nach Wochentagen. Es lässt sich ein Muster erkennen, wonach der Faktor des Wochentages deutlichen den Energieverbrauch bestimmt. Wie zu erwarten, ist dieser an den Tagen des Wochenende deutlich geringer als in der Woche. Auch wird sichtbar, dass in der Wochenmitte höher ist als am Wochenanfang. Die nächste Abbildung zeigt den Energieverbrauch im Semester und während der semesterfreien Zeit.

### **6.10.3 Boxplot nach Faktoren**

Mit dem Boxplot können die statistischen Kennwerte eines Messwertes grafisch dargestellt werden. Die Kennwerte sind Median, 25%-Quartil und 75%-Quartil sowie Ausreißer.

Der Vergleich eines einzelnen Messwertes mit den statistischen Kennwerten der historischen Daten erlaubt die Einordnung des Wertes.

Zum Beispiel kann der Energieverbrauch eines konkreten Tages mit dem historischen Energieverbrauch der vorherigen Tage verglichen werden. Der Energieverbrauch könnte so beispielsweise als Wert zwischen oder außerhalb des 25%-Quartil und 75%-Quartil eingeordnet werden. Ein Wert außerhalb kann als auffällig bewertet werden.

### **6.10.4 Dauerlinie (geordnete Summenkurve)**

Eine typische funktionale Darstellung ist die nach Messwertwerten geordnete Reihe, bzw. die sogenannte Summenkurve. Dies lässt sich durch einfaches sortieren des Werte erzeugen.

### **6.10.5 Verteilungsfunktion**

Verteilungsfunktion (ecdf= empirical cumulative distribution function) gibt eine ähnliche Übersicht wie die geordnete Summenkurve. Aus der Kurve können schnelle Informationen zum Auftreten bestimmter Zustände gegeben werden.

Werden Informationen zu einer Messwertreihe in Bezug auf Zeiträume gesucht, so ist in den Eingangsdaten auf zeitäquidistante Messreihen zu achten.

Mittels Filterung der auszuwertenden Zeitreihen, können spezielle Abfragen erstellt werden. Zum Beispiel, wie häufig wurde der Sollwert bei Anwesenheit im Winter nicht erreicht.

### **6.10.6 Carpet-Plot**

Der Carpetplot oder Rasterplot ist die geeignete Methode zur graphischen Überwachung von Messdaten in der Zeit. Es können über einen größeren Zeitraum Muster erkannt werden, die in einem Zeitverlaufsplot nicht erkennbar wären.



### 6.10.7 Zeitverlaufsplot (kontinuierlich)

Der Zeitverlaufsplot ist die in der Praxis gängige Visualisierung von Betriebsgrößen. Dabei werden eine oder mehrere Betriebsgrößen fortlaufend in einem dem kartesischen Koordinatensystem ähnlichem Diagramm dargestellt. Die Abszisse stellt den Zeitverlauf, die Ordinate den Messwert dar. Der Betrachter kann durch Systemkenntnis aus dem zeitlichen Verlauf oder dem Verlaufsverhalten mehreren Größen Rückschlüsse auf das Anlagenverhalten ziehen.

### 6.10.8 PMV- und PPD

R-Project erlaubt es auch, komplexere Funktionen umzusetzen. Der normative thermische Raumkomfort kann neben der reinen Raumlufthtemperatur ein wichtiger Anhaltspunkt sein, die in der Norm gegebene Funktion zur Berechnung des PMV iterativ zu lösen. Als gemessene Eingangsgröße geht die Raumlufthtemperatur ein. Die notwendige Strahlungstemperatur der Flächen muss geschätzt werden. Die Größen des Bekleidungswiderstandes und der Aktivitätsgrad können je nach Jahreszeit vorgegeben werden.

### 6.10.9 Zeitverlaufsplot (mehrere Perioden übereinander)

Wiederkehrende Betriebsmuster, bzw. Unterschiede im Verlauf einer Betriebsgröße können durch Übereinanderlegen des Messwertverlaufs realisiert werden.

## 6.11 Messfehler und Datenausfall

Die nachfolgende Tabelle dient der Übersicht verschiedener Fehlern oder Messdatenausfällen während des Monitorings. Diese Liste dient der internen Dokumentation

Tabelle 6-8: Übersicht zu fehlenden Messdaten aufgrund von Ausfällen in der Datenaufzeichnung

Betrifft Daten von bis einschließlich		IP	
Von	bis		
06.11.2013 16:40	07.11.2013 07:16	ALLE	Umstellung des Aufzeichnungsintervall
2013-03-01 11:45:00		IP630166211 IP630167211 IP630169211 IP630170211 IP630171211 IP630165211 IP630174211	Null-Wert Zähler
2013-11-18 12:32:00		IP630166211 IP630167211 IP630168211 IP630169211 IP630170211 IP630171211 IP630165211 IP630174211	Null-Wert Zähler
2015-03-09 09:38:00		IP630175221	Null-Wert Zähler
21.08.2015 16:40	23.08.2015 07:16	ALLE	Datenausfall nach Stromabschaltung, „Server down“
		IP630167311 IP630168311 IP630169311 IP630170311	Pumpenzählerwert mit Versatz

## 7 Messstellen und Messgeräte

### 7.1 Vorbemerkung

In diesem Abschnitt sind Messgeräte wie Sensoren und Zähler sowie Struktur und Einbausituationen dargestellt.

### 7.2 Wetterstation

#### 7.2.1 Einordnung des Gebäudestandortes

Die Witterungsbedingungen, die auf ein Gebäude wirken, sind entscheidend für den Energieverbrauch und den thermischen Komfort der Nutzer. In den nachfolgenden Abschnitten werden die verwendete Messtechnik für die Erfassung der Parameter vorgestellt und die Ergebnisse der Messung präsentiert. Des Weiteren werden Einordnungen und Gegenüberstellungen zum Referenzklima, dem langjährigen Witterungsverlauf und zu benachbarten Wetterstationen gegeben. In der Planung und der Bewertung des Betriebs von Gebäuden nehmen Wetterdaten eine zentrale Rolle ein. Für die Bewertung des Betriebes werden Wetterdaten aus unterschiedlichen Quellen genutzt um den Energieverbrauch einzuordnen.

Das Gebäude in Erfurt gehört entsprechend der Einteilung nach DIN 4710 zur Klimazone 9 [55] und damit zu den kälteren Regionen in Deutschland. Entsprechend der DIN V 4108-6 ist der Gebäudestandort dem Referenzort Erfurt in der Region 6 zuzuordnen [56]. Die Jahresmitteltemperatur entsprechend der DIN EN 12831 beträgt 7,9°C und bezieht sich auf die DIN 4710. Die Norm-Außentemperatur für die Auslegung des Heizungssystem beträgt  $\theta_e = -14\text{ °C}$  [38]. Aus den repräsentativen Wetterdaten des TRY 9 des DWD [57] kann mit [58] der Standort der ASHRAE Klimazone 5A (kalt und feucht) zugerechnet werden. Nach Köppen-Geiger Klassifikation liegt der Gebäudestandort in der Region *Cfb* „warme Temperatur“, feucht mit warmen Sommer [59]. Nach der VDI 2078 gehört der Standort zur Kühllastzone 2 (KLZ).

#### 7.2.2 Standort der Messstation

Die Messstation zur Erfassung der meteorologischen Einflüsse ist auf dem Dach des Neubaus des Hörsaal- und Laborgebäude (HLG) verortet vgl. (Abbildung 7-1).

Die Wetterstation auf dem Dach befindet sich, wie das Gebäude, an folgender Position (Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: Position der Messstation auf dem Gebäude HLG

Breitengrad (Latitude)	Längengrad (Longitude)	Höhe über Normalnull ueNN	Höhe über OK-Dach	Höhe OK-Dach über Grund
		m	m	m
50.991879	11.054417	199,71 [61]	0,2 bis 2,5	7,50 [61]
N50° 59.51273	E11° 3.26502			
N50° 59' 30.764"	E11° 3' 15.901"			
50°59'30.8"N	11°03'15.9"E			

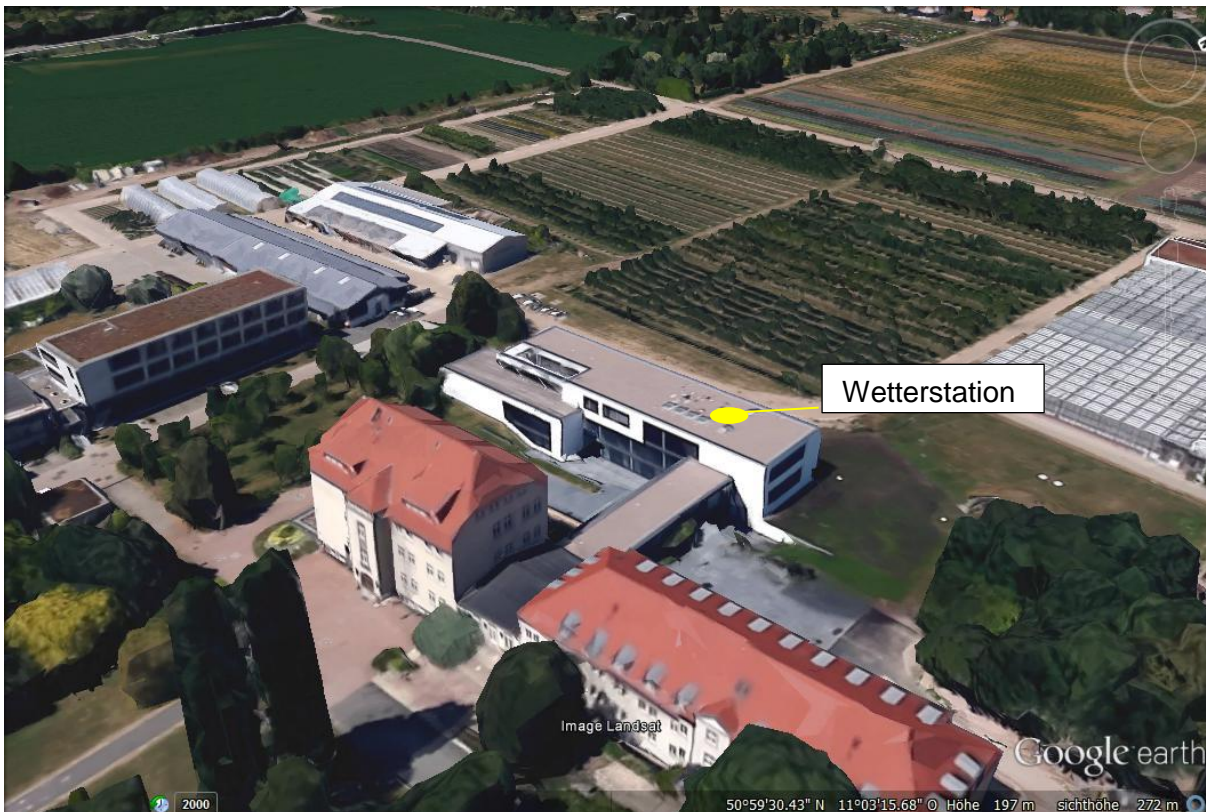


Abbildung 7-1: 3D Darstellung des Gebäudes Blickrichtung Nord-West mit Position Wetterstation auf dem Dach [60]

Die Wetterstation ist von Süd-Ost bis West in horizontaler Ebene durch Bebauung des Altbaus umgeben. In Richtung Nord-Ost bis Nord-West ist die Blickrichtung nahezu frei auf die Stadt Erfurt und in das Thüringer Becken. Die Sensoren sind an einer Mast-Konstruktion mit auskragenden Trägern montiert. Etwas abgesetzt von diesem Mast wurde auf einer Betonplatte ein Schattenring-pyranometer direkt auf der Kiesschüttung des Dachs aufgestellt. Die separate Aufstellung war notwendig um die regelmäßig nötigen Einstellungen am Schattenring vornehmen zu können. Zur Aufnahme der Messsignale und zur Versorgung mit Betriebsstrom dient ein wetterfester Schaltschrank. Über eine Dachdurchführung sind die Feldgeräte im Schrank an das Daten- und Elektroenergieversorgungsnetz des Gebäudes angeschlossen. Über Blitzableiter ist die Wetterstation in den Blitzschutz integriert. Alle außenliegenden Kabelwege sind UV-beständig ausgeführt. Nach annähernd drei Betriebsjahren sind keine Schäden an der Messtechnik bekannt geworden.

### 7.2.3 Übersicht Messgeräte

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über genutzten Messgeräten und die damit erfassten Messgrößen.

Tabelle 7-2: Übersicht der genutzten Messgerät mit Hersteller und erfasster Messgröße

Messgröße Parameter	Einheit	Messgerät
		Hersteller
Globalstrahlung horizontal	W/m <sup>2</sup>	Pyranometer Fabrikat: CMP3
		kalibriert bis Oktober 2013
		Kipp & Zonen B.V.
diffuse Solarstrahlung horizontal	W/m <sup>2</sup>	Pyranometer mit Schattenring Fabrikat CM11

		kalibriert bis März 2014
		Kipp & Zonen B.V.
Globalstrahlung vertikal Süd	W/m <sup>2</sup>	TYP?!
		Ahlborn
Globalstrahlung vertikal Nord, Süd, West, Ost	W/m <sup>2</sup>	Silizium-Solar-Einstrahlungssensor Typ: SOZ-03
		NES - Mess- und Meldesysteme
Niederschlag	ja/nein	Typ: "Niederschlag" Infrarot
		WAREMA Renkhoff SE
Außenlufttemperatur	°C	PT100 1/3 DIN
		WAREMA Renkhoff SE
Außenluftfeuchte	%	Messelement FE 09/1
		WAREMA Renkhoff SE
Beleuchtungsstärke	lx	Typ: „Photo“
		WAREMA Renkhoff SE
Windgeschwindigkeit	m/s	Messwertgeber Wind
		WAREMA Renkhoff SE
Windrichtung	°	Messwertgeber Wind, Typ 3H
		WAREMA Renkhoff SE
CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Außenluft	ppm	Typ: WRF04 CO2 / LK CO2
		Thermokon Sensortechnik GmbH



#### Messgröße Parameter

- i. Globalstrahlung horizontal
- ii. Beleuchtungsstärke
- iii. Globalstrahlung vertikal aus Nord, Süd, West, Ost (Silizium)
- iv. Globalstrahlung vertikal Süd
- v. Windgeschwindigkeit
- vi. Windrichtung
- vii. Außenlufttemperatur/ Außenluftfeuchte
- viii. Niederschlag
- ix. CO<sub>2</sub>-Konzentration
- x. Schattenring-Pyranometer

Abbildung 7-2: Wetterstation mit Beschriftung der Messgeräte





Abbildung 7-3: geöffneter Schaltschrank der Wetterstation auf dem Dach

### 7.2.4 Messgeräte, Sensoren, Wetterstation

#### 7.2.4.1 Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke wird mit einem in der Haustechnik üblichen Sensor der Firma WAREMA Renkhoff SE erfasst. Dieser entspricht damit grundsätzlich einem Industriestandard und nicht dem Standard wissenschaftlicher Messtechnik zur Erfassung der Beleuchtungsstärke. Die Beleuchtungsstärke konnte dennoch mit Einschränkungen und in einer hohen Unsicherheit erfasst werden (vgl. Abschnitt 7.2.6.6 Seite 113).

#### 7.2.4.2 Schattenringpyranometer

Der Schattenring muss exakt mit der höchsten Stelle nach Süden (höchster Sonnenstand im Tagesverlauf) ausgerichtet werden. Dafür bietet sich die Nutzung eines Kompasses an. Überraschenderweise konnte auf dem Dach des HLG, keine sichere Anwendung verschiedener Kompassse erfolgen. Die angezeigte Ausrichtung war nicht plausibel und änderte sich mit Standort auf dem Gebäude stark (360 °). Nur mittels Schnurgerüst und mehreren Messungen war eine hinreichend genaue Ausrichtung möglich. Es kann vermutet werden, dass elektromagnetische Felder aus dem Gebäude die genutzten Kompassse störte. Die Nachführung des Schattenrings erfolgte aus Praktikabilitätsgründen meist bei klarem Himmel und orientierte sich am Schattenwurf des Rings auf dem Pyranometer. Die Einstellung mit Tabellenwerte, wäre ebenso möglich.

Das Pyranometer sowie die Schattenringkonstruktion wurden im Projekt 8.Regelschule in Erfurt eingesetzt. Das Pyranometer wurde neu kalibriert. Für die Messwertumsetzung vom Messgerät auf ein Analogsignal wurde eine sogenannte Ambox, ebenfalls Kipp & Zonen beschafft.



Abbildung 7-4: Schattenring Pyranometer .

#### 7.2.4.3 CO<sub>2</sub>-Sensor

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration wird mit einem in der Haustechnik für RLT-Anlagen üblichen Sensor der Firma Thermokon gemessen. Dieser entspricht damit grundsätzlich einem Industriestandard und nicht dem Standard wissenschaftlicher Messtechnik zur Erfassung der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Alternative Messtechnik wird von Fima Thies angeboten [62].

Ziel der Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Außenluft war hauptsächlich, eine Vergleichsgröße zu den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Innenraum herzustellen. Hiermit sollte beispielsweise der Grad der Belastung der Innenraumluft mit CO<sub>2</sub> durch Gebäudenutzung oder die Effektivität der RLT-Anlage bestimmt werden. Die aufgezeichneten Messwerte sind stark fehlerhaft und konnten nicht ausgewertet werden (vgl. Abschnitt 7.2.6.5. Seite 112 ).

#### 7.2.5 Datenverarbeitung

Die Messdaten werden über das BUS-System an die Gebäudemanagementebene übergeben. Aus der Datenbank der GLT werden die Daten in eine PostgreSQL Datenbank geschrieben und mittels R weiterverarbeitet.

Für die Aufzeichnung in der GLT-Datenbank wird Value-Change und Zeitintervall abhängige Methode genutzt. Die kleinste Auflösung beträgt eine Minute. Zur Bildung äquidistanter Zeiträume zwischen den Daten werden die Messdaten zunächst auf 5-Minuten Zeitschrittweite umgewandelt. Es werden hierfür Mittelwerte der Messdaten im 5-Minuten Intervall gebildet. Bei Abständen größer als 5-Minuten zwischen den Rohdaten ergibt sich eine oder mehrere Fehlstellen in der Zeitreihe. Diese Fehlstellen werden mittels linearer Interpolation zwischen dem letzten und nächsten vorhandenen Wert ermittelt (für Details siehe Abschnitt Datenaufbereitung). Mittels Software R können die Messreihen weiter verdichtet oder statistische Kennwerte gebildet werden. Die nach folgender Tabelle gibt eine Zusammenstellung zur Aufzeichnungsmethode und zur Auflösung.

Tabelle 7-3: Methode der Datenaufzeichnung

Sensor	Change of Value Aufzeichnung bei Änderung um:	Auflösung
Außentemperatur	0,5 Kelvin	eine Nachkommastellen
Außenfeuchte	50 % bzw. 0,5 Prozentpunkte	
CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Außenluft	5 ppm	eine Nachkommastellen
Helligkeit	1000 lx	keine Nachkommastelle
Niederschlag	diskret, Niederschlag – kein Niederschlag	
Windrichtung	1°	zwei Nachkommastellen
Sensor	Aufzeichnungsintervall:	
Solarstrahlung Pyranometer Kipp & Zonen B.V.	bis zum 06.11.2013 Messwert alle fünf Minuten ab dem 07.11.2013 Messwert jede Minute	zwei Nachkommastellen
Solarstrahlung Pyranometer Ahlborn		zwei Nachkommastellen
Solarstrahlung Silizium-Sensor Nord, Süd, Ost, West		zwei Nachkommastellen
Windgeschwindigkeit		eine Nachkommastellen

### 7.2.6 Messfehler und Datenausfall

#### 7.2.6.1 Vorbemerkung

In den nachfolgenden Abschnitten sind Probleme und Herausforderungen während der Inbetriebnahme bzw. des Betriebes im Zusammenhang mit der Messung der meteorologischen Parameter beschrieben.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Wetterstation, welche im Zuge der Gebäudeerrichtung installiert wurde, nicht den Standards einer kontinuierlichen repräsentativen Messung (wie z.B. die Wetterstation des DWD, oder WMO-Standard) entsprechen kann. Die Ergebnisse sind jedoch plausibel und stimmen mit den Ergebnissen einer Wetterstation in unmittelbarer Nachbarschaft sehr gut überein.

#### 7.2.6.2 Verschattung der Einstrahlungssensoren

Durch den an der Südseite angrenzenden Altbau wird bei tiefstehender Sonne im Winter das Gebäude verschattet. Dies trifft auch für Teile der Wetterstation zu. Damit sind auch Einstrahlungsgrößen zum Teil von der Verschattung betroffen. Dies betrifft vor allen, das Schattenring-Pyranometer auf dem Dach. Die Einstrahlungssensoren an der Mastspitze bleiben davon weitgehend unbeeinflusst.





Abbildung 7-5: Wetterstation teilweise im Schatten, Aufnahme von 13.12.2013 ca. 11:00 Uhr

Mit den Messdaten der solaren Einstrahlung der benachbarten Wetterstation kann verglichen werden, ob es während der Jahreszeiten mit tiefstehender Sonne zu höheren Abweichungen kam. Es kann gezeigt werden, dass die Tagessummen der solaren Einstrahlung nicht voneinander abweichen.

### 7.2.6.3 Fehlerhafter Anschluss Pyranometer

Für die Erfassung der solaren Einstrahlung werden mittels zweier Pyranometer Fabrikat (Kipp&Zonen) die globale und die diffuse Einstrahlung genutzt. Die Messgeräte sind jeweils an einen Messwertumsetzer angeschlossen. Dort wird das Messsignal für die weitere Verarbeitung als analoges Signal bereitgestellt. Messwertumsetzer und Messgerät sind aufeinander abgestimmt. Während der Inbetriebnahme wurden unrealistische Messwerte deutlich über  $E_{\text{Glob}} > 1.100 \text{ W/m}^2$  festgestellt. Außerdem wichen die Messwerte bei nicht montiertem Schattenring, der beiden Sensoren stark voneinander ab.

Nach längerer Fehlersuche durch das Monitoring-Team wurde festgestellt, dass die den Messgeräte individuell zugeordneten Messwertumsetzer (Ampbox) vertauscht angeschlossen waren. Am 24.04.2013 wurde dieser Mangel behoben. Die bis zu diesem Zeitpunkt erfassten Messwerte mussten damit für beide Sensoren als fehlerhaft bewertet werden. Somit konnte die Globalstrahlung erst ab dem 25.04.2013 erfasst werden.

Nach Auskunft des Herstellers bzw. dessen Vertreter in Deutschland können die fehlerhaften Messwerte über die Koeffizienten der Messwertumsetzer umgerechnet werden. Jedoch war der Messbereich für die Messung auf  $1.500 \text{ W/m}^2$  begrenzt, was nach der Umrechnung dazu führt, dass nur Werte unter  $650 \text{ W/m}^2$  dargestellt werden können. Grundsätzlich wäre es möglich, die Einstrahlungswerte bis zu einer Leistung von  $650 \text{ W/m}^2$  zu berücksichtigen. Aus Gründen der Praktikabilität wurde hierauf verzichtet und alle Werte der Globalstrahlung auf die Horizontale vor dem 24.04.2014 durch die nahegelegene Wetterstation im Klimamessfeld der FH Erfurt (KMF) ersetzt (vgl. Abschnitt 10.1.3.3).

### 7.2.6.4 Solare Diffusstrahlung

Die solare Diffusstrahlung wird mittels Schattenring-Pyranometer erfasst. Der Schattenring verschattet das Pyranometer gegen die direkte Einstrahlung der Sonne. Der Schattenring wurde nach Süden ausgerichtet und muss entsprechend des Sonnenstands manuell nachgeführt werden. Diese Arbeiten konnten aus organisatorischen Gründen nicht regelmäßig durchgeführt werden.

Hauptgrund dafür war, dass die Wetterstation auf dem Dach nur über eine Leiter und mit persönlicher Absturzsicherung erreichbar ist. Daher konnte, nur speziell unterwiesene Personen das Dach betreten. Dieses Personal konnte für das Projekt nicht so eingesetzt werden, wie es notwendig gewesen wäre, um die Einstellung kontinuierlich durchzuführen (Urlaub und Elternzeit, kostenneutrale Projektverlängerung). Außerdem waren die Messwertumsetzer (siehe beschriebene Fehler im Abschnitt 7.2.6.3 Seite 111) zu Beginn des Jahres 2013 vertauscht.

Im Winter wird das Schattenringpyranometer zum Teil durch ein andere Gebäude verschattet, was evtl. einen Einfluss auf die Messung hat. Mit der Folge, dass die tatsächliche Diffusstrahlung unterschätzt wird.

Wird der Schattenring nicht nachgeführt, kommt es zu einer direkten Solareinstrahlung auf das Pyranometer. Der Messwert entspricht dann der Globalstrahlung. Die Einstellungen am Pyranometer wurden protokolliert zum anderen ein Prüfroutine entwickelt, sodass die Rohmessdaten gefiltert werden können. Durch den falschen Anschluss der Messwertumsetzer konnten erst ab dem 25.04.2013 Messdaten aufgezeichnet werden. Aus organisatorischen Gründen konnten die ersten Messungen erst zum August 2013 beginnen.

Durch Schneefall wurde das Pyranometer teilweise bedeckt. Was vermutlich nur geringen Einfluss auf die Messergebnisse hat.



Abbildung 7-6: rechts: schneebedecktes Schattenringpyranometer links: Zugang über Terrasse zur Wetterstation auf dem Dach

### 7.2.6.5 Sensor CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Außenluft

Untersuchungen während der Inbetriebnahme der Messtechnik mittels Vergleichsmessung und Bewertung des Messwertes zeigten, dass die Messergebnisse nicht plausibel waren. Neben dem CO<sub>2</sub>-Sensor der Wetterstation waren zunächst auch die Messergebnisse der CO<sub>2</sub>-Raumlufkonzentration mangelhaft. Im Rahmen des Ersatzes der Sensoren im Innenraum wurde durch das Monitoring-Team auch auf einen Ersatz des Außensensors gedrängt. Aufgrund eines

gleichen Fabrikats wie in den Innenräumen, war davon auszugehen, dass die Sensorik fehlerhaft war. Der im Leistungsverzeichnis vorgesehene und eingebaute Sensor war außerdem nur für Innenräume geeignet, insbesondere reicht der zulässige Temperaturbereich nicht unter  $\theta = 0\text{ °C}$  und die relative Luftfeuchte ist auf 85% begrenzt [63].

Das ausführende Unternehmen Gewerk GA und Messtechnik, sowie die mit der Bauherrnvertretung betrauten Stellen, wurden mehrfach aufgefordert, den Mangel zu beseitigen. Auf Drängen der Bauherrnvertretung wurde der Mangel durch das Monitoring-Team als bleibend akzeptiert.

#### 7.2.6.6 Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke ist eine dynamische Messgröße. Der Vergleich mit externer mobiler Messtechnik war im Rahmen dieses Projektes nicht möglich. Die Daten wurden auf Plausibilität anhand des möglichen Wertebereiches bewertet. Im Rahmen der Inbetriebnahme der Messtechnik wurde festgestellt, dass der Messwert im unteren Bereich plausibel ist, jedoch der Messbereich auf 65 klx begrenzt war. Der Fehler wurde behoben und der Messbereich auf bis zu 100 kx angepasst. Die Auswertung der Messergebnisse zeigen jedoch unplausible Werte. Für die Auswertungen wurde die Beleuchtungsstärke aus der globalen Solarstrahlung horizontal abgeleitet (siehe Abschnitt 10.1.2).

#### 7.2.6.7 Aufzeichnungsausfall

Durch Ausfälle in der Datenaufzeichnung konnten nicht kontinuierlich Messwerte erhoben werden. Insbesondere für die genaue Bestimmung der Summe der solaren Einstrahlung müssen daher externe Messdaten genutzt werden. Für die Globalstrahlung können Messdaten des Klimamessfeldes der FH Erfurt (KMF) genutzt werden.

### 7.3 Wärmemengenzähler

In der Verteilung wurden zwei Räume direkt mittels WMZ erfasst. Die WMZ sind dabei so kompakt, dass diese auch in einer Zwischenwand verbaut werden konnten.

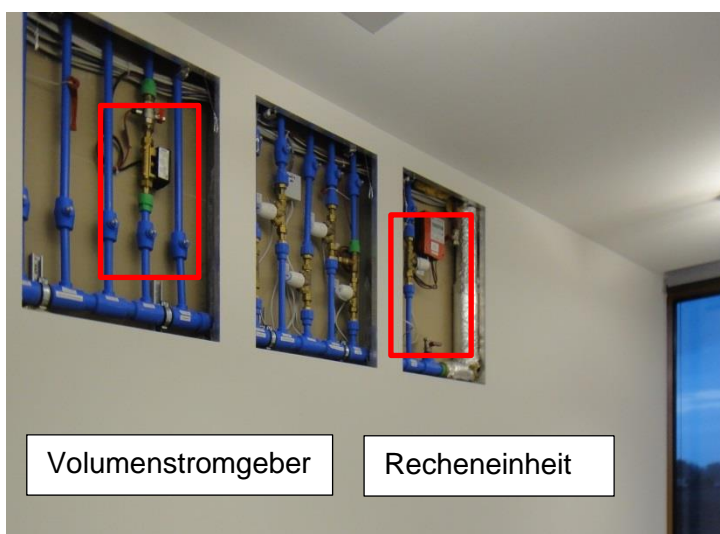


Abbildung 7-7: Blick auf die hydraulische Verteilung in einer Zwischenwand mit WMZ

## 7.4 Elektroenergiezähler

Die Elektroenergiezähler wurden durch Gewerk Gebäudeautomation in den Unterverteilungen der TGA installiert. Für den Einbau im Bereich des Gewerks Elektro wurden die Zähler dem AN-Elektro durch den AN-Gebäudeautomation beigelegt. Als Fabrikat kam ein Dreiphasiger Energie- und Leistungszähler EMU 32.x7 mit LON Schnittstelle zum Einsatz. Die Messdaten werden über LON an die Managementebene übergeben.

Die Kosten für Einbau können pro Zähler vom TYP können mit 250 € netto angenommen werden. Für die Integration der Datenpunkte in die GLT bzw. die Datenbereitstellung können rund 10 € pro Zähler veranschlagt werden. Aus den Zählern können die folgenden Messgrößen abgerufen werden.

Tabelle 7-4: Datenpunkte pro Elektroenergiezähler

Bezeichnung	Einheit	Aufzeichnungsmethode
Kommunikation	Normal	
Wirkenergie	kWh	
Wirkleistung	kW	
Spannung dreifach je ein DP pro Phase	V	COV oder (30 min)
Strom dreifach je ein DP pro Phase	A	COV oder (30 min)
cso phi dreifach je ein DP pro Phase		COV oder (30 min)

Insgesamt wurden 42 Stück verbaut. Der Einbau der Zähler wurde vollständig durch die Förderung des BMWi finanziert.



Abbildung 7-8: Eingebaute Elektroenergiezähler in einem Schaltschrank der Unterverteilung MSR

Neben den Zählern in der Unterverteilung kamen zwei Zähler für die Gebäudeeinspeisung zum Einsatz. Die Zähler sind in Reihe geschaltet und ein Zähler war zumindest für die Zwecke des Mo-



monitorings nicht notwendig. Es zeigte sich, dass die Zähler nicht identische bzw. sich gleichende Messwerte ausgaben. Auf Bitten des Monitorings-Teams wurden die Zähler überprüft. Nach Angaben des AN-Elektro konnte kein Fehler festgestellt werden. An dem offensichtlich funktionstüchtigen Zähler, wurde der aktuelle kumulierte Verbrauchsmesswert durch den kumuliertem Verbrauchsmesswert des offensichtlich fehlerhaften Zählers, durch einen händischen Eingriff des AN-Elektro ersetzt. Der Mangel wurde nicht behoben.

## 7.5 Temperatursensoren

Temperatursensoren kommen in den Hydraulikkreisen, in den Lüftungsanlagen sowie in den Räumen zum Einsatz. Durch das Monitoring wurden Temperatursensoren in der Regenwasserzisterne und für die WMZ vorgesehen. Alle übrigen Temperatursensoren dienen dem Anlagenbetrieb. Zur Sicherstellung der Messgenauigkeit wurden einzelne Sensoren mittels Vergleichsmessung überprüft. Hierzu wurde der Sensor im Wasserbad mit einer Referenzmessung verglichen. Der Messwert der GA konnte Vorort am Bildschirm der ISP abgelesen werden. Es konnten keine Differenzen festgestellt werden.



Abbildung 7-9: Referenzmessung mittels mobilen Messgerät

## 8 Energiebedarfsberechnung

### 8.1 Vorbemerkung

Für das Gebäude wurde im Rahmen der Antragsstellung des Monitoring-Projektes sowie während der Gebäudeerrichtung Energiebedarfskennwerte nach DIN V 18 599 durch Monitoring-Team berechnet. Grundlage dafür waren der Planstand Architektur und Gebäudetechnik unter Berücksichtigung der innovativen Komponenten.

Neben den hier dargestellten Berechnungen wurden im Rahmen der HU-Bau und der AFU-Bau vom Bauherrn das Ingenieurbüro Dr. Krämer mit der Erstellung des Wärmeschutznachweises beauftragt (siehe Abschnitt 4.3 Seite 30).

### 8.2 Bedarfsberechnung zur Antragsstellung

Im Rahmen der Antragsstellung zu diesem Monitoring-Projekt wurden Anforderungen an das zu untersuchenden Objekt gestellt.

Tabelle 1: Gebäudekennndaten (Stand HU-Bau):

$H_T$	0,40 W/(m <sup>2</sup> K)
$A/V_e$	0,43
$A_{NFDIN\ 277}$	1.200 m <sup>2</sup>
$A_{NGF}$	1.805 m <sup>2</sup>
$A_{BGF}$	2.240 m <sup>2</sup>
$V_{BRI}$	8.890 m <sup>3</sup>
$Q_{PE\ Bedarf}$	< 50 kWh/(m <sup>2</sup> a)

Der Primärenergiebedarf des Gebäudes im Sinne der EnEV setzt sich aus der aufzuwendenden Energie für Heizen, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung und Hilfsantriebe zusammen. Dazu stellt die DIN V 18599 einen Fundus an verschiedenen Anlagenkonfigurationen zur Verfügung. Jedoch sind eine durch Fernwärme angetriebene Adsorptionswärmepumpe sowie eine direkte Kühlung mittels Umweltenergien nicht darstellbar.

Aus diesem Grund wurde zur Ausweisung eines Primärenergiebedarfes im Berechnungsgang für den Heizenergiebedarf als Erzeuger eine direkte Beheizung mittels Fernwärme angenommen. Die Ergebnisse dieser Konfiguration waren Ausgangspunkt für ingenieurmäßige Weiterberechnung zur Darstellung der tatsächlichen Anlagenkonfiguration.

Mit einem unterstellten Deckungsgrad von 0,9 und einer Jahresarbeitszahl von 1,5 der Wärmepumpe konnte der Primärenergiebedarf für Heizen um bis zu 30 % gesenkt werden (vgl. Tabelle 8-1). Zur Ermittlung des Primärenergiebedarfs für die Kühlung mittels Brunnen und Zisterne wurde von einer Jahresarbeitszahl von  $JAZ = 8$  bis 10 [64] ausgegangen und mit dem Nutzenergiebedarf Kühlen zur Berechnung des Primärenergiebedarfs Kühlen in Ansatz gebracht (vgl. Tabelle 8-1).

Tabelle 8-1: Energetische Kennwerte nach DIN V 18599 berechnet mit EPASS HELENA® Version: 5.0.0.103, Stand Antragsstellung 19.08.2009

	Bezeichnung	Berechnungen mit freier Eingabe der Randbedingungen	Randbedingungen nach EnEV	
		kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	% vom Referenzsollwert
berechnet mit EPASS HELENA®	Nutzenergiebedarf Heizen	30,4	45,1	50%
	Nutzenergiebedarf Kühlen	6,0	8,5	
	Endenergiebedarf Heizen	32,7	48,8	
	Primärenergiebedarf Heizen	16,6	24,7	
	Primärenergiebedarf Lüftung	18,7	25,2	
	Primärenergiebedarf Beleuchtung	8,8	12,9	
	Primärenergiebedarf gesamt	44,2	63,2	39%
Ingenieurmäßige Berechnung	Primärenergiebedarf Kühlen mit $JAZ_{\text{Kühlen}}=10$	0,6	0,9	
	Primärenergiebedarf gesamt mit Absorptionswärmepumpe $JAZ_{WP}=1,5$ , Deckungsgrad= 0,9	39,1	55,4	34%
	Primärenergiebedarf gesamt mit Absorptionswärmepumpe inklusive Kühlung	39,7	56,25	35%

Nach Berücksichtigung der Adsorptionswärmepumpe sowie der Kühlung mittels Brunnen wurde der Primärenergiebedarf im Rahmen der DIN V 18 599 zum Zeitpunkt der Antragstellung zunächst mit  $Q_{PE} = 39,7 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  angenommen.



## 9 Gebäudesimulation

### 9.1 Gebäudeentwurf mit TAS

Im Jahr 2008 wurde im Simulationsprogramm Thermal Analysis Software Version 9.0.9e (TAS) [65] ein detailliertes Gebäudemodell erstellt.

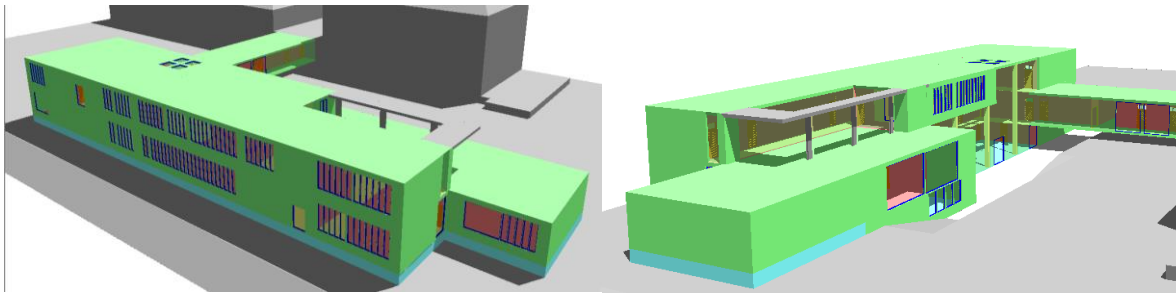


Abbildung 9-1: Visualisierung des Gebäudemodelles in TAS aus [66]

Mit dem Simulationsmodell wurden verschiedene Untersuchungen zum Heiz- und Kühlenergiebedarf durchgeführt. Die Förderrichtlinie gab Zielwerte für Gesamt-Primärenergiebedarf und Heiz-Nutzenergiebedarf des Gebäudes vor. Zur Bestimmung dieser Kennwerte stehen prinzipiell verschiedene Berechnungsmethoden zur Verfügung. Zur Erreichung des Zielwertes für den Nutzenergiebedarf Heizen wurden mittels des Gebäudemodells die U-Werte der verschiedenen Bauteile in Abstimmung mit dem Fachplaner Bauphysik iterativ optimiert.

Mit den Nutzungsprofilen der damals gültigen DIN V 18599-10:2007-2 [5], hinsichtlich interner Wärmequellen und Solltemperatur aber unter Annahme des Wetterdatensatzes für Erfurt [67], und nicht Würzburg, wurde der Nutzenergiebedarf für die Beheizung auf weniger als

$q_{h,b} = 24 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  reduziert. Werden Nutzungs- und Anwesenheitsprofile einer typischen Hochschulnutzung angenommen kann der Bedarfswert weiter gesenkt werden.

Dieser niedrige Heizenergiebedarf ist neben den Transmissionswärmeverlusten von der Güte der Wärmerückgewinnung sowie den Betriebszeiten der Lüftungsanlage abhängig. Die Rückwärmezahl der WRG für die RLT wurde für die Berechnungen mit 0,7 angenommen.

Anzumerken ist, dass die Raumtemperaturen in den Nebenräumen auf  $15^\circ\text{C}$  begrenzt wurden und als Energiebezugsfläche die aktiv beheizte Fläche exklusive der nicht beheizten Räume angesetzt wurde. Damit wurde in der Simulationsstudie als Energiebezugsfläche  $A = 1.544 \text{ m}^2$  angenommen. Die Energiebezugsfläche innerhalb der thermischen Hülle wurde damit im Vergleich zur Definition der EnEV, um ca.  $300 \text{ m}^2$  unterschätzt. Wird eine Energiebezugsfläche von  $A = 1.844 \text{ m}^2$  unterstellt ergibt sich ein niedrigerer Bedarf von  $q_{h,b} = 20 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ .

### 9.2 Simulation mit DesignBuilder

Auf Basis der AFU-Planung wurde im Rahmen einer Studienarbeit [68] ein detailliertes Simulationsmodell mit dem Programm DesignBuilder [69] für die Simulation mit EnergyPlus [70] erstellt. Das Modell wurde organisatorisch unabhängig von der Modellerstellung im Programm TAS erstellt. Außerdem wurde gegenüber der Modellierung in TAS die aktualisierte Planung berücksichtigt. Die Nutzungsparameter wurden für eine typische Hochschulnutzung angenommen. Die Eingangsdaten für das Wetter sind identisch.

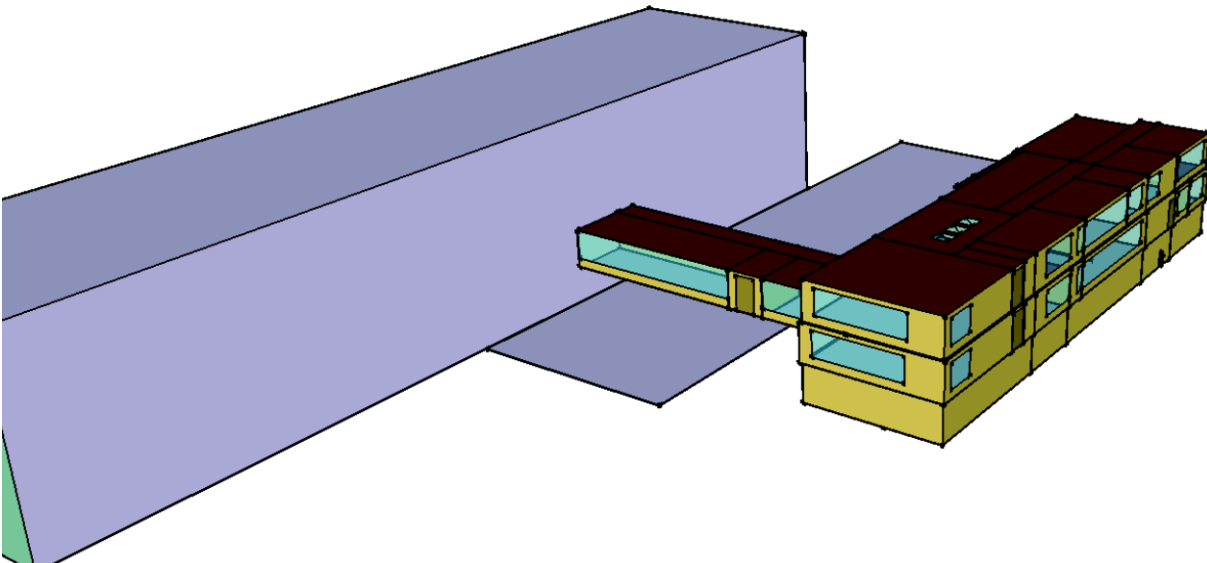


Abbildung 9-2: EnergyPlus Modell \*.idf Visualisierung mit OpenStudio [71] für SketchUp [72].

Im Ergebnis zur freischwingenden Raumtemperatur wird deutlich, dass für die Unterrichtsräume eine aktive Kühlung vorzusehen ist.

Es wurden Heiz- und Kühlenergiebedarf sowie Leistungswerte für die Nutzenergie bestimmt.

### 9.3 Unsicherheiten in der thermischen Gebäudesimulation

Die Annahmen für die Erstellung von Simulationsmodellen sind mit Unsicherheiten verbunden. Der Ersteller eines Modells kann sich der tatsächlichen Ausprägung eines Parameters nicht sicher sein. Es müssen demnach Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen bzw. Schätzungen werden im Rahmen der möglichen Parameterräume (übliche Spannweite eines Parameters) gemacht. Als grundlegende bzw. weiterführenden Arbeiten zu diesem Themenkomplex sind beispielsweise [49] [73] [74] zu nennen. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Masterarbeit [75] betreut, welche sich mit der Thematik der Unsicherheitsbewertung von thermischen Gebäudesimulationen am Beispiel dieses Gebäudes auseinandersetzt. Die Arbeit kann über enob.info bezogen werden. Ziel der Arbeit war es, bekannte Methoden zur Unsicherheitsbewertung auf das konkrete Gebäude anzuwenden und einen Arbeitsablauf für in den genutzten Programmen DesignBuilder, EnergyPlus und R-Project zu entwickeln. Es sollte bestimmt werden, wie groß die Unsicherheit in der Simulation ist und welchen Parametern hierfür besondere Bedeutung zukommt. Die Untersuchung bezog sich auf den Nutzenergiebedarf für Heizen- und Kühlen. Die Modellierung und Untersuchung der Anlagentechnik war nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Im Ergebnis kommt die Arbeit zu dem Schluss, dass der zu erwartende Heizenergiebedarf bei  $24 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  und der Kühlenergiebedarf bei  $13 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  liegen. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Heizenergiebedarf durch Unsicherheiten der Eingangsparameter mit 80-prozentiger Wahrscheinlichkeit zwischen  $28$  und  $22 \text{ kWh/(m}^2 \text{ a)}$  und der Kühlenergiebedarf mit 80-prozentiger Wahrscheinlichkeit zwischen  $15$  und  $11 \text{ kWh/(m}^2 \text{ a)}$  liegt und dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Heiz- und Kühlenergiebedarf auf  $1 \text{ kWh/(m}^2 \text{ a)}$  genau dem Erwartungswert entsprechen, lediglich ca. 12 bzw. 16 Prozent beträgt.

Dies verdeutlicht die Grenzen der Aussagefähigkeit des Einsatzes von Gebäudesimulationen. Außerdem macht es die Notwendigkeit der Angabe von Unsicherheiten deutlich. Aus 152 unsicheren

Parametern des Gebäudes (Wetterdaten wurde nicht berücksichtigt) wurden 15 identifiziert die einen bedeutsamen Einfluss auf die Unsicherheit des Energiebedarfs haben. Die nachfolgenden Abbildungen von Feige zeigen die Verteilung der Simulationsergebnisse in einem Histogramm und verdeutlichen hiermit Ziel und Ergebnisse der Arbeit.

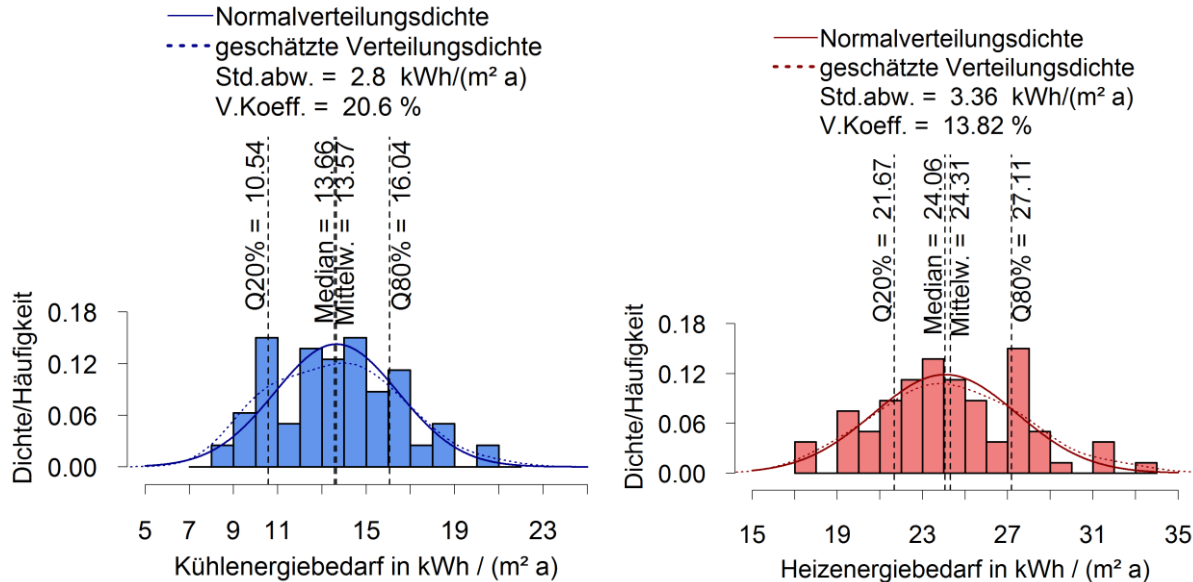


Abbildung 9-3: Histogramm des Energiebedarfs bei unsicheren Eingangsparameter in das Gebäudemodell [75].

Aus den gemachten Aussagen, lassen sich auch Rückschlüsse auf die anzunehmende Unsicherheit im Verbrauch des Gebäudes ziehen.

## 9.4 Wetterdaten für die Gebäudesimulation

Um den Energieverbrauch mit den Simulationsmodellen vergleichen zu können müssen die gemessenen Wetterdaten so aufbereitet werden, dass diese durch das Simulationsprogramm interpretiert werden können. Die Input-Wetterdaten für die Simulation liegen in den meisten Fällen als einfache Daten in ASCII-Code mit 8760 Zeilen vor. Die spezielle Dateistruktur ist dabei von Simulationsprogramm zu Simulationsprogramm unterschiedlich. Die Struktur der repräsentativen Wetterdaten TRY liegen nicht im benötigten Format vor.

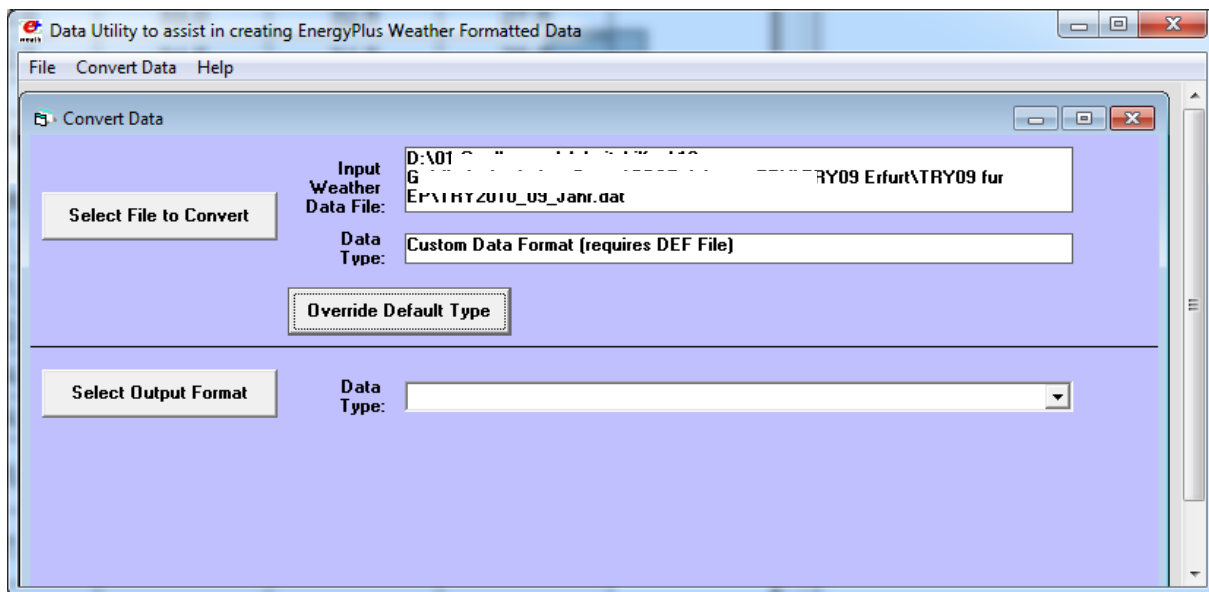
Auch die benötigten Einträge/Inhalt sind meist verschieden. Zum Beispiel benötigen einige Programme die Globalstrahlung auf die horizontale, andere wiederum z.B. EnergyPlus die direkte Einstrahlung, sodass einfaches Formtieren der Ausgangsdatei (Messdaten oder TRY) nicht ausreichend ist. Für die Aufbereitung der Wetterdaten steht in EnergyPlus das Programm WeatherConverter zur Verfügung.

Dieses Programm ist in der Installation von EnergyPlus als auxiliary program im Bereich „Pre-Process“ enthalten. Es erzeugt aus einem gegebenen Wetterdatensatz einen Wetterdatensatz für die Simulation in EnergyPlus. Für Standard Daten-Strukturen anderer Simulationsprogramme (z.B. ESP-r) kann dieser Umwandlungsprozess weitgehend automatisch erfolgen.

Liegt die Datei nicht in einem Standardformat vor, muss mit Hilfe eine Spezifikationsdatei \*.def, die Struktur der Eingangsdatei beschrieben werden.

Die Erzeugung eines Weatherfiles (Wetterdaten) für die Nutzung in der Simulation erfolgt nach den folgenden Ablauf.

- i. Aufzeichnen von Wetterdaten
- ii. Export der Daten in eine ASCII-Datei z.B. \*.csv aus Excel oder R
- iii. Erstellen der Strukturbeschreibung „\*.def-Datei“
- iv. Ausführen des Weatherconvertor
- v. Einlesen der Datei für die Simulation



Um aus den von [57] veröffentlichten TRY-Wetterdaten einen Wetterdatensatz für EnergyPlus zu erstellen, kann der Weather Convertor mit der Wetterdaten und der folgenden Definitionsdatei genutzt werden (vgl. Code 9-1 Seite 121). Wichtig ist, dass die Wetterdatei und die Definitionsdatei denselben Dateinamen vor dem Dateisuffix tragen. Neben der Wetterdatei wird automatisch auch eine umfangreiche Statistik der Wetterdaten erzeugt.

Code 9-1: Definition \*.def für Umwandlung TRJ-Daten aus [57] in eine EnergyPlus Weatherfile (\*.epw)

```
&location
City='TRY09 ERFURT'
StateProv='TRY09'
Country='DEU'
InWMO=095540
InLat=50.991
InLong=11.044
InElev=200
InTime=1
/
```

```
&wthdata
NumInHour=1
InputFileType='CUSTOM'
InFormat='DELIMITED'
TimeHourOffset=0.0
DataEle-
ments=Ignore,Ignore,month,day,hour,Ignore,winddir,windspd,drybul
b,atmos_pressure,humratio,relhum,Ignore,dirhorrad,difhorzrad,Ign
ore,horzirsky,Ignore,Ignore
DataConversionFactors=1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,100,1,1,1,1,1
DelimiterChar='      '
/
&datacontrol
NumRecordsToSkip=38
MaxNumRecordsToRead=8760
MissingDataAction=DEFAULT
```

### 9.5 Tageslichtangebot

Über den Tageslichtkoeffizienten kann die Versorgung des Raumes mit Tageslicht beschrieben werden. Der Tageslichtkoeffizient kann mittels Messung oder simulationsbasiert ermittelt werden. Für die Simulation wurde ein vollständiges und detailliertes geometrisches Modell des Gebäudes erstellt. Insgesamt besteht das Gebäudemodell aus 28 Zonen. Einzelne geometrische Zonen sind als Zonen zusammengefasst (Foyer, Treppenhaus).

Die Zonen repräsentieren entweder einzelnen Räume oder mehrerer Räume mit vergleichbaren Randbedingungen und Konstruktionen. Für die Simulationsstudie wurden Berechnungen für alle Raumzonen durchgeführt. Die graphische Auswertung zeigt die Zonen mit dem Verlauf des Tageslichtquotienten und der Beleuchtungsstärke.

Aufgrund der kontinuierlichen Fortschreibung während der Planung, der Berücksichtigung der akustischen Maßnahmen sowie Vereinfachungen der Geometrie weichen die Netto-Fläche der Modelle zum Teil geringfügig vom tatsächlichen ab. Die Simulationen wurden für gleichmäßig bedeckten Himmel durchgeführt. Das Simulationsprogramm nutzt die englische Bezeichnung des Tageslichtquotienten: daylight factor (DF). Die Definition ist identisch zum Tageslichtquotienten.

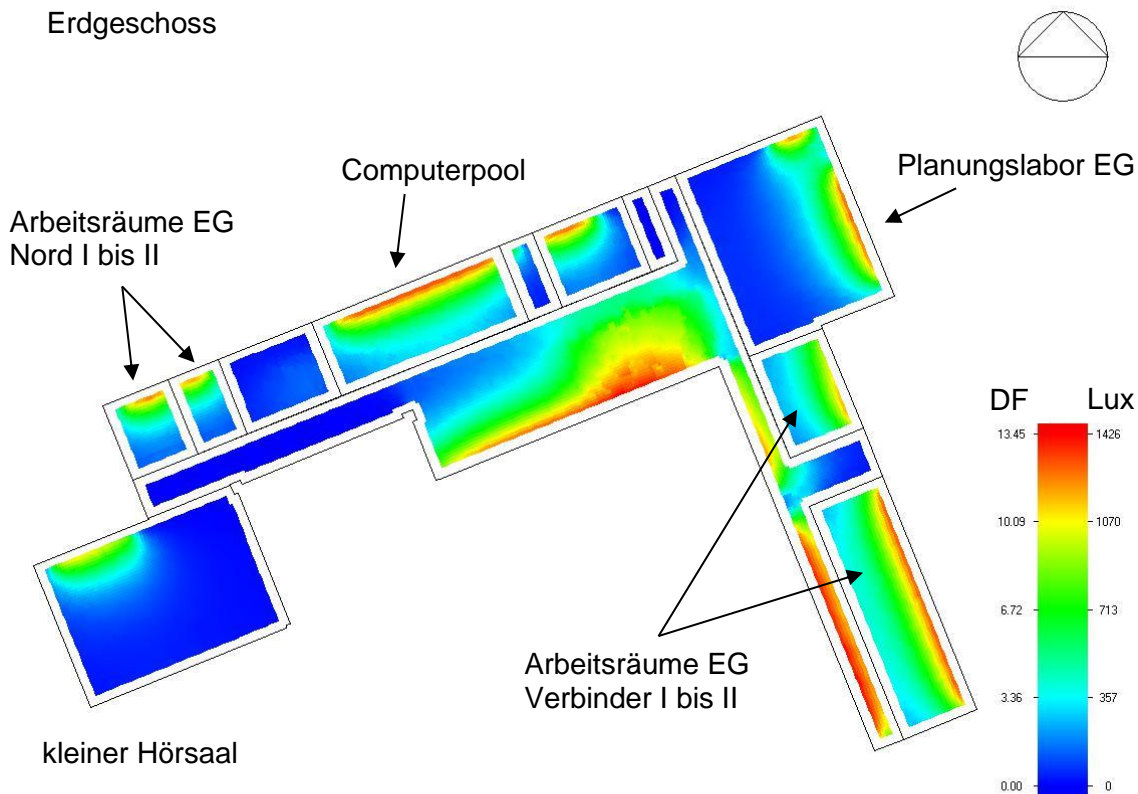


Abbildung 9-4: EG Tageslichtquotient und Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel (hier ohne „großer Hörsaal“)

Die Tageslichtversorgung der Räume im Erdgeschoss ist differenziert zu bewerten. Die Räume „Planungslabor EG“ und kleiner Hörsaal weisen aufgrund der Raumtiefen eine vergleichsweise geringe Tageslichtversorgung in den weiter vom Fenster entfernten Bereichen auf. Im „Planungslabor EG“ werden für 41 % der Bezugsfläche Tageslichtquotienten über dem Grenzwert erreicht. Im Raum „kleiner Hörsaal“ werden auf 17 % der Fläche höhere Tageslichtquotienten 2 % erreicht.

Obergeschoss

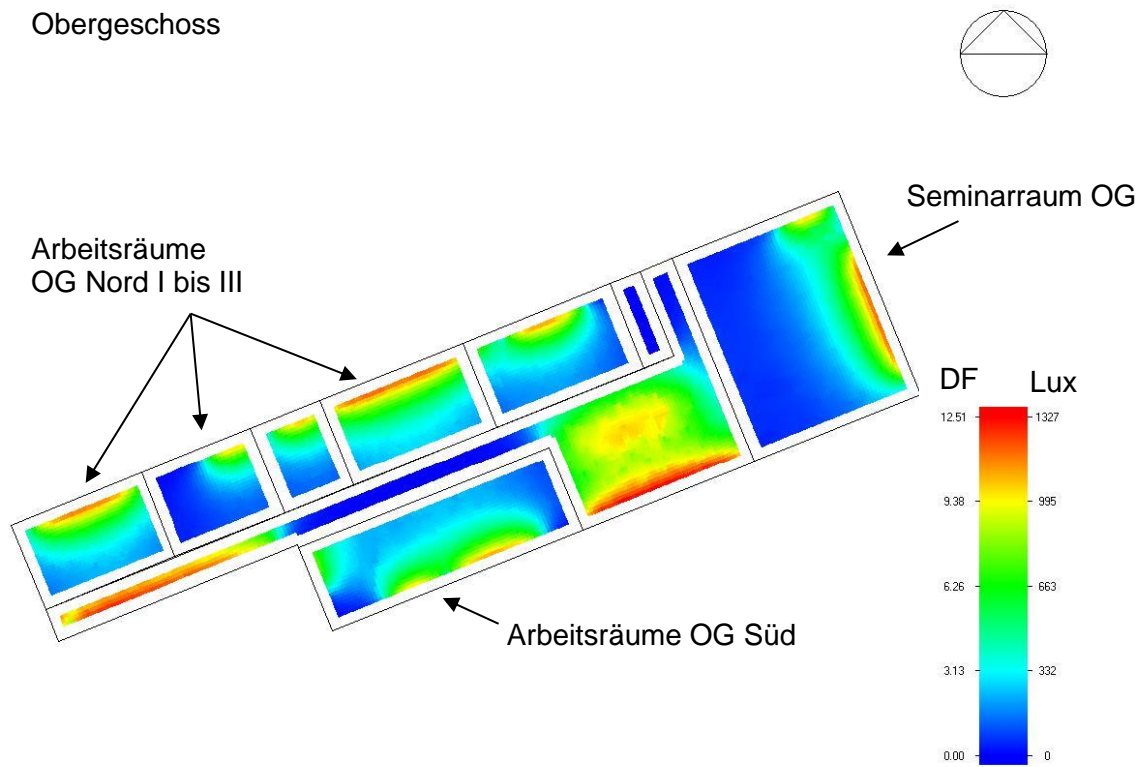


Abbildung 9-5: OG Tageslichtquotient und Beleuchtungsstärke im Raum bei bedecktem Himmel

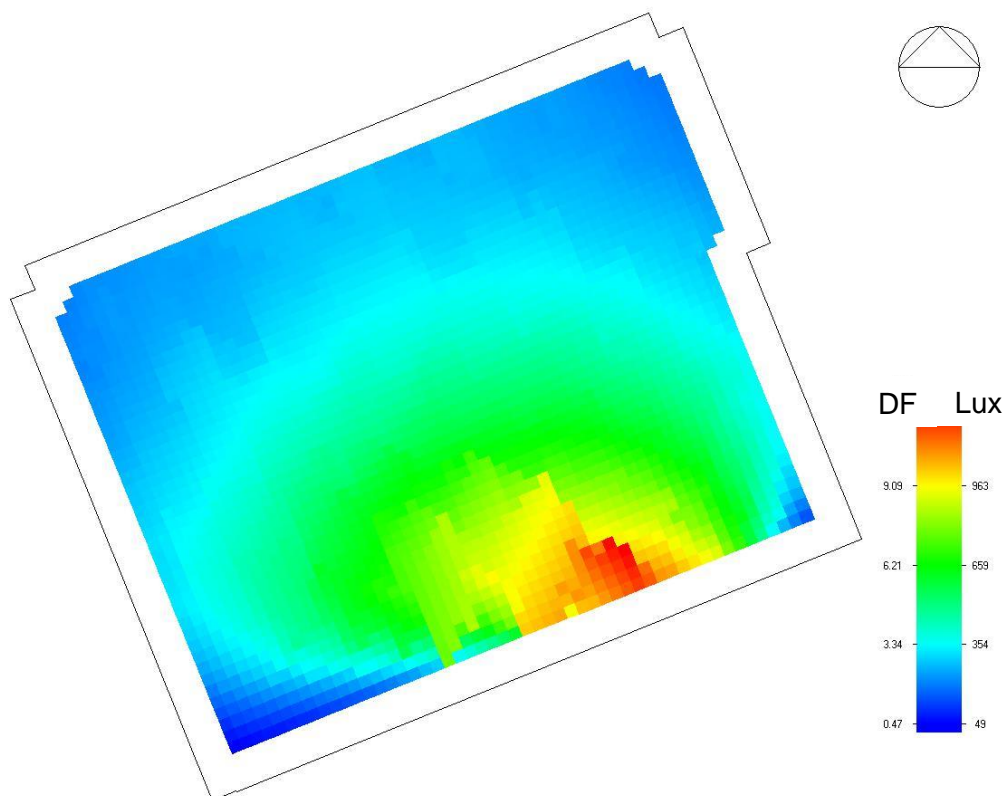


Abbildung 9-6: Großer Hörsaal Tageslichtquotient und Beleuchtungsstärke im Raum bei bedecktem Himmel



Für den „großen Hörsaal“ wurde eine Bezugsfläche 0,8 m über dem Sockelbereich auf Höhe des Untergeschoss gewählt. Die abgetreppten Sitzreihen konnten nicht berücksichtigt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass es aus dieser Vereinfachung in der Berechnung zu niedrigeren Tageslichtquotient als in der Realität kommt. Die Tageslichtversorgung wird damit unterschätzt. Die Berechnungsergebnisse weisen jedoch für große Teile des Hörsaals Tageslichtquotienten größer als 2 % aus. Es kann demnach von einer ausreichenden Tageslichtversorgung ausgegangen werden. Die nachfolgende Tabelle gibt die Ergebnisse für alle untersuchten Räumen wieder. Neben den durchschnittlichen Tageslichtquotienten der Räume werden auch die Flächen angegeben, die in der jeweiligen Zone über dem Zielwert von 2 % liegen.

Tabelle 9-1: Zusammenstellung der Tageslichtquotienten nach Raumzonen

Zonenbezeichnung	Fläche m <sup>2</sup>	Fläche über Grenzwert (Tageslichtquotienten > 2 %)		Durchschnittlicher Tageslichtquotienten (%)
		in m <sup>2</sup>	in %	
Arbeitsräume EG Verbinder I	56,24	56,24	100	6,47
Arbeitsräume EG Verbinder II	22,04	22	99,82	5
Planungslabore EG	99,36	41,28	41,55	2,67
kleiner Hörsaal	108,24	17,36	16,04	1,15
Computerpool	46,4	45,48	98,02	5,51
1.E.04 Arbeitsraum	8,8	5,64	64,09	3,81
1.E.03 Arbeitsraum	12,8	8,88	69,38	4,04
Planungslabor	92,88	38,6	41,56	2,58
Arbeitsräume OG Süd	51,68	41,8	80,88	3,5
Arbeitsräume OG Nord I	25,08	23,04	91,87	4,4
Arbeitsräume OG Nord II	10,64	6,64	62,41	3,4
Arbeitsräume OG Nord III	27,36	27,36	100	5,16
Hörsaal	86,36	83,6	96,8	4,26
Summen	700	451,24		3,7

## 9.6 Strömungssimulation – CFD

Die Entwicklung der rechnergestützten Simulationswerkzeuge hat in Bezug auf die Leistungsfähigkeit und die Bedienungsfreundlichkeit rasante Vorschritte erzielt.

Im Rahmen dieses Projektes war es zunächst angedacht, den Computational Fluid Dynamics (CFD) Programmzusatz des Softwarepaketes DesignBuilder zur Strömungssimulation hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten für den Planungsprozess in der Gebäudetechnik zu demonstrieren und zu bewerten. Es war geplant, Simulationsstudien mit Messergebnissen aus dem Gebäudebetrieb abzugleichen. Hierzu wurde eine Masterarbeit zur Themenstellung betreut [45]. Da das Gebäude zum Zeitpunkt der Bearbeitung dieser Masterarbeit widererwartend noch nicht fertiggestellt war, mussten vergleichende Messungen an einem anderen Gebäude (Turnhalle) durchgeführt werden. Die dort festgestellten Messergebnisse der physikalischen Parameter zeigten eine sehr hohe Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen. Konkrete Problemstellungen der Luftfüh-

rung im Raum konnten analysiert werden. Auch der Vergleich mit Messergebnissen aus der Klimakammer der FH-Erfurt, zeigt für ausgewählte Luftauslässe sehr gute Übereinstimmung. Für das „Hörsaal- und Laborgebäude“ wurde für Räume mit Zu- und Abluftversorgung CFD-Simulationen für unterschiedliche Betriebssituationen, wie Heiz- und Kühlbetrieb, durchgeführt und hiermit die zu erwartenden thermische Behaglichkeit der Nutzer bewertet. Dazu konnte auf das Gebäudemodell von [68] aus der thermischen Gebäudesimulation zurückgegriffen werden, was eine zeitökonomische Bearbeitung ermöglichte. In den nachfolgenden Abbildungen sind vier exemplarische Ergebnisse für den Raum „kleiner Hörsaal“ dargestellt. Durch die hohe räumliche Auflösung der Ergebnisse können etwaige örtlich begrenzte Phänomene erkannt werden. Dies ist im Gegensatz zur thermischen Raumsimulation, deren Ergebnisse zumeist auf einen mittleren Raumzustand (Zonen) abstellen, von großem Vorteil.

Mit der Größe „Alter der Luft“ bzw. der im Englischen üblichen Bezeichnung „Age of Air“ kann die Wirksamkeit der Raumdurchströmung bewertet werden. In der nachfolgenden Darstellung der Quelleluftströmung im Raum „kleinen Hörsaal“ im Heizfall zeigt sich, dass die Luft vom Zuluftauslass bis zum Abluftdurchlass ca. 7 min im Raum ist. Es ist in der Abbildung zu erkennen, dass die Luft im Deckenbereich „jünger“ also schneller als im Bodenbereich ist. Es ist auch am Abluftdurchlass mit hoher Luftqualität zurechnen.

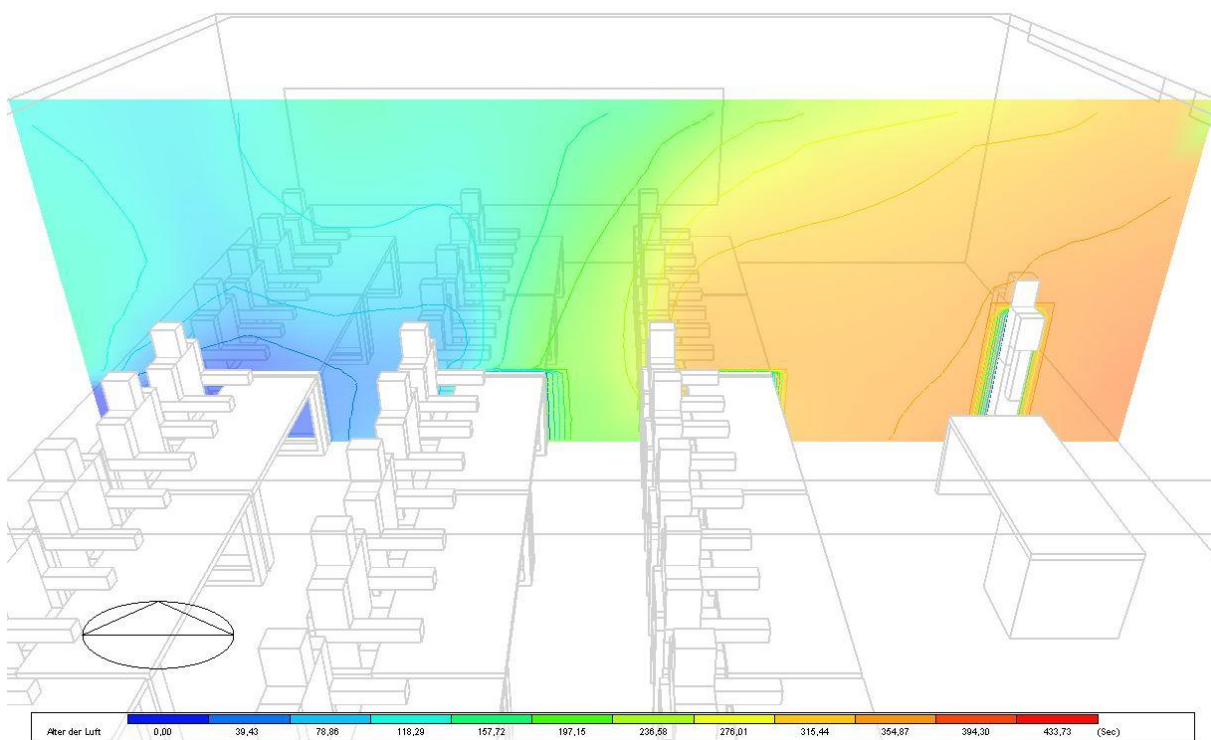


Abbildung 9-7: Exemplarische Ergebnisse „Alter der Luft (Age of Air)“ aus CFD-Simulation für den Heizfall aus [45]

Die Visualisierung des Geschwindigkeitsvektors zeigt zum einen die Strömungsrichtung und Intensität im Raum auf. Am Auslass werden für Quellluftauslass typische Geschwindigkeiten von 0,2 m/s erreicht. Durch die Bestuhlung und die Personen im Raum wird die gleichmäßige Durchströmung „aufgebrochen“ und in Richtung Decke umgelenkt.

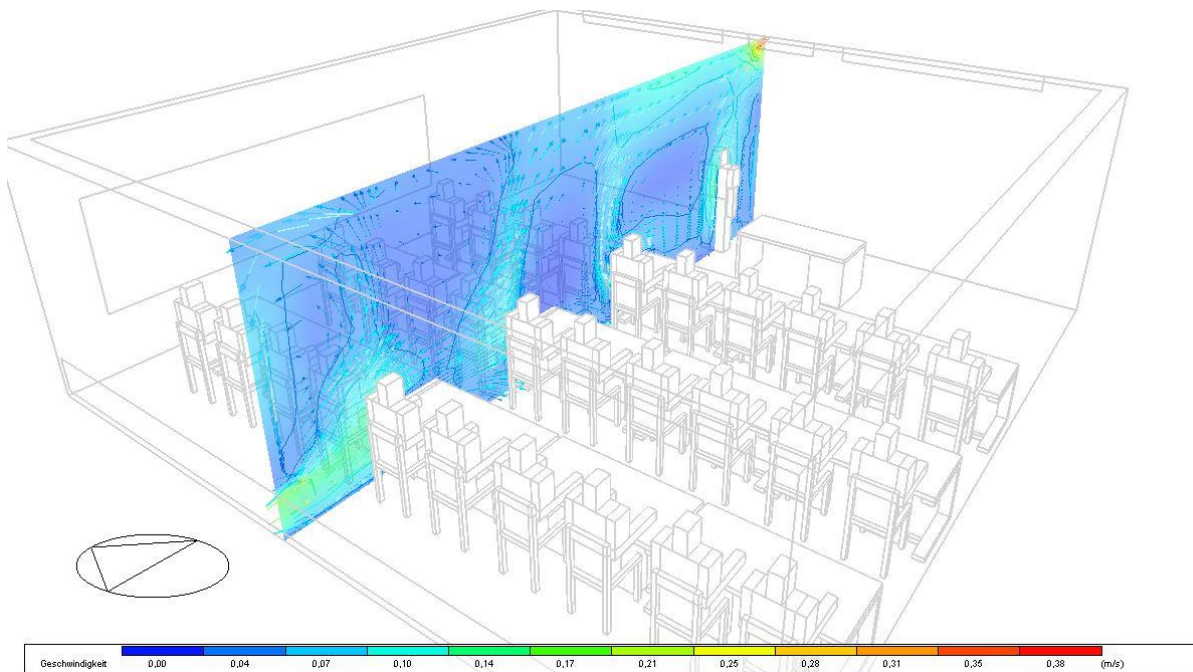


Abbildung 9-8: Exemplarische Ergebnisse zur Luftgeschwindigkeit aus CFD-Simulation für den Heizfall aus [45]

Mit dem predicted mean vote (PMV) nach Fanger kann eine Aussage zur erwartenden thermischen Behaglichkeit gemacht werden. In diesen Bewertungsmaßstab gehen die physikalischen Parameter, Luftgeschwindigkeit, Raumluft- und Strahlungstemperatur, sowie der gewählten Bekleidung und Aktivität der Nutzer ein. Im Bereich des Quellluftauslass beträgt das PMV -1,2, was einen Anteil von unzufriedenen von 20 % erwarten lässt. Als Konsequenz aus diesem Ergebnis sollte auf eine adäquate Zulufttemperatur Betrieb geachtet werden.

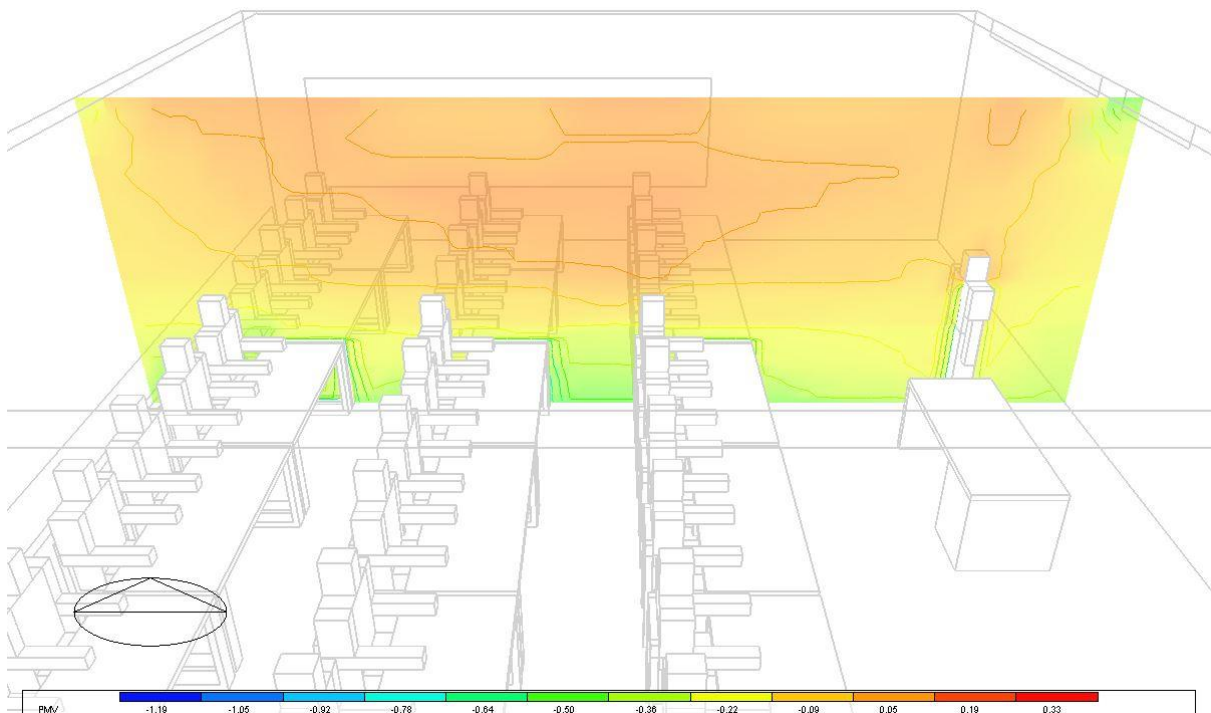


Abbildung 9-9: Exemplarische Ergebnisse PMV der CFD-Simulation für Heizfall aus [45]

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass die vorgesehen Betriebszustände in den untersuchten Räumen ein hohes Niveau der thermischen Behaglichkeit erwarten lassen. Lediglich im Raum

„kleiner Hörsaal“ kann es für den Heizfall in der Nähe des Quellluftauslasses im Fußbereich zu Behaglichkeitsstörungen kommen, wenn die Zulufttemperatur zu niedrig gewählt ist. Die Durchführung der Simulationsstudien konnte mit vergleichsweise geringen Kenntnissen in CFD-Simulation und thermischer Gebäudesimulation schnell durchgeführt werden. Vergleichende Messungen in einer Strömungskammer der FH-Erfurt und in anderen Gebäuden bestätigen die Simulationsergebnisse des Programms.

## 10 Ergebnisse im Detail

### 10.1 Kennwerte der Witterung

#### 10.1.1.1 Außentemperatur

##### 10.1.1.1.1 Winter

Die niedrigste Außentemperatur  $\theta_{e,min}$  -13,9 °C wurde am 15.01.2013 um 7:25 Uhr gemessen. Die niedrigste Tagesmitteltemperatur betrug am 15.01.2013  $\theta_{e,min,day}$  -8 °C. Die niedrigste Zwei-Tagesmitteltemperatur betrug zwischen den Tagen 25.01 und 26.01.2014 -7 °C.

Tabelle 10-1: Außentemperatur Temperatur Kennwerte im Messzeitraum ab: 01.01.2013

	$\theta_{e,min}$		$\theta_{e,min,hour}$		$\theta_{e,min,day}$		$\theta_{e,min,48h}$	
	in °C	Zeitpunkt	in °C	Datum Uhrzeit	in °C	Datum	in °C	Datum
2013	-13,9	15.01. 07:25	-13,6	15.01 7:00	-8	15.01.	-6,5	22/23.01
2014	-8,62	26.01. 10:49	-8,5	26.01 7:00	-7,3	26.01	-6,5	25/26.01
2015	-5,22	15.02. 07:27	-5,1	15.02 7:00	-2,8	06.02	-2,7	5/6.02

Tabelle 10-2: Außentemperatur Extremwerte des Winter

		2013	2014	2015 bis März
$\theta_{e,min}$	in °C	-13,9	-8,62	-5,2
	Zeitpunkt	15.01. 07:25	26.01. 10:49	15.02. 07:27
$\theta_{e,min,hour}$	in °C	-13,6	-8,5	-5,1
	Zeitraum	15.01 7:00 bis 8:00	26.01 7:00 bis 8:00	15.02 7:00 bis 8:00
$\theta_{e,min,day}$	in °C	-8,0	-7,3	-2,8
	Zeitraum	15.01.	26.01	06.02
$\theta_{e,min,48h}$	in °C	-6,5	-7,0	-2,7
	Zeitraum	22. und 23.01	25. und 26.01	5. und 6.02.

Die Norm-Außentemperatur bzw. die Bemessungstemperatur der Außenluft im Winter ist definiert durch die tiefste Temperatur eines Zwei-Tagesmittel, das mindestens 10-mal in 20 Jahren gemessen wurde und beträgt für Erfurt  $\theta_e = -14$  °C [38]. Der Vergleich mit den Werten  $\theta_{e,min,48h}$  der Tabelle 10-2 zeigt, dass diese nicht erreicht wurden. Wird die Norm-Außentemperatur als Indikator für die Belastung des Heizungssystems angesehen, so wurde das Heizungssystem nicht bis an die Grenze belastet. Der maximale Belastungsgrad berechnet aus der Außentemperatur betrug nach Gl. 4  $\varphi_{HS} = 0,79$ .

$$\varphi_{HS} = \frac{\theta_i - \theta_{e,min,48h}}{\theta_i - \theta_e} = \frac{\dot{Q}_{akt}}{\dot{Q}_{Norm}} \quad \text{Gl. 4}$$

mit:

$\theta_i$  Norm-Innentemperatur vereinfacht  $\theta_i = 20$  °C  
 $\theta_{e,min,48h}$  gemessene Temperatur analog Norm-Heizlast  
 $\theta_e$  Norm-Außentemperatur für Norm-Heizlast

### 10.1.1.1.2 Sommer

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht zu maximalen Außenlufttemperatur während des Monitorings. Der höchste gemessenen Momentanwert der Außentemperatur betrug am 27.07.2013  $\theta_{e,max} = 37^\circ\text{C}$ . Wird die Messwertreihe aufbereitet und das Stundenmittel der Temperatur  $\theta_{e,max,hour}$  gewählt, beträgt die maximale Temperatur  $36,62^\circ\text{C}$ . Der höchste gemessene Tagesmittelwert der Temperatur  $\theta_{e,max,day}$  betrug in beiden Jahren in etwa  $27,5^\circ\text{C}$ . Ähnlich hohe Temperaturen konnten auch für das 48-Stundenmittel gemessen werden.

Tabelle 10-3: Extremwerte der Außenlufttemperatur im Sommer 2013 und 2014

		2013	2014	2015 bis März
$\theta_{e,max}$	in $^\circ\text{C}$	37,38	36,08	24,07
	Zeitpunkt	27.07. 18:00	20.07 14:05	15.04 14:00
$\theta_{e,max,hour}$	in $^\circ\text{C}$	36,62	35,41	24,05
	Zeitraum	27.07 17:00	20.7 14:00	15.04. 16:00
$\theta_{e,max,day}$	in $^\circ\text{C}$	27,78	27,18	18,44
	Zeitraum	02.08	20.7	15.04.
$\theta_{e,max,48h}$	in $^\circ\text{C}$	27,27	26,98	16,07
	Zeitraum	27.7	19.7	15.04
Sommertage $\theta_{e,max} \geq 25^\circ\text{C}$	n/a	48	54	
heißer Tag $\theta_{e,max} \geq 30^\circ\text{C}$	n/a	20	14	

Am 05.07.2014 und am 28.07.2014 fiel der Momentanwert der Außenlufttemperatur nicht unter  $\theta_e \geq 20^\circ\text{C}$ . Damit wurden in 2014 zwei sogenannte Tropennächte festgestellt. Im Jahr 2013 wurden 54 Sommertage, mit einer Temperatur über  $25^\circ\text{C}$  registriert. Der Sommer 2013 war durch eine Periode vom 18.06. bis zum 06.08.2013 mit maximalen Außenlufttemperaturen  $\theta_{e,max} \geq 30^\circ$  geprägt. Die berechnete Anzahl der Sommertage und der heißen Tage variiert je nachdem, ob der momentane Wert oder das Stundenmittel als Bezug gewählt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Verlauf der Außenlufttemperatur während einer heißen Periode.

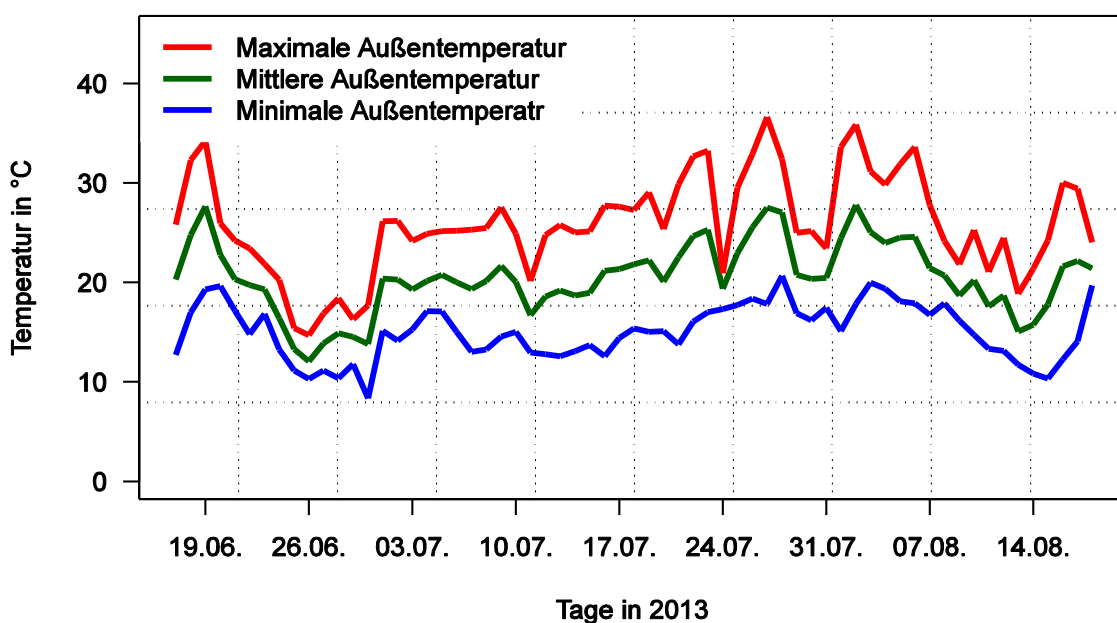


Abbildung 10-1: Verlauf der Außenlufttemperatur zu einer längeren Sommerperiode im Jahr 2013

Die Temperaturen der KLZ 2 für den CDD (Cooling Design Day) werden dabei im Messzeitraum deutlich übertroffen.

### 10.1.1.2 Solarstrahlung

Die solare Einstrahlung hat direkten Einfluss auf Energieverbrauch und thermischen Komfort. Sieben Einstrahlungssensoren erfassen die Solarstrahlung in unterschiedlichen Ausrichtungen.

#### 10.1.1.2.1 Globalstrahlung horizontal

Die Daten der Globalstrahlung konnten ab dem 24.04.2013 mit einer hohen Zuverlässigkeit erfasst werden. Die Messwerte der Strahlungsleistung wurden zunächst im 5-Minuten Intervall, nach dem 11.11.2013 im 1-Minuten Intervall in der Datenbank gespeichert.

Monatssummen vor Mai 2013 wurden aus den Daten des KMF entnommen (siehe Abschnitt 10.1.3.3).

Tabelle 10-4 : Monats- und Jahressummen der Solarstrahlung global, horizontal in kWh/m<sup>2</sup>

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahressumme
2013	21	30	83	105	114	163	18	138	85	52	24	19	1021
2014	21	44	91	120	147	171	165	134	76	62	27	14	1072
2015	14	38	71	140	146	160	171						748

#### 10.1.1.2.2 Direkte und diffuse Einstrahlung horizontal

Neben der Globalstrahlung wurde auch die diffuse Strahlung auf die Horizontale mittels Schattenringpyranometer erfasst. Aus organisatorischen Gründen war es nicht möglich, den Schattenring jederzeit exakt anzupassen. Dies führte dazu, dass die Messwerte nicht zu jeder Zeit die tatsächliche diffuse Strahlung repräsentiert.

Für die Zeiträume, in denen die Messung als unsicher gelten muss, können Modelle zur Berechnung des Anteils der diffusen Sonnenstrahlung an der Globalstrahlung zur Anwendung kommen. Im Rahmen dieser Arbeit findet ein von Duffi und Beckman in [77] präsentiertes Modell zu Berechnung des diffusen Anteils der Einstrahlung, an der Globalstrahlung Anwendung. Aus der berechneten mittleren extraterrestrischen Strahlungsleistung auf eine horizontale Fläche, kann mit der gemessenen Globalstrahlung der *clearness Index*  $k_T$  für jede Stunde bestimmt werden (vgl. Gl. 5).

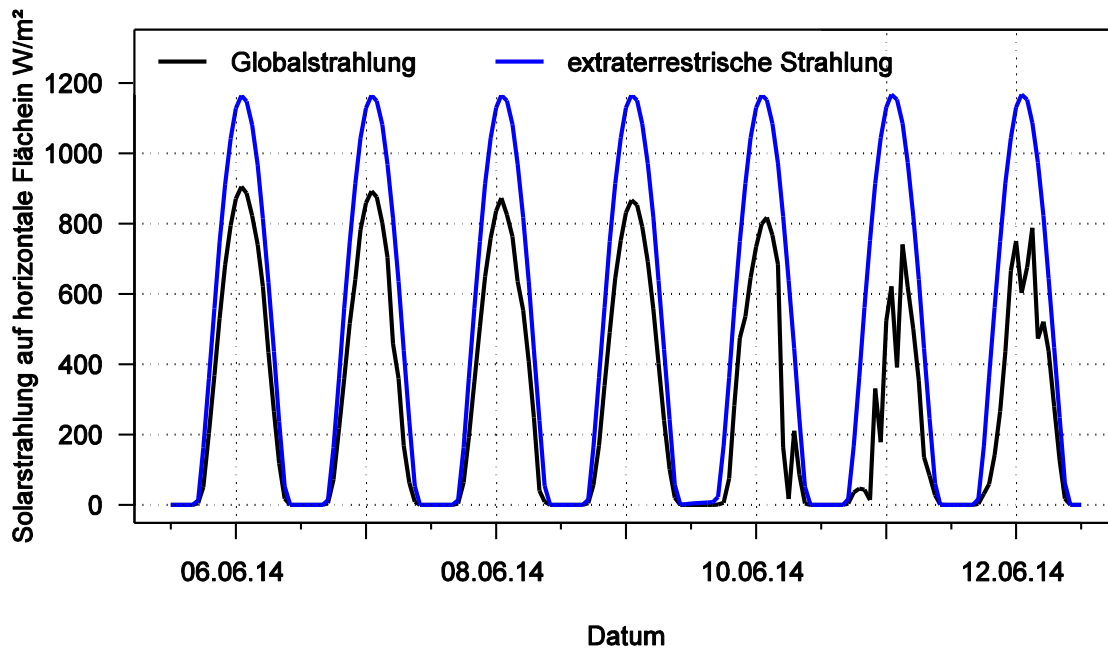


Abbildung 10-2: Zeitlicher Verlauf der berechneten extraterrestrischen Strahlung und der gemessenen globalen Solarstrahlung auf eine horizontale Fläche

$$k_T = \frac{I_{glob}}{I_0} \quad \text{Gl. 5}$$

mit:

$k_T$	clearness index	-
$I_{glob}$	Globale Solarstrahlung auf horizontal Fläche	W/m <sup>2</sup>
$I_0$	extraterrestrischen Strahlung auf horizontal Fläche	W/m <sup>2</sup>

Mit diesem Faktor kann der Anteil der diffusen Strahlung über Gl. 6 berechnet werden.

$$\frac{I_{diff}}{I_{glob}} = \begin{cases} 1,0 - 0,09k_T & \text{für } k_T < 0,2 \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 3,638k_T^3 + 12,336k_T^4 & \text{für } 0,2 < k_T < 0,8 \\ 0,165 & \text{für } k_T > 0,8 \end{cases} \quad \text{Gl. 6}$$

mit:

$k_T$	-
$I_{glob}$	W/m <sup>2</sup>
$I_0$	W/m <sup>2</sup>

Auf die aufbereiteten Messwerte der Globalstrahlung angewendet, ergibt sich somit eine errechnete Zeitreihe der diffusen Einstrahlung auf die horizontale Fläche.

Der Vergleich zwischen Messwerten mit eingestelltem Schattenring und den Ergebnissen aus dem Modell ist in der Abbildung 10-3 (Seite 133) dargestellt. Die gemessene diffuse Solarstrahlung ist oftmals niedriger als der berechnete Modellwert. In den nachfolgenden kumulierten Ergebnissen



wird die diffuse Einstrahlung, in Bezug auf den Vergleich zwischen Messung und Modell, tendenziell überschätzt.

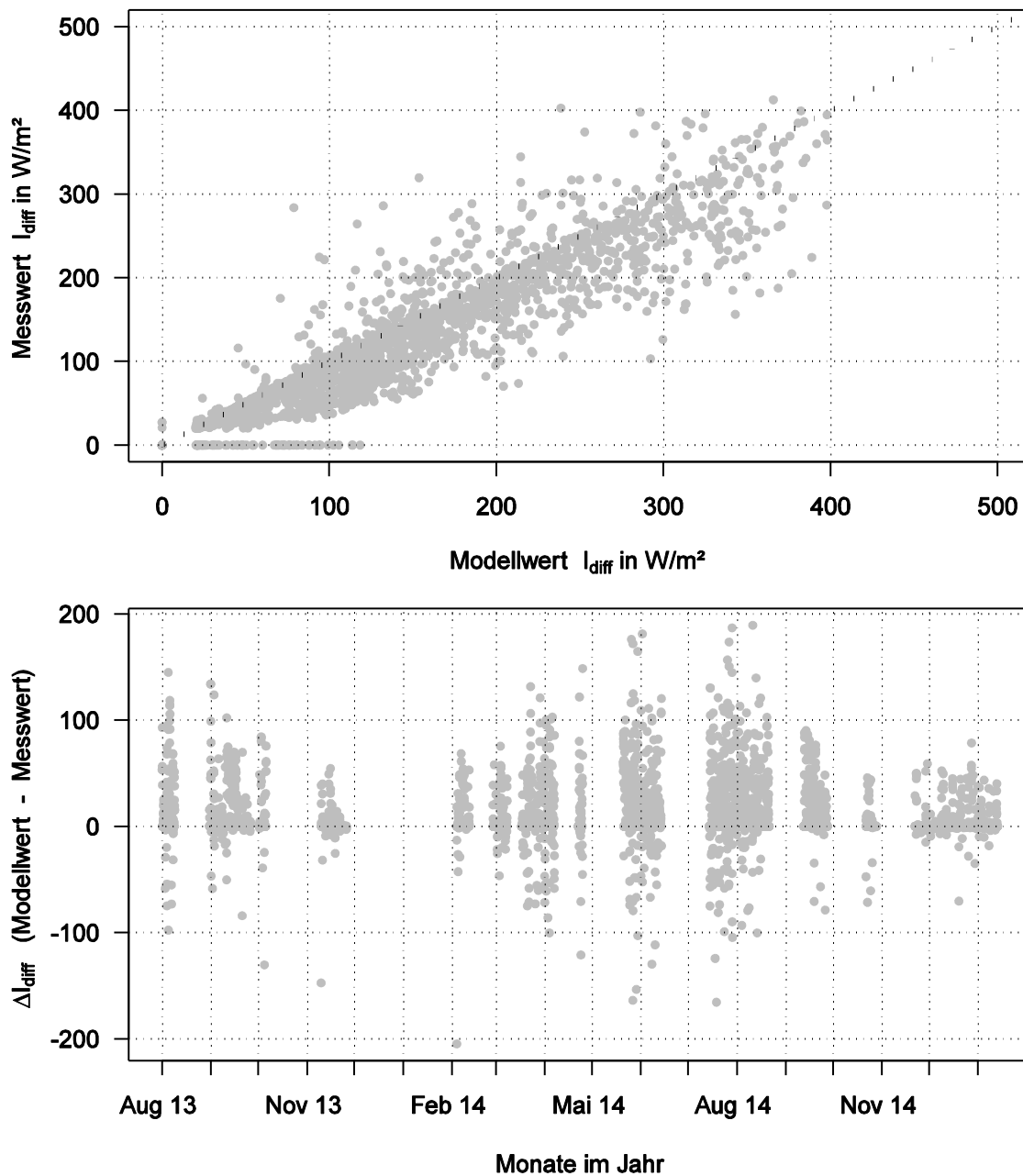


Abbildung 10-3: Stundenmittel der diffusen Einstrahlung in  $W/m^2$ , Vergleich zwischen Modell und Messwert HGL

Die direkte Solarstrahlung  $I_{dir}$  auf eine horizontale Fläche ergibt sich aus der Differenz von Globalstrahlung  $I_{glob}$  und Diffusstrahlung  $I_{diff}$ . Der typische Verlauf der Solarstrahlung ist in der Abbildung 10-4 dargestellt. Zu Beginn der gezeigten Zeitreihe, an einem klaren Tag, setzt sich die Globalstrahlung überwiegend aus der Direktstrahlung zusammen. Mit steigender Globalstrahlung nimmt der Betrag der Diffusstrahlung ab. Am Ende der Zeitreihe sinkt die direkte Einstrahlung deutlich, die Diffusstrahlung nimmt deutlich zu, jedoch sinkt insgesamt die Globalstrahlung.

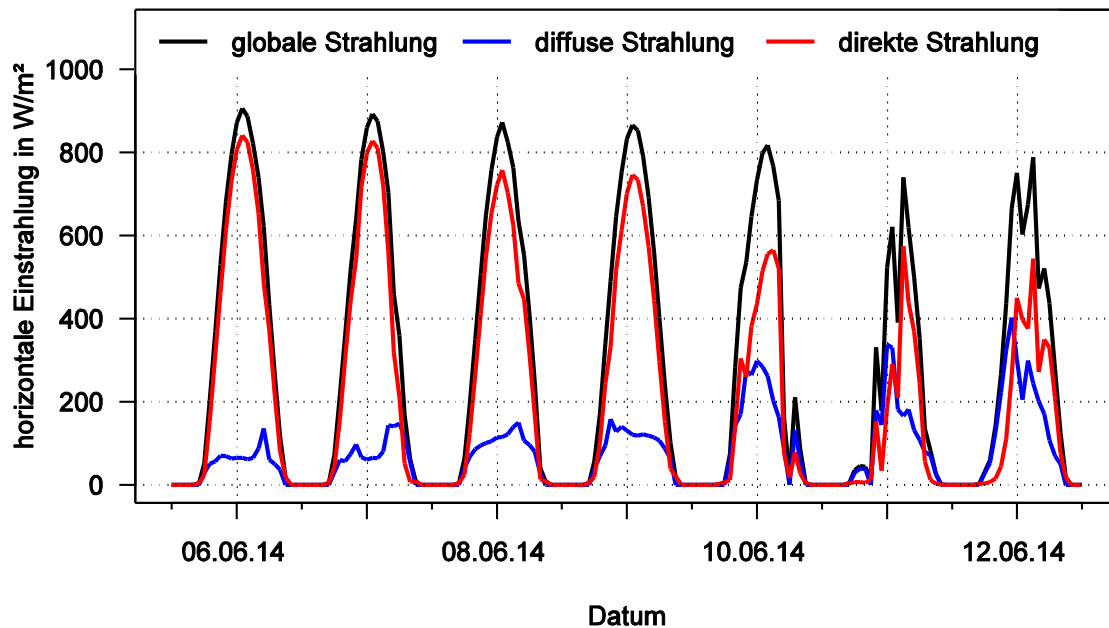


Abbildung 10-4: exemplarischer Verlauf der Solarstrahlung an einem Sommertag auf eine horizontale Fläche mit gemessener diffuser und globaler Einstrahlung

Aus den aufbereiteten Messdaten können die Monatssummen der Solarstrahlung bestimmt werden. Wie zu erwarten ist, folgt die Strahlungsenergie einem jahreszeitlichen Muster. Der Monat mit der größten Einstrahlung während des Monitorings war der Juli 2013 mit 187 kWh/m²a.

Tabelle 10-5: Monats- und Jahressumme der solaren Einstrahlung für die Jahre 2013 bis 2015, fehlende Messwerte aus anderen Quellen ergänzt oder berechnet.

		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahreswert
2013														
$E_{\text{glob}}$	kWh/m²	21	30	83	105	114	163	187	138	85	52	24	19	1021
$E_{\text{diff}}$	kWh/m²	7	10	32	51	89	78	81	59	45	27	20	14	512
$E_{\text{diff}}/E_{\text{glob}}$	%	37	34	38	49	78	48	43	43	53	53	83	75	50
2014														
$E_{\text{glob}}$	kWh/m²	21	44	91	120	147	171	165	134	76	62	27	14	1072
$E_{\text{diff}}$	kWh/m²	13	25	48	61	75	76	62	63	40	37	18	10	512
$I_{\text{diff}}/I_{\text{glob}}$	%	62	56	53	51	51	45	37	47	53	60	68	68	48
2015														
$E_{\text{glob}}$	kWh/m²	22	38	71	140	146	160	171						748
$E_{\text{diff}}$	kWh/m²	14	25	37	59	68	76	79						354
$I_{\text{diff}}/I_{\text{glob}}$	%	64	65	53	42	47	47	46						47

### 10.1.2 Beleuchtungsstärke

Wie im Abschnitt 7 dargelegt erscheinen die Messergebnisse der Beleuchtungsstärke als nicht auswertbar.

Grundsätzlich besteht ein Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der solaren Globalstrahlung. Der Vergleich dieses Zusammenhangs für die Messdaten mit statistisch generierten

Wetterdaten für Gebäudesimulation [78] [67] zeigt, dass sich der Zusammenhang deutlich unterscheidet. Auch ist deutlich erkennbar, dass die Messbereichsgrenze von 100 klx sehr oft erreicht wird. Erwartungsgemäß sollte dieser Messwert selten erreicht werden.

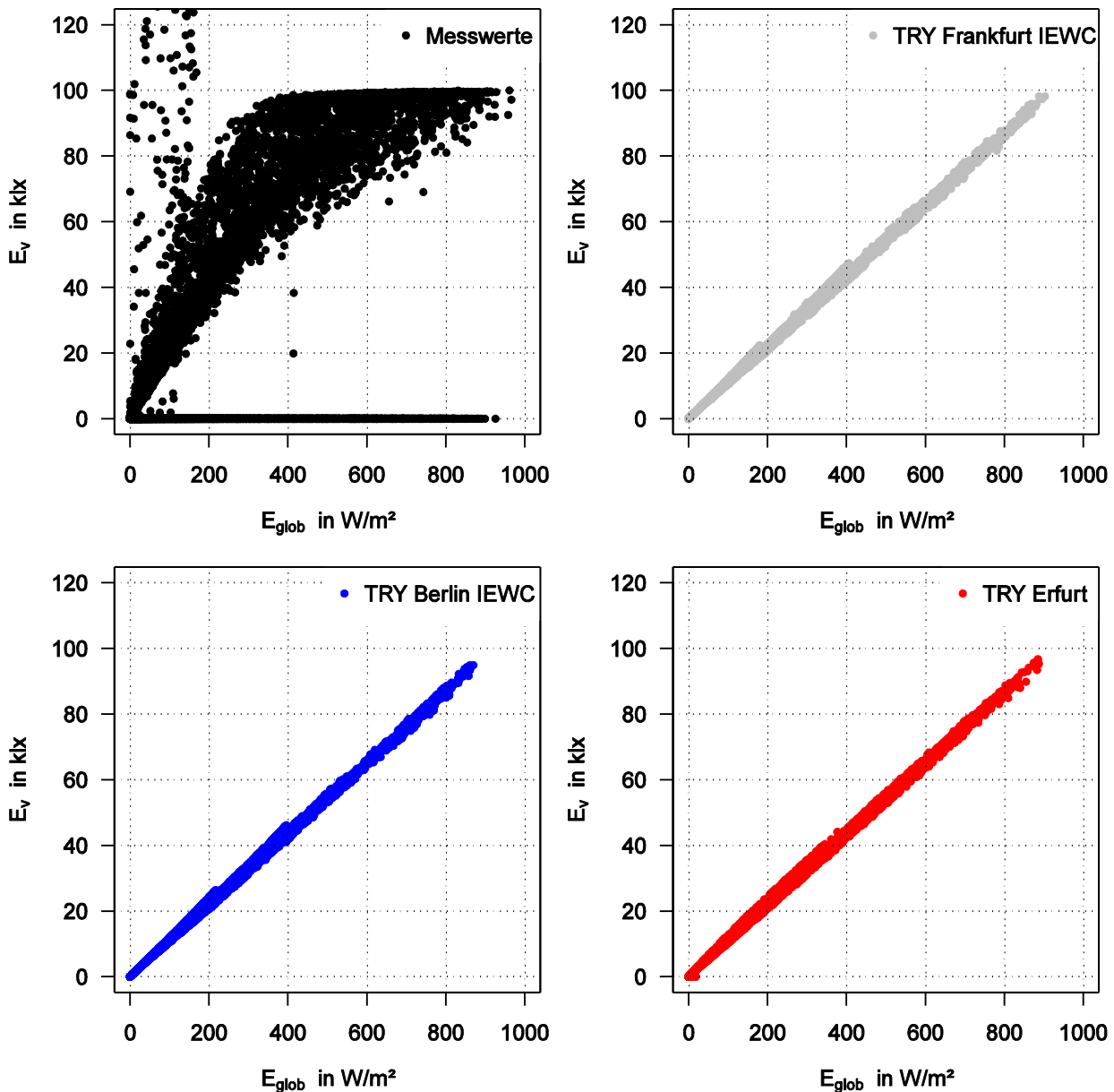


Abbildung 10-5: Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke außen und globaler Solarstrahlung für Messdaten (oben links teils nicht korrekt) und Daten aus verschiedenen TRY.

Hieraus wird gefolgert, dass der Messwert die tatsächlichen Gegebenheiten deutlich überschätzt. Eine Anpassung der Messwerte erscheint für Messwerte unter 100 klx theoretisch möglich, die Werte über 100 klx können jedoch nicht korrigiert werden. Für die Berücksichtigung der Beleuchtungsstärke wird im Weiteren daher nicht der Messwert sondern eine Modellwert verwendet. Für die Berechnung der Beleuchtungsstärke kommen verschiedene Ansätze in Frage. Beispielsweise wird in der DIN 5034-2 [79] ein Ansatz präsentiert, der unter anderem aus dem Sonnenstand die direkte (Sonne) und diffuse (Himmel) Beleuchtungsstärke bei bedeckten und klaren Himmel ableitet. Für den bedeckten Himmel sowie den direkten Teil des klaren Himmels konnte das Modell nachvollzogen werden, für den diffusen jedoch nicht.

In der internationalen Literatur [80] werden Ansätze präsentiert, die unter anderem aus der globalen Solarstrahlung die Beleuchtungsstärke ableiten. Diesen Ansätzen wird grundsätzlich gefolgt und aus den in der Abbildung 10-5 gezeigten TRY Wetterdaten ein Linearmodell der Beleuchtungsstärke als Funktion der globalen Solarstrahlung abgeleitet. In dieses Modell geht nur die Solarstrahlung ein.

Als Koeffizient für das Modell wurde  $108 \text{ lm/m}^2/\text{W/m}^2$  bzw.  $(\text{lm/W})'$  bestimmt. Das Modell wurde auf die aufbereiteten Messdaten der solaren Globalstrahlung angewendet.

In der Abbildung 10-6 Seite 136 sind für einen typischen Tag die nicht korrigierbaren Messwerte mit Messwertgrenze bei 65 klx und 100 klx, der berechnete Modellwert sowie die globale Solarstrahlung dargestellt. Es ist erkennbar, dass beide Messwerte zu Beginn gleich groß sind und ansteigen. Ab 65 klx steigt der Messwert II nicht mehr an. Der Messwert I (rot, Vierecke) steigt bereits um 7:00 Uhr auf die Messwertgrenze von 100 klx. Der aus der globalen Solarstrahlung (grün, Dreiecke) abgeleitete Modellwert (blau, Punkte) folgt der Tendenz des Messwertes I, jedoch im Gegensatz zu diesem auf einem niedrigerem realistischen Niveau. Abschließend kann festgestellt werden, dass das Modell mit guter Näherung den tatsächlichen Verlauf der Beleuchtungsstärke wiedergibt.

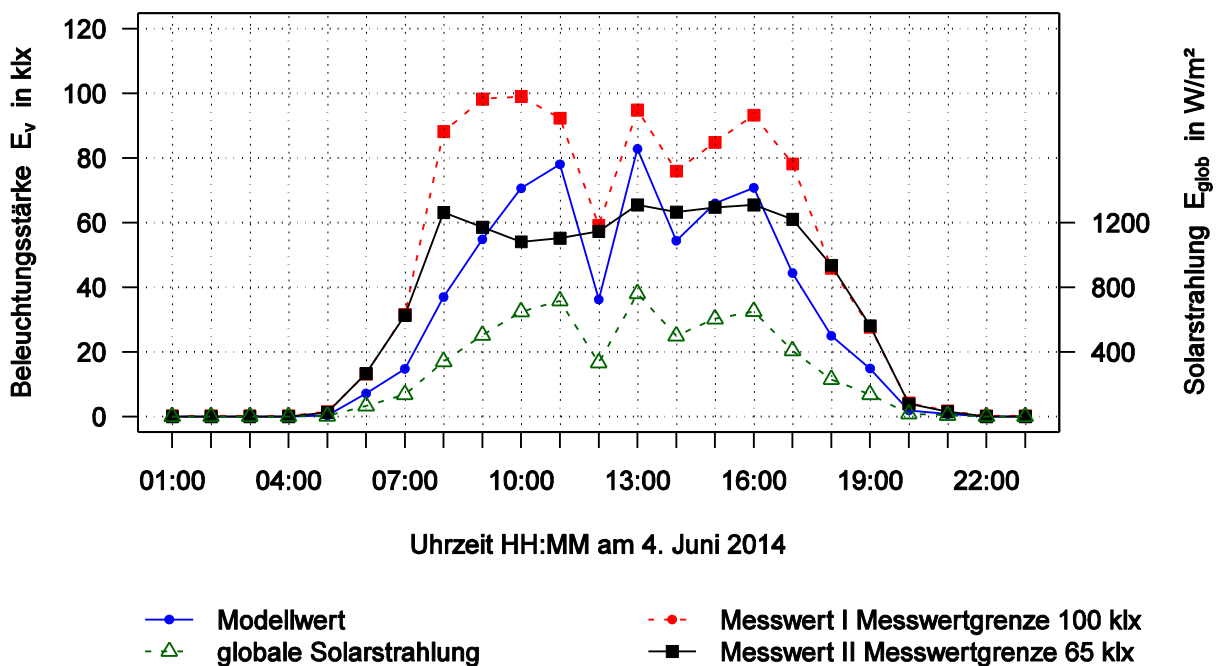


Abbildung 10-6: Verlauf der nicht korrigierten Messdaten der Beleuchtungsstärke und aufbereitete Modellwerte sowie globale Solarstrahlung (rechte Achse)

### 10.1.3 Vergleichende Betrachtung Wetterdaten

#### 10.1.3.1 Vorbemerkungen

In diesem Abschnitt wird der Vergleich mit detaillierten Messdaten anderer Messstationen in der Nähe der Wetterstation des Gebäudes bzw. für die Region des Gebäudestandortes repräsentativen Wetterdaten gezogen. Dies dient dem Zweck, die Witterung während des Monitorings am Standort in Bezug zu diesem einzuschätzen, außerdem die Quellen für Ergänzungsdaten bei Da-

tenausfall im Monitoringsystem zu beschreiben sowie die Unsicherheit der Messdaten aus den Abweichungen zu den anderen Messdaten zu bewerten.

### 10.1.3.2 DWD-Station am Flughafen Erfurt-Weimar

Auf der Gemarkung Erfurt wird am Flughafen Erfurt-Weimar eine Station zur Wetterbeobachtung, vom DWD betrieben. Diese Messdaten sind auch die Grundlage für die Berechnung von Gradtagzahl und Heizgradtage für die Region Erfurt. Die Station wird derzeit unter der Bezeichnung Erfurt-Weimar und wurde früher unter der Bezeichnung Erfurt/Bindersleben geführt. Die Station ist ca. 10 km vom Gebäude entfernt und liegt auf einer Anhöhe. Die Höhendifferenz zum Standort HLG in der Leipziger Str. beträgt 126 m. Aus der Dokumentation kann die Position entnommen werden.

Tabelle 10-6: Position Messstation Erfurt-Weimar des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Erfurt-Weimar in Erfurt

Höhe über Null in m	Breitengrad	Längengrad	Stations-ID DWD	Stations-ID WMO
316	50.9828	10.9606	1270	095540
	50°58' N	10°57' E		

Die erhobenen Wetterdaten werden durch den DWD aufbereitet über das Internet zur Verfügung gestellt [81]. Die Messdaten werden mit UTC bereitgestellt. Damit wird die Sommerzeit und Zeitumstellung nicht berücksichtigt. Die folgenden Messdaten werden für ein stündliches Intervall veröffentlicht und können ausgewertet werden. Außentemperatur

- Luftfeuchte
- Sonnenscheindauer
- Windgeschwindigkeit

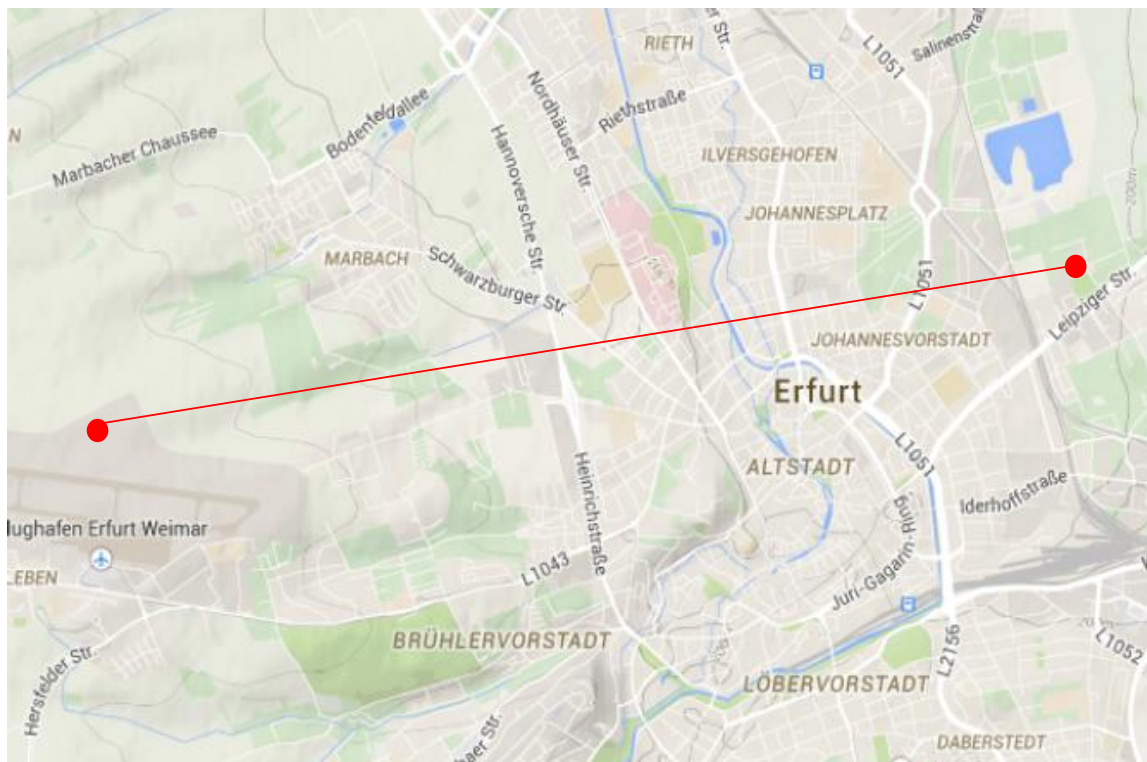


Abbildung 10-7: Abstand zwischen DWD-Station und HLG beträgt ca. 10 km Luftlinie

Tabelle 10-7: Wetterdaten DWD-Station Erfurt-Weimar

	Gradtage K * d	Mittlere Außentemperatur an Heiz-	Außentemperatur	Heiztage	Tage
Jan 2013	395.8329710	-0.7688055	-0.7688055	31	31
Feb 2013	376.8208333	-1.4578869	-1.4578869	28	28
Mrz 2013	426.7739130	-1.7669004	-1.7669004	31	31
Apr 2013	147.4416667	5.2981061	8.0238889	22	30
Mai 2013	46.4791667	9.5537281	11.4176075	19	31
Jun 2013	7.0166667	10.8305556	15.4675000	6	30
Jul 2013	NA	NA	19.4436828	NA	31
Aug 2013	NA	NA	18.1846774	NA	31
Sep 2013	25.7541667	9.4245833	13.1930556	10	30
Okt 2013	74.5041667	8.0787281	10.4333333	19	31
Nov 2013	240.9041667	3.6929598	4.0013889	29	30
Dez 2013	254.7333333	3.7827957	3.7827957	31	31
Jan 2014	324.9291667	1.5184140	1.5184140	31	31
Feb 2014	210.1625000	4.4941964	4.4941964	28	28
Mrz 2014	170.2829710	6.1281734	6.5990708	29	31
Apr 2014	54.1625000	8.3891667	10.7475000	15	30
Mai 2014	46.5875000	9.0882812	12.1134409	16	31
Jun 2014	0.6125000	11.3875000	15.5834722	1	30
Jul 2014			19.2829301		31
Aug 2014	0.8333333	11.5833333	15.7919355	2	31
Sep 2014	5.9375000	10.5156250	14.6566667	4	30
Okt 2014	42.4166667	8.7371795	11.7228495	13	31
Nov 2014	188.2125000	5.2781250	5.7822222	28	30
Dez 2014	312.9083333	1.9061828	1.9061828	31	31
Jan 2015	10.5000000	1.5000000	1.5000000	1	1

Die Messstation ist mit der WMO ID 095540 Bestandteil des Katalog der Wetterstationen im 2013 ASHRAE Handbook – Fundamentals. Dort können weitere Information zu Langzeitbeobachtungen entnommen werden [82].

### 10.1.3.3 Station KMF der FH Erfurt

Am Standort Leipziger Straße der FH Erfurt betreibt die Fakultät Landschaftsarchitektur, Gartenbau und Forst ein Klimamessfeld (KMF) zur meteorologischen Beobachtung. Die erhobenen Messdaten sind in das Agrarmeteorologische Messnetz der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) einbezogen [83]. Durch die unmittelbare Nähe der Wetterstationen KMF zum HGL können die Messdaten miteinander verglichen werden. Außerdem können Datenausfälle kompensiert werden. Die Messdaten wurden in Tabellenform zur Verfügung gestellt [84].

#### 10.1.3.3.1 Summen der globalen Solarstrahlung

Aufgrund verschiedener Ausfälle im Messsystem der horizontalen globalen solaren Einstrahlung werden teilweise auch Messdaten aus dem KMF genutzt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die korri-

gierten und aufbereiteten Messdaten von der Wetterstation HLG gegenüber den Messdaten vom KMF.

Tabelle 10-8 : Vergleich Monatssummen der horizontalen globalen Solarstrahlung HLG (Hörsaal und Laborgebäude) mit KMF (Klimamessfeld) in kWh/m<sup>2</sup>

		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
2013	HLG	21	30	83	105	114	163	187	138	85	52	24	19	1021
	KMF	21	30	83	105	113	162	189	141	85	52	24	20	1025
2014	HLG	24	44	91	120	147	171	165	134	76	62	27	14	1072
	KMF	22	45	92	120	150	171	164	133	78	63	27	15	1080

Die Messwertepaare die keine ähnliche Tagessumme aufweisen, gehen auf Störungen in der Datenerfassung oder Verschattungen zurück.

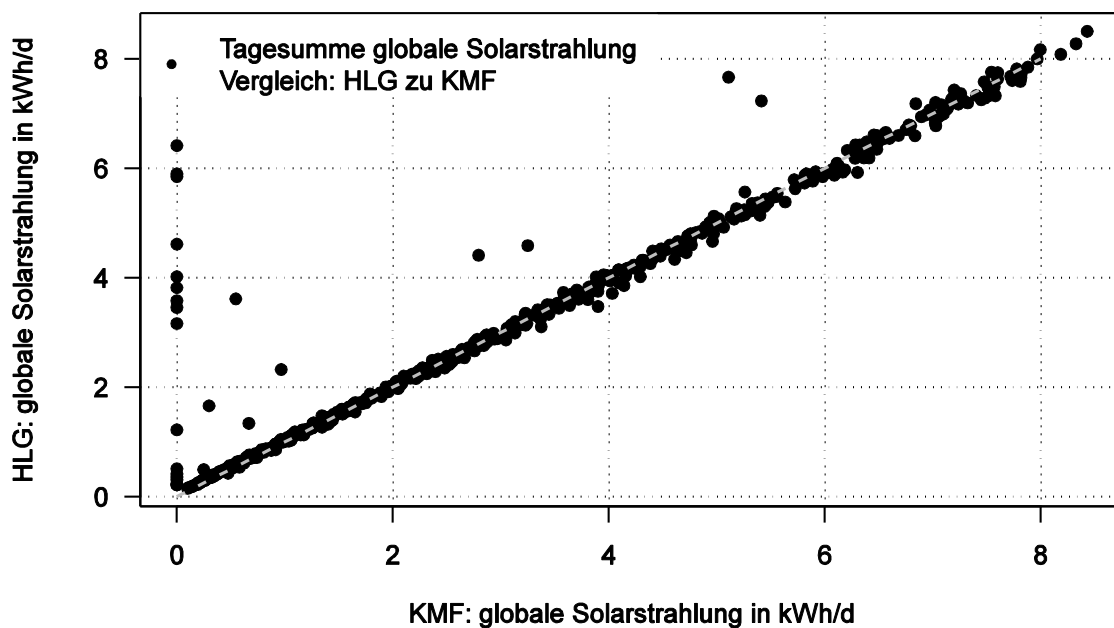


Abbildung 10-8: Vergleich der Tagessummen der horizontalen globalen Solarstrahlung zwischen Wetterstation auf dem Dach des HLG und dem Klimamessfeld (KMF) in unmittelbarer Nähe zum Gebäude.



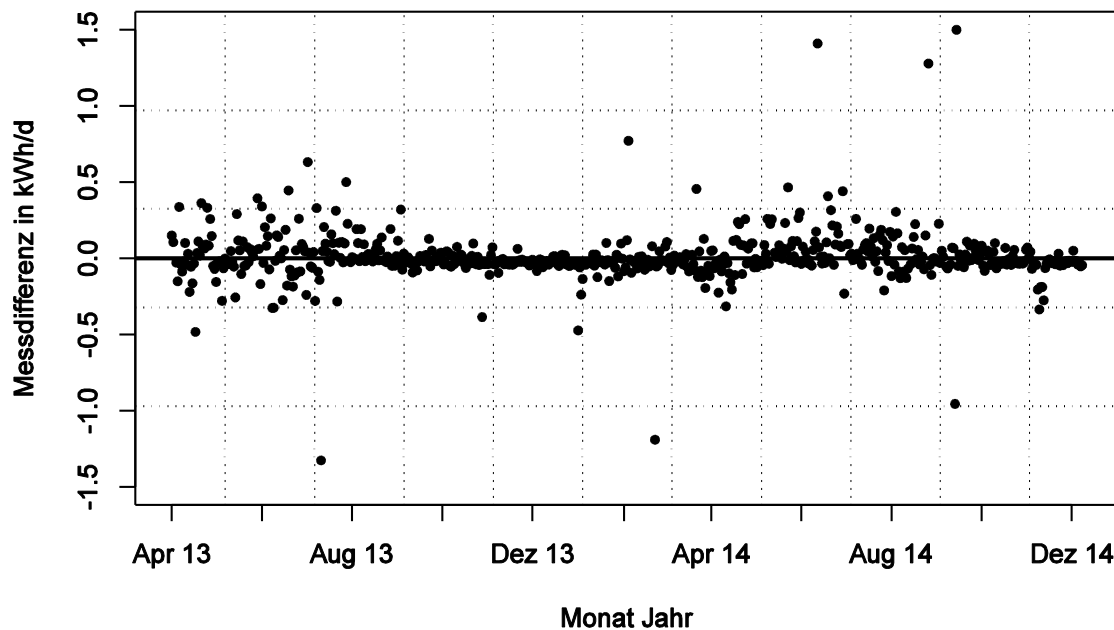


Abbildung 10-9: Differenzen [Residuen] der Tagessumme der horizontalen globalen Solarstrahlung zwischen Wetterstation auf dem Dach des HLG und dem Klimamessfeld (KMF) in unmittelbarer Nähe zum Gebäude.

Die Messwerte wurden technisch, wie auch organisatorisch getrennt voneinander aufgenommen. Aus der hohen Übereinstimmung, kann auf eine hohe Genauigkeit beider Messungen geschlossen werden.

#### 10.1.4 Heizgradtage, Gradtagszahl, mittlere Außentemperatur

Für die Gegenüberstellung von Energiebedarfswerten der Planung mit gemessenen Verbrauchswerten, sowie dem Vergleich von Verbrauchswerten untereinander zu verschiedenen Witterungsbedingungen, müssen diese Größen, hinsichtlich der klimatischen Einflussfaktoren auf eine gemeinsame „Basis“ bezogen werden. Die wesentlichen Einflussgrößen sind die Außentemperatur und die solare Einstrahlung.

In der Praxis haben sich zwei unterschiedliche Verfahren zur Witterungsbereinigung bewährt. Zum einen die Anwendung von „Heizgradtag“ zum anderen die Anwendung von „Gradtagszahlen“. Eine vergleichbare Methode zur Korrektur des Einflusses der solaren Einstrahlung ist nicht dokumentiert.

Um den Einfluss der Außentemperatur auf den Heizenergieverbrauch bzw. den Bedarf zu berücksichtigen, kann eine Außentemperaturbereinigung durchgeführt werden. Dazu können entsprechend der VDI 3807 Blatt1:2003 (Heiz)Gradtage verwendet werden [85]. Zur Bereinigung werden bezugs- bzw. langjährige (Heiz)Gradtage zur aktuellen Messperiode ins Verhältnis gesetzt und mit dem zu bereinigenden Heizenergieverbrauch multipliziert (siehe Gl. 7).

$$Q_{VH} = Q_{VgH} \frac{G_m}{G} \quad \text{Gl. 7}$$

mit:

$G_m$	langjähriges Mittel der Jahresgradtage	K d/a
$G$	Gradtage eines Jahres	K d/a
$Q_{VgH}$	außentemperaturunabhängiger Heizenergieverbrauch	kWh
$Q_{VH}$	bereinigter Heizenergieverbrauch	kWh

Das Ergebnis ist der bereinigte Heizenergieverbrauch und dient als Vergleichsgröße.

In einer alten Versionen der Richtlinie VDI 3807 Blatt 1 [86] wird auf die Heizgradtage explizit eingegangen. In der aktuellen jedoch nicht mehr und stattdessen als Berechnungsmethode für **Gradtage** ein Verweis auf die VDI 4710 Blatt 2 gegeben. In dieser Richtlinie (VDI 4710 Blatt 2) wird das Verfahren zur Berechnung der, vormals als Heizgradtage bezeichneten Größe, der Gradtage dargestellt. Da die Richtlinie nur vom Heizfall ausgeht, handelt es sich bei den Gradtagen um Heizgradtage.

Die Berechnung der **Gradtage** kann demnach entsprechend der VDI 4710 Blatt 2:2007 erfolgen [87] und ergibt sich aus der Summe der Differenzen zwischen der gewählten Heizgrenztemperatur und der gemessenen mittleren Außentemperatur an einem Heiztag. Ein Heiztag ist dadurch definiert, dass die mittlere Außentemperatur kleiner ist als die Heizgrenze.

$$G_{\vartheta_g} = 1d \times \sum_{n=1}^z (\vartheta_g - \vartheta_{m,n}) \text{ für } \vartheta_{m,n} < \vartheta_g \quad \text{Gl. 8}$$

mit:

$G_{\vartheta_g}$	Jahresgradtage	K d/a
$\vartheta_g$	Heizgrenze (z.B. 12 °C, 15 °C)	°C
$\vartheta_{m,n}$	mittlere Außentemperatur des Tages n	°C
$z$	Anzahl der Heiztage	-

Als Index in G wird die verwendete Heizgrenztemperatur  $\vartheta_g$  angegeben. Die Gradtage bei einer angenommen Heizgrenze von  $\vartheta_g = 15 \text{ °C}$  wird demnach mit  $G_{15}$  angegeben. Für den Vergleich von Heizenergieverbrauchswerten desselben Orts kann der Verbrauch auf die mittleren (Heiz)-Gradtage bezogen werden  $G_{15m}$ . Die Tagesmitteltemperatur  $\vartheta_m$  ist nach der [87] das arithmetische Mittel von 24 Stundenmesswerten der Außenlufttemperatur.

Die **Gradtagszahl** berechnet nach der im Jahr 2002 zurückgezogenen VDI 2067 Blatt 2:1993 [88] bzw. der Definition für Gradtage in der VDI 3807 ([85] Gl. 9 und 10 Seite 13). Diese wird aus der Summe der Differenzen zwischen Innentemperatur und mittlerer Außentemperatur eines Heiztages bestimmt. Ein Heiztag ist definiert als ein Tag mit einer mittleren Außentemperatur von weniger als 15 °C. Gradtagszahlen werden analog zu den Gradtagen in Gl. 7 eingesetzt.

Aufgrund der in Praxis auch angewandten Termini „Heizgradtage“ und „Gradtageszahl“ werden die Begriffe in dieser Arbeit weiter genutzt, auch wenn der Autor der Auffassung ist, dass diese Termini normativ anders bzw. missverständlich bestimmt sind. Als Heizgradtage werden die nach Gl. 14 und als Gradtagszahl die nach Gl. 9. definierte Größe bezeichnet. Die Bezeichnung Jahresgradtage ist Synonym für Gradtagszahlen.

$$G_{t\vartheta_i/\vartheta_g} = 1d \times \sum_{n=1}^z (\vartheta_i - \vartheta_{m,n}) \text{ für } \vartheta_{m,n} < 15 \text{ °C} \quad \text{Gl. 9}$$

mit:

$G_{\vartheta_g}$	Jahresgradtag(szahl)/e (sofern über ein Jahr)	K x d /a
$\vartheta_i$	Rauminnentemperatur (z.B. 20 °C)	°C
$\vartheta_{m,n}$	mittlere Außentemperatur des Tages n	°C
$z$	Anzahl der Heiztage	

#### 10.1.4.1 Klimafaktoren

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) veröffentlicht Klimafaktoren (KF) für die Witterungsbereinigung von Verbrauchswerten für Heizwärme zur Erstellung von Verbrauchsausweisen nach EnEV. Die Klimafaktoren entsprechen den zusammengefassten Gradtagszahlen-Therm in Gl. 7 (rechts). Ziel ist es, Verbrauchswerte unterschiedlicher Standorte und über mehrere Heizperioden in Deutschland miteinander vergleichbar zu machen. Neben diesem Ziel erscheinen die Klimafaktoren grundsätzlich geeignet einen Vergleich zwischen Bedarfsberechnung und Verbrauch zu führen. Basis für die Berechnung der Klimafaktoren sind Jahresgradtag(szahlen)  $G_{t,20/15}$  des Referenzklimas und die der Verbrauchsperiode des zu bereinigenden Heizwärmeverbrauchs.

$$KF = \frac{G_{t,TRY,Potsdam}}{G_{Standort}} \quad \text{Gl. 10}$$

$$Q_{VH} = Q_{VgH} \cdot KF \quad \text{Gl. 11}$$

mit:

$Q_{VH}$	K x d
$Q_{VgH}$	K x d
$KF$	

Die Klimafaktoren können für jeden Postleitzahlenbezirk in Deutschland unter (<http://www.dwd.de/klimafaktoren>) bezogen werden. Damit steht eine räumlich hochaufgelöste und einheitliche Datengrundlage zur Verfügung. Der Klimafaktor ergibt sich wie in Gl. 11 dargestellt. Desto kleiner der Klimafaktor ist, umso kälter war die Witterung im Vergleich zum Referenzklima. Mit dem Faktor  $KF$  für einen konkreten Standort und konkreten Zeitraum sowie der Kenntnis der  $G_{t,TRY4}$  kann auf die angesetzten  $G_{t,Standort}$  für konkreten Standort und Zeitraum gefolgert werden. Ein Vergleich der vom DWD veröffentlichten Faktoren mit Berechnungen auf Grundlage erhobener Messdaten für konkreten Ortsbezug, ist auf Seite 145 in der

Tabelle 10-14 darstellt.

Für die Berechnung des Energiebedarfs nach EnEV entsprechend der DIN V 18599 wird ein Referenzklima mit Wetterdaten genutzt, mit denen der Entwurf und das Referenzgebäude berechnet werden.

Mit der Novellierung der EnEV im Jahr 2013 wurde das *Referenzklima* gegenüber der Vorgänger Ausgabe geändert. Als Referenzklima gilt nun der Repräsentanzstation Potsdam. Diese Referenz-

klima gilt für die Ausstellung von Energieausweisen auf Verbrauchsbasis und für den „EnEV-Nachweis“. Der Energiebedarf für das untersuchte Gebäude wurde mittels des alten Referenzklimas bestimmt.

Als Randbedingungen für den Nachweis, waren nach der alten DIN V 18599-10:2007-02 die in der Tabellen 7 gegebenen Klimadaten zu verwenden. In dieser Tabelle 7 ist ein Referenzklima aus Außenlufttemperatur und Einstrahlung gegeben [5]. In der Norm fehlt dabei ein Hinweis auf die Quelle der Wetterdaten. Hinweise für den Witterungskorrektur im Rahmen eines Bedarfs-

/Verbrauchsabgleich gibt DIN V 18599 Beiblatt 1:2010-1 [89]. Die Autoren des Beiblatts empfehlen eine Gradtagszahl mit konkreten Messdaten der Außen- und Innentemperaturen. Als Langzeitklima wird die Anwendung des damals gültigen Referenzklimas für Deutschland, des Standorts Würzburg vorgeschlagen. Konkrete Angaben zu den anzuwendenden Gradtagszahlen werden jedoch nicht gegeben.

Das TRY 05 für Würzburg aus dem Jahr 1986 [90] stimmt in den mittleren monatlichen Außentemperaturen hinreichend exakt mit den in der DIN V 18599-10:2007-02 gegebenen Außentemperaturen überein (vgl.

Tabelle 10-9 ). Auch in der Arbeit von Maas [91] wird das TRY 5 aus 1986 als das Referenzklima nach DIN V 18599-10:2007-02 gewählt. Die

Tabelle 10-9 zeigt die Gegenüberstellung der mittleren Außentemperaturen aus [5] zu eigenen Berechnungen aus den Daten des TRY 05 [90].

Tabelle 10-9: Referenzklima 2007: Mittlere monatliche Außentemperatur für das Referenzklima Deutschland nach Tabelle 7 DIN V 18599-10:2007- [5] gegenüber TRY 05: Berechneten mittlere monatliche Außentemperatur aus Daten TRY 05 aus 1986.

	Jan	Feb	Mrz	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Referenz 2007 [5]	-1,3	0,6	4,1	9,5	12,9	15,7	18,0	18,3	14,4	9,1	4,7	1,3
TRY 05	-1,3	0,6	4,0	9,5	12,9	15,7	18,0	18,3	14,5	9,1	4,7	1,3

Für den Vergleich der Verbrauchsdaten des Gebäudes mit den Werten der Bedarfsberechnung nach damals gültiger EnEV bzw. DIN V 18 599 ist die Basis der Wetterdatensatz des damals gültigen Referenzklimas TRY 05 mit Repräsentanzstation Würzburg für Deutschland. Aus dem Wetterdatensatz des TRY 05 für Würzburg, mit Angaben der Außentemperatur für 8760 Stunden können Jahresgradtagszahlen  $G_{t,20/15,TRY05} = 3.851 \text{ Kd/a}$  berechnet werden. Das an der Station Würzburg gemessene langjährige Mittel der Gradtagszahlen von 1970 bis 2014 beträgt mit  $G_{t,m,20/15} = 3688 \text{ Kd/a}$  deutlich weniger.

Die VDI 3807 Blatt 1 gibt aus Aufzeichnungen von 1950 bis 1970 für Würzburg [85] eine ähnliche Größe von Jahresgradtagszahlen an  $G_{t,m20/15} = 3883 \text{ Kd/a}$ .

Als langjährige Basis für den Bedarfs- Verbrauchabgleich werden die Jahresgradtage der des TRY 05 1988  $G_{t20,15} = 3.851 \text{ Kd/a}$  angenommen.

Im Vergleich dazu ist das aktuellen Referenzklima TRY 4 aus dem Jahr 2011 für die Repräsentanzstation Potsdam mit Jahresgradtage  $G_{t20/15, TRY04} = 3667 \text{ Kd/a}$  um den Faktor 1,05 wärmer als das alte Referenzklima.

Tabelle 10-10: Auszug aus dem Anhang VDI 3807 Blatt 1:2013 [85].

	$z_{\text{Hm}}$ in d/a	$G_{\text{m20,15}}$ in K·d/a	$t_{\text{Hm}}$ in °C
Erfurt	292,5	4250	5,5
Wetterstation Flughafen Erfurt-Weimar	286,3	4226	5,2
Würzburg (DWD)	271,9	3883	5,7

Tabelle 10-11: Gegenüberstellung verschiedener Kenndaten der Witterung für Würzburg

TRY	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
$G_{\text{t20/15}}$ TRY05 (alt)	660	543	495	304	172	72	46	25	159	335	460	580
TRY05 $\theta_e$	-1,3	0,6	4,0	9,5	12,9	15,7	18,0	18,3	14,5	9,1	4,7	1,3
$G_{\text{t,20/15}}$ TRY 13	584	586	535	306	100	97	22,7	54	174	285	461	629
TRY 13 $\theta_e$	0,15	-1,9	1,7	8,7	14,5	15,3	17,8	17,3	12,8	9,7	3,6	-1,3
IWUG $_{\text{t,20/15}}$	607	526	454	316	157	74	27	29	137	325	465	572
IWU $\theta_e$	0,4	1,4	5,4	9,2	14,0	17,0	18,9	18,6	14,4	9,4	4,5	1,6

Im Anhang E der DIN V 18599-10:2011 ([2] ab Seite 83) werden Witterungsdaten angegeben, die ausdrücklich nicht für die Nachweisführung nach EnEV bestimmt sind. Als Referenzklima wird Potsdam (Region 4) definiert. Würzburg gehört mit der Repräsentanzstation Passau zur Region 13, Erfurt zur Region 9.

Tabelle 10-12: Monatsmittel der Außentemperaturen aus der DIN EN 18599-10:2011 Seite 83 Anhang E [2], PO = Potsdam, PA=Passau (Region für Würzburg), Region für Erfurt

TRY	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
4 PO	1,0	1,9	4,7	9,2	14,1	16,7	19,0	18,6	14,3	9,5	4,1	0,9
13 PA	-1,2	0,4	4,3	8,2	13,7	16,4	18	17,8	13,1	8,7	3	-0,2
9 EF	0,5	1,0	3,9	8,2	12,9	15,5	17,5	17,6	13,2	9,2	3,8	0,8

#### 10.1.4.2 Kennwerte der Messdaten

Für die Berechnung der Kennwerte der Witterung wurden die gemessenen Außentemperaturwerte in äquidistante Stundenwerte benötigt. Hierfür wurden die Messwerte der Außentemperaturen geeignet aufbereitet. Für Zeiträume mit Datenausfällen wurde zwischen Messwerten interpoliert. Aus den Daten der Witterung von 2013 bis 2015 können die folgenden Kennwerte (vgl.

Tabelle 10-13) gebildet werden. In der Spalte „Messwerte HLG“ werden Gradtage (Gardtagszahlen), Heizgradtage mit der Heizgrenze = 12 °C angegeben.

In der nächsten Spalte sind Vergleichswerte und Faktoren für die Witterungsbereinigung berechnet aus den Jahresgradtagen gemessenen Außentemperatur mit verschiedenen Referenzklimatas gezeigt. Zur Einordnung der Ergebnisse dient der Klimafaktor nach GL [x].

In den Spalten Klimafaktoren des DWD werden die vom DWD veröffentlichten Klimafaktoren gezeigt.

Tabelle 10-13: Übersicht zu berechneten Kenngrößen der Witterung im Vergleich zu Kenngrößen aus anderen Quellen: Wetterdaten DWD-Station Flughafen Erfurt-Weimar, dem TRY 5 des alten Referenzklima Würzburg, dem aktuellen Referenzklima TRY 4 Potsdam, dem von DWD veröffentlichten Klimafaktoren zur Witterungsbereinigung für den Gebäudestandort und den Standort der DWD-Station Flughafen Erfurt-Weimar. Die jeweiligen Faktoren, multipliziert mit dem unbereinigten Energieverbrauch, ergeben den bereinigten Heizenergieverbrauch.

	Jahr	2013	2014
Messwerte HLG	Gradtage $G_{i20,15,HGL}$	3640	2900
	Heizgradtage $G_{12}$	1704	1102
	glob. Einstrahlung in kWh/m²a	1032	1085
Vergleichswerte und Faktoren für Witterungsbereinigung. Der Energieverbrauch ist entsprechend Faktor zu multiplizieren	Referenzklima Potsdam zu Messdaten HLG $G_{i20,15,TRY\ 4} / G_{i20,15,HGL}$	3667/3640	3667/2900
	Klimafaktor	1,01	1,26
	altes Referenzklima 2007 Würzburg zu Messdaten HLG $G_{i20,15,TRY\ 5} / G_{i20,15,HGL}$	3.851/3640	3.851/2900
	Klimafaktor	1,05	1,33
	DWD-Station Erfurt-Weimar aktuell zu Messdaten HLG $G_{i20,15,EF} / G_{i20,15,HGL}$	4117/3640	3523/2900
	Klimafaktor	1,13	1,21
	DWD-Station Erfurt-Weimar langzeit zu Messdaten HLG $G_{m15/15,EF} / G_{i20,15,HGL}$	/3640	/2900
	Klimafaktor		
	Referenzklima Potsdam Zu DWD-Station Erfurt-Weimar aktuell	3667/4117	3667/3523
	Klimafaktor	0,8906	1,04
Klimafaktoren des DWD	PLZ 99085 Standort HLG	0,96	1,14
Klimafaktoren des DWD	PLZ 99092 Standort DWD Station Erfurt-Weimar	0,93	1,09

Mit den Messdaten vom Gebäudestandort und den vom DWD veröffentlichten Messdaten für die DWD-Station Flughafen Erfurt-Weimar kann der Vergleich zu den Klimafaktoren des DWD (siehe Tabelle 10-13 Klimafaktoren des DWD) für beide Standorte in Erfurt geführt werden.

Tabelle 10-14: Vergleich berechnete Klimafaktoren zu den vom DWD veröffentlichten mit gleichem Ortsbezügen und Zeiträumen. <sup>1</sup> Messdaten Gebäude Monitoring, <sup>2</sup> Messdaten DWD-Station

	Jahr	Klimafaktoren des DWD	Klimafaktoren eigene Berechnung	Differenz
PLZ 99085 Standort HLG	2013	0,96	1,01 <sup>1</sup>	-0,05
	2014	1,14	1,26 <sup>1</sup>	-0,12

PLZ 99092 Standort DWD-Station Erfurt-Weimar	2013	0,93	0,89 <sup>2</sup>	+0,04
	2014	1,09	1,04 <sup>2</sup>	+0,03

Es wird deutlich (siehe

Tabelle 10-14), dass die vom DWD veröffentlichten Faktoren zur Witterungsbereinigung für den Standort des Gebäudes zahlenmäßig kleiner sind, als die berechneten. Damit unterschätzt die Anwendung der Klimafaktoren des DWD tendenziell den Energieverbrauch am Standort des Gebäudes. Im Gegensatz dazu, überschätzen die Faktoren des DWD den Wärmeverbrauch am Standort der DWD-Wetterstation Flughafen Erfurt-Weimar. Die Klimafaktoren des DWD beruhen auf den Messdaten der DWD-Wetterstationen, nutzen diese aber nicht direkt. Durch das angewendete Berechnungsverfahren sind daher Unterschiede zwischen den Klimafaktoren und den tatsächlichen Messdaten für den Ort einer Wetterstation im Extremfall bis zu 10 % möglich. Ohne die Ursachen dieser Unterschiede im Detail ergründen zu können, geben diese den Unschärferahmen der Klimafaktoren-Methodik wieder. Die Abweichung von 1 % bis zu rund 10 % zwischen dem Klimafaktor des DWD und den eigenen Berechnung für den Gebäudestandort liegen damit im Rahmen.

Tabelle 10-15: Heizgradtage der Jahre 2013 und 2014 Flughafen Erfurt-Weimar für die Wetterbereinigung

Jahr /Quelle	Heizgradtage bei Heizgrenze 12 °C $G_{12}$	Vergleich zum langjährigen Mittel als Faktor
2013 IWU	1997	0,95
2014 IWU	1357	1,38

#### 10.1.4.3 Vergleich Außentemperatur mittels Heizgradtagen

Die nachfolgende Tabelle zeigt die monatlichen Heizgradtage für 2013 und 2014. Es wird deutlich, dass die berechneten Heizgradtage für den Standort der DWD-Station Flughafen Erfurt-Weimar deutlich über den beiden Stationen in der Leipziger Str. Erfurt liegen. Die Kennwerte der Stationen HLG auf dem Dach und in der benachbarten KMF liegen sehr dicht beieinander.

Aus den berechneten Heizgradtagen kann durch den Bezug auf das langjährige Mittel eine Witterungsbereinigung durchgeführt werden. Aus dem Monitoring stehen keine langfristigen Daten zur Verfügung. Eine langfristige Einschätzung kann daher nur mit den Daten des DWD erfolgen.

Die Jahressumme der Heizgradtage des langjährigen Mittels der Wetterstation Erfurt-Bindersleben werden vom *IWU Tool* mit  $G_{12}$  1894 Kd angegebenen. Damit ergeben sich für das Jahr 2013 ein Faktor von 1,05 und für das Jahr 2014 von 0,72. Dies bedeutet, dass der bereinigte Heizenergieverbrauch im Jahr 2013 5 % unter und im Jahr 2014 39 % über dem gemessenen Heizenergieverbrauch liegt. Die Differenz zwischen den Jahren 2013 und 2014 beträgt rund 600 Kd.



Tabelle 10-16: Heizgradtage im Vergleich verschiedenerer Wetterstationen in Erfurt

	HLG Leipziger Str..	KMF Leipziger Str.	DWD-Station Erfurt
Jan 2013	353	352	396
Feb 2013	340	338	377
Mrz 2013	379	381	427
Apr 2013	117	119	147
Mai 2013	25	26	46
Jun 2013	1	2	7
Jul 2013			
Aug 2013			
Sep 2013	13	17	26
Okt 2013	56	66	75
Nov 2013	201	209	241
Dez 2013	219	228	255
Summe 2013	1704	1738	1997
Jan 2014	288	291	325
Feb 2014	172	181	210
Mrz 2014	128	142	170
Apr 2014	34	36	54
Mai 2014	24	24	47
Jun 2014			1
Jul 2014			
Aug 2014			1
Sep 2014	1	1	6
Okt 2014	25	32	42
Nov 2014	162	172	188
Dez 2014	268	270	313
Summe 2014	1102	1149	1357

### 10.1.5 DIN V 4108-6

Tabelle 10-17 : Vergleich Monatssummen der horizontalen globalen Solarstrahlung HLG (Hörsaal und Laborgebäude) mit DIN V 4108-6 [56] in kWh/m².

		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
HLG	2013	21	30	83	105	114	163	187	138	85	52	24	19	1021
	2014	24	44	91	120	147	171	165	134	76	62	27	14	1072
DIN V 4108-6		31	58	97	148	194	195	201	168	114	71	34	20	974

### 10.1.6 TRY-Daten

Erfurt liegt im Gebiet des TRJ (TRY) 09 Thüringer Becken und sächsisches Hügelland. Die Repräsentanzstation des Gebietes ist Chemnitz. Die Daten für den Vergleich wurden von der Internetseite-

te des BBSR bezogen [57]. Durch die Nutzung des ebenso über die Seiten des BBSR verbreiteten Programms zur Berücksichtigung von Stadtklima oder Höheneffekte können Anpassungen vorgenommen werden. Der Vergleich mit diesen Daten ist interessant, da diesen Daten Grundlagen von Gebäudesimulation sind.

## 10.2 Heizenergie

Die Verteilung des Heizenergieverbrauchs nach Wochentagen zeigt eine deutliche Abhängigkeit. So ist der Verbrauch montags [grundsätzlich] höher als im Rest der Woche und am Wochenende ist der Verbrauch geringer als in der Woche.

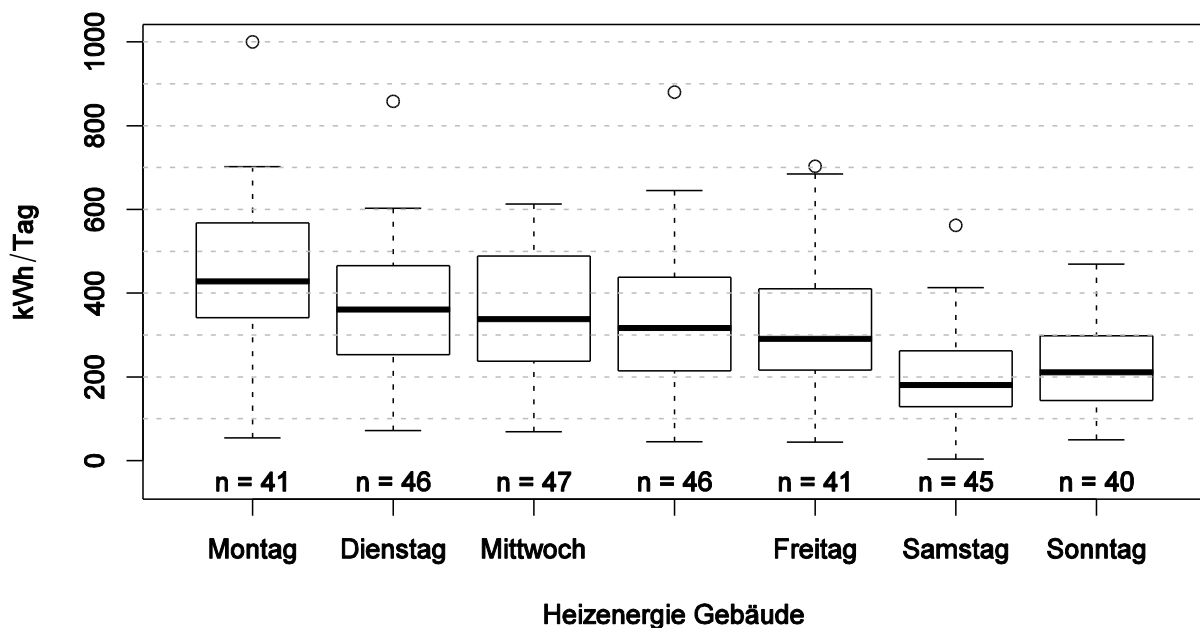
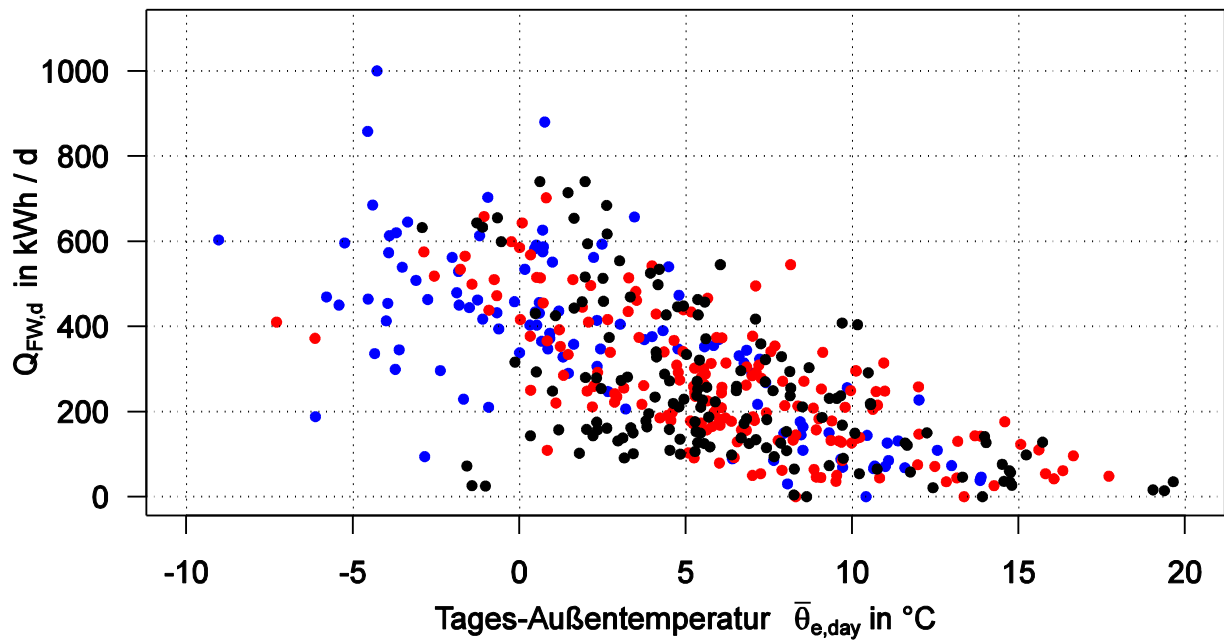


Abbildung 10-10: Verteilung des Endenergieverbrauchs pro Tag von 2013 bis 2015

### 10.2.1 Heizenergie und Außentemperatur



• 1. Jahreshälfte 2013 • Winter 2013/14 • Winter 2014/15

Abbildung 10-11: Endenergieverbrauch Heizen pro Tag als Funktion der mittleren Tages-Außentemperatur, nur für Betriebsmodus Heizen

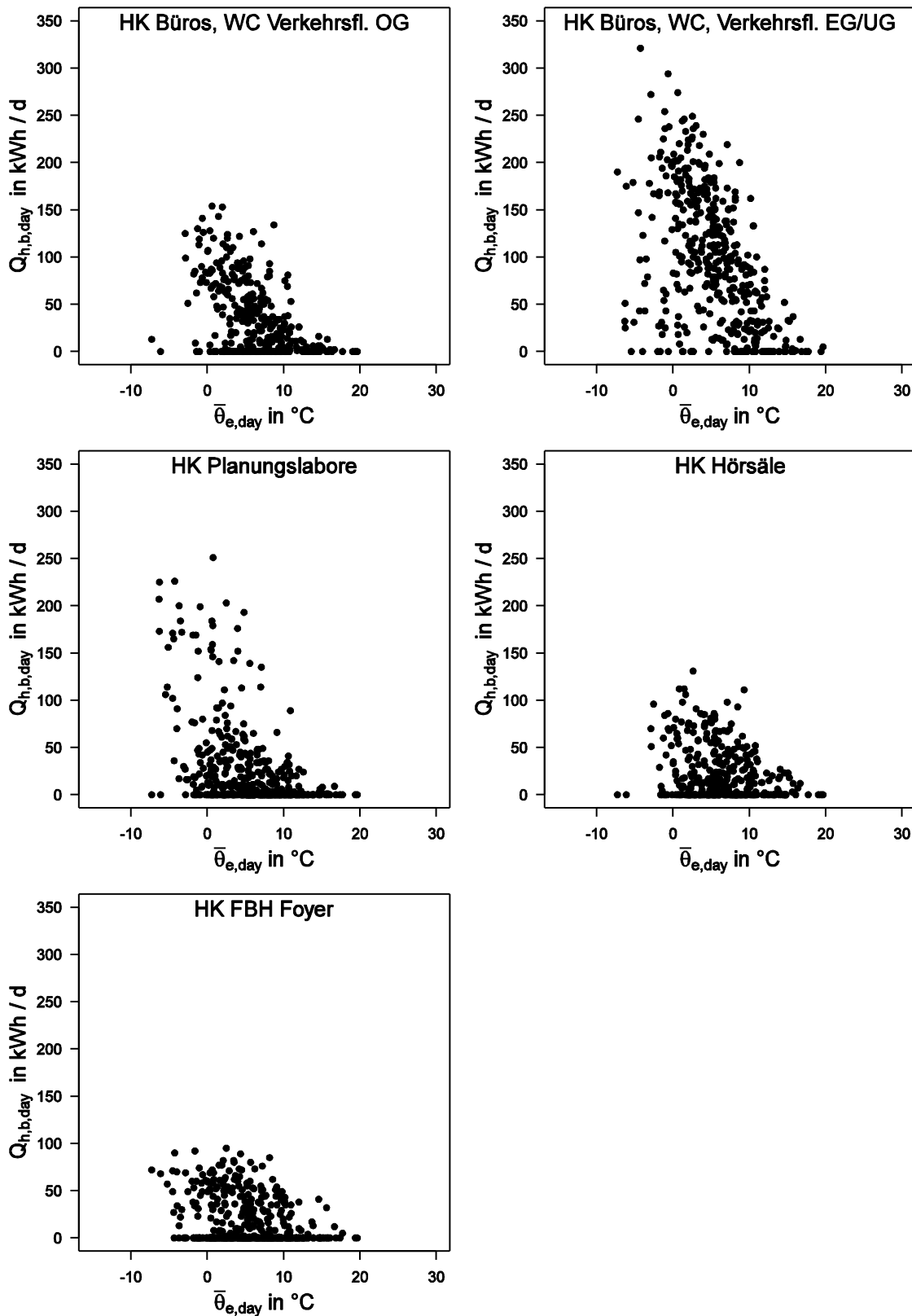


Abbildung 10-12: Tagesnutzwärmeverbrauch erfasst an Heizkreisen der statischen Heizflächen als Funktion der mittleren Tagesaußentemperatur von 2013 bis 2015.

Die Abbildung 10-11 zeigt den Tagesverbrauch Endenergie Wärme (Fernwärme) gegenüber der mittleren Tages-Außentemperatur. Der funktionale Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Verbrauch kann festgestellt werden. Eine hohe Streuung der Werte ist gut erkennbar. Zum Beispiel beträgt die Differenz zwischen dem größten und kleinsten Tagesverbrauch in der ersten

Jahreshälfte 2013 knapp 800 kWh/d. Werden die Mess-Ergebnisse der Heizkreise ausgewertet, zeigt sich für die einzelnen Heizkreise ebenso ein enger Zusammenhang von Tagesverbrauch und Außentemperatur.

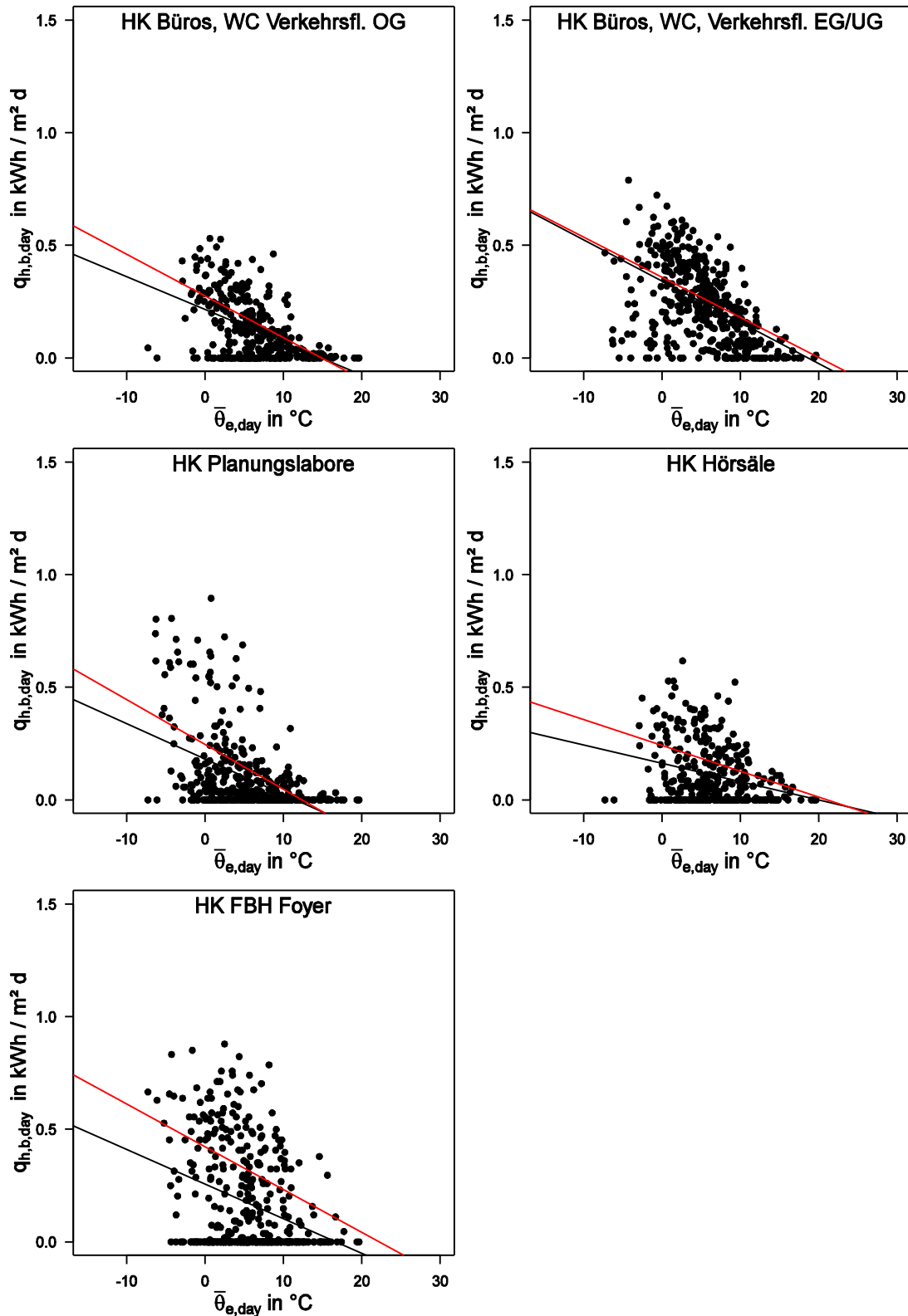


Abbildung 10-13: spezifischer Tagesnutzwärmeverbrauch erfasst an Heizkreisen der statischen Heizflächen als Funktion der mittleren Tagesaußentemperatur von 2013 bis 2015. Auswertung nur für Betriebsmodus „Heizen“, nur für Zähler aktiv, rote Linie: linear model ohne Wertpaare mit Verbrauch  $q_{h,b,day} = 0$ , schwarze Linie: linear model alle Wertpaare

Aus den NGF-Flächen der versorgten Räume, können jedem Heizkreis eine zu versorgenden Fläche zugeordnet werden, und damit flächenspezifische Verbrauchswerte gebildet werden.

Die Abbildung 10-13 zeigt den Tagesenergieverbrauch bezogen auf die dem Heizkreis zuzurechnende Nutzfläche. Dabei wird deutlich, dass der Heizkreis für die Räume im OG einen deutlich niedrigeren Verbrauch als die anderen HK aufweist. In der Darstellung sind je HK zwei Regressionsgraden des Heizenergieverbrauchs eingezeichnet. Die rote Linie repräsentiert die Beziehung aller Tage mit Heizenergieverbrauch und der Außentemperatur, die schwarze Linie hingegen die Beziehung aller Wertpaare, auch die ohne Heizenergieverbrauch, und der Außentemperatur. Aus dem Vergleich der Graden zwischen den Heizkreisen werden Unterschiede deutlich. So verlaufen die Graden für HK Erdgeschoss fast parallel zueinander. Im Obergeschoss ist der Anstieg deutlich unterschiedlich.

### 10.2.2 Heizenergie und Solarstrahlung

Die Außentemperatur ist von der Solarstrahlung abhängig. Nachfolgend soll der Einfluss der Solarstrahlung auf den Heizenergieverbrauch unabhängig von der Außentemperatur bewertet werden. Hierzu wird über die Datenreihe globale Solarstrahlung während des Heizbetriebes ausgewertet. Dazu werden Median, Q-25 und Q-75 bestimmt. Diese statistischen Kenngrößen bilden den Rahmen für die Bildung von vier Klassen zur ersten Einschätzung des Einflusses

Tabelle 10-18: statistische Kenngröße der Solarstrahlung für die gesamte Datenreihe und für die Datenreihen nur während des Heizbetriebes

	Alle	Nur Heizbetrieb
	kWh/m²a	
Minimum	0	0
Q-25	0,8601	0,583
Median	2,0187	1,1
Mittelwert	2,6804	1,6
Q-75	4,21	2,26
Maximum	8,42	7,7

### 10.2.3 Umweltenergie und Abwärmenutzung

Die durch die Wärmepumpe nutzbar gemachte Umweltenergie bzw. Abwärme aus der EDV-Kühlung betrug **5 MWh**.

Zusätzlich zur Endenergie Fernwärme wurden durch die Wärmepumpe **5,498 MWh** Umweltenergie bzw. Abwärme aus der EDV-Kühlung entzogen. Dem Gebäude wurden demnach in der Summe aus Fernwärme und Umweltenergie **50 MWh** zugeführt.

Die erfasste Nutzenergie (nach dem Verteiler) im Jahr 2014 betrug **42 MWh**. Die Differenz von **8 MWh** kann über drei Bilanzgrenzen nachvollziehbar dargestellt werden (siehe detaillierte Darstellung). Die Differenz zwischen Nutzenergie 23,00 und Endenergie 24,35 betrug 1,35 kWh/m² a.

## 10.2.4 Nutzenergie Heizen

Die Nutzenergie für Heizen, wird im Rahmen dieses Berichts vereinfacht definiert, als die Wärmeenergie die ab dem Heizkreisverteiler in das Gebäude geleitet wird. Der Nutzwärmeverbrauch für 2013 kann nicht vollständig erhoben werden, da in den ersten Monaten 2013 die Wärmemengenzähler aufgrund technischer Defekte nicht vollständig in Betrieb waren. Erst ab Mai 2013 konnten alle Zähler in Betrieb genommen werden.

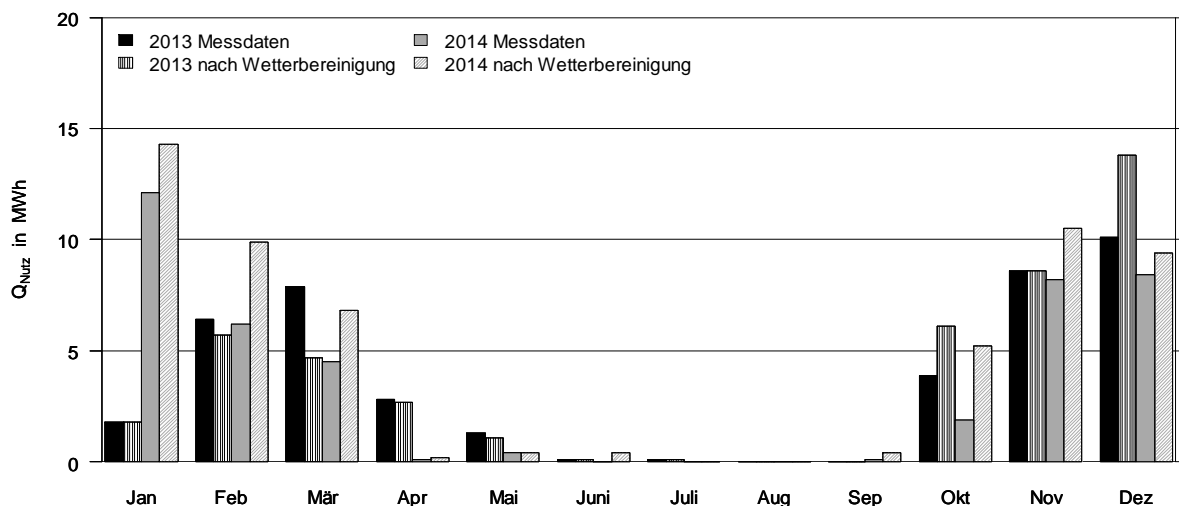


Abbildung 10-14: Nutzwärmeverbrauch 2013 und 2014 mit und ohne Wetterbereinigung (\*erst ab Mai 2013 alle Zähler funktionsfähig)

Tabelle 10-19 : spezifischer Nutzwärmeverbrauch, statische Heizung und Lufterhitzer

		2014	2015
Messwert		23,06	
korrigiert mit Klimafaktor	kWh/m²a	26,29	
korrigiert mit Heizgradtagen		32,16	

Der gemessene spezifische Nutzwärmeverbrauch des Gebäudes im Jahr 2014 betrug 23,06 kWh/m²a bzw. 42 MWh/a. Damit liegt der Nutzenergieverbrauch unter dem Endenergieverbrauch für Fernwärme.

Im Rahmen der Antragstellung für dieses Forschungsprojekt wurde ein **Nutzenergiebedarf** des Gebäudes nach Maßgabe der Normenreihe DIN V 18 599 für Heizen von **30 kWh/m²** ausgewiesen.

## 10.2.5 Verteil- und Übertragungsverluste Heizen

Ausgehend von der Endenergie- und Umweltenergiequellen über Wärmepumpen und Verteilung können die Verluste in der Wärmeverteilung ermittelt werden. die Wärmeverluste zwischen Heizungsverteiler und den Räumen bleiben unberücksichtigt.



Es können aus der Zählertopographie 4 Bilanzkreise gebildet werden. In der Energieflussrichtung kann aus der Differenz zwischen den Zählern der Verteilverlust bestimmt werden. Dieser Verlust wird vor allem in der Heizungszentrale wirksam und führt dort auch zu hohen Raumtemperaturen. Nachfolgenden werden für das Betriebsjahr 2014 die Bilanz dargestellt.

Die **erste Bilanz** ergibt sich aus der Summe der Zähler nach der Übergabe der Fernwärme und den Verbrauchern *Antrieb Wärmepumpe, Nacherhitzung RLT-Heizkreis, Nacherhitzung Verteiler*. Die Differenz **beträgt 2,365 MWh**.

Die **zweite Bilanz** kann über die Energieströme der Wärmepumpe gebildet werden. Aus der Differenz von Wärmeinput [Wärmezustrom] als Summe aus *Antrieb Wärmepumpe* und *Energie aus Speicher* zu der von der Wärmepumpe abgegebenen Energie. Die Differenz zwischen Input und Output beträgt **2,6 MWh**. Im Verlauf des Monitorings wurde festgestellt, dass aus der Wärmepumpe sinnwidrig Wärme in den Speicher eingeleitet wird. Diese Wärmemenge konnte mit dem unidirektionalen Wärmemengenzähler nicht erfasst werden.

Die **dritte Bilanz** kann aus dem Wärmestrom in den Heizungsverteiler und dem aus Heizungsverteiler (Nutzenergie) gebildet werden. Die Differenz zwischen Nutzenergie (gemessen nach dem Verteiler) und dem Energiefluss in den Verteiler beträgt im Jahr 2014 – 2,97 MWh und spezifische - 1,63 kWh/m²a. Die vom Verteiler an die RLT Anlagen geleitete Wärmemenge wurde am Verteiler nicht mittels erfasst.

Der Verlust in der Verteilung von Endenergie- und Umweltenergiequelle betrug im Jahr 2014 betrug 8 MWh.

Durch die Bilanzierung der Energiemenge für die *Nachheizung RLT* und dem Verbrauch an den RLT-Geräten kann festgestellt werden, dass die nachgespeiste Energiemenge, die nur einer Teilmenge der insgesamt den RLT-Geräte zuleitet Energie ist, höher ist als die Summe der an den RLT-Geräten gemessenen Wärmemenge was auf Wärmeverlust in der Verteilung zu den RLT-Geräten oder eine Rückspeisung in den Verteiler. Die Differenz zwischen *Nachheizung RLT* und RLT-Geräten betrug **1 MWh**.

Bezogen auf den Nutzenergieverbrauch, gemessen am Heizungsverteiler, beträgt der Verteilverlust  $[7,962/42,043 =]$  18,9 % und gibt damit Anlass für weitere Optimierungsmaßnahmen. Der Verlust wird zum überwiegenden Teil innerhalb der thermischen Hülle wirksam. Aufgrund einer Fehlfunktion im Betrieb der Wärmepumpe wurde evtl. auch Wärme über den Speicher in die Umwelt eingeleitet.

Tabelle 10-20 : Bilanzierung Übertragungs- und Verteilverluste für 2014

	Input	Output	Differenz
<b>Bilanz 1</b>			
Fernwärme	44,507		
Antrieb WP		25,815	
Nachheizung Verteiler		5,679	
Nachheizung RLT		10,647	
Summen/ Differenz	44,507	42,141	2,366
<b>Bilanz 2</b>			
Antrieb AWP	25,815		
Entzug aus Speicher	5,498		
Bereitstellung AWP		28,686	
Summen/ Differenz	31,313	28,686	2,627
<b>Bilanz 3</b>			
Bereitstellung AWP	28,686		
Nachheizung Verteiler	5,679		
Nachheizung RLT	10,647		
Statische Heizflächen		32,958	
RLT		9,085	
Summen/ Differenz	45,015	42,043	2,969
<b>Bilanz Input-Output</b>			
Fernwärme	44,507		
Entzug aus Speicher	5,498		
Statische Heizflächen		32,958	
RLT		9,085	
Summen/ Differenz	50,005	42,043	7,962

### 10.2.6 Heizbetrieb

Tabelle 10-21 : Zeiträume des Betriebsmodus Heizen

	Einheit	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
2013	Tage	23	28	31	20	10,5	0	0	0	0,4	20	29	31	193
2014		31	28	30	0	8,6	0	0	0	1,1	19	30	31	179
2015		31	28	30	12	0,0								101

### 10.2.7 Hilfsenergie Heizen

Unter Hilfsenergie für Heizen wird die Elektroenergie  $W_h$ , verstanden, die notwendig ist um die von Heizungssystemen zusätzlich für **Pumpen**, Ventilatoren, **Regelung**, **Elektronik** usw. verwendet wird, um die Nutzenergiebereitstellung zu ermöglichen [53].

Dies umfasst die Umwälzpumpen in der Erzeugung, Speicherung und Verteilung sowie erfassbare regelungstechnische Einrichtungen.

Da mit dem System geheizt oder gekühlt werden kann, muss eine zeitliche Differenzierung vorgenommen werden. Dies bedeutet, dass der gemessene Energieverbrauch der Hilfsenergie in Kühlen und Heizen getrennt wird. Dafür wird das diskrete Signal der GLT „zentrale Betriebsart“ ge-

nutzt. Der Verbrauch innerhalb des Zeitraums wird dem Heizen wird der Hilfsenergieheizungen zugerechnet.

Der Energieverbrauch von Systemkomponenten die entweder nur dem Heizen oder dem Kühlen dienen wird während des gesamten Jahres der entsprechenden Hilfsenergieenergieart zugerechnet. Die Pumpen der „Adsorptionswärmepumpe“ sowie „Einspeisung Verteiler“ die nur dem Heizen dienen, werden vollständig dem Heizen zugeordnet. Für die Verbrauchsermittlung wird die Differenz aus dem letzten und dem ersten bekannten Zählerwert in einer Periode gebildet.

In den nachfolgenden Darstellungen werden Pumpen zur Versorgung der RLT-Anlagen und Elektroenergieverbrauch MSR/GA nicht mit einbezogen.

Tabelle 10-22: Hilfsenergie für Heizen, ohne Pumpen RLT-Anlage, 2015 unvollständig

		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
2013		495	681	745	347	117	11	11	12	16	476	585	721	4217
2014	kWh	642	511	530	11	55	21	11	11	15	581	767	713	3868
2015		620	664	570	208									2062

Für 2013 und 2014 zeigt sich aufgelöst nach Verbrauchern die nachfolgende Verteilung am Verbrauch (vgl Abbildung 10-15 Abbildung 10-16).

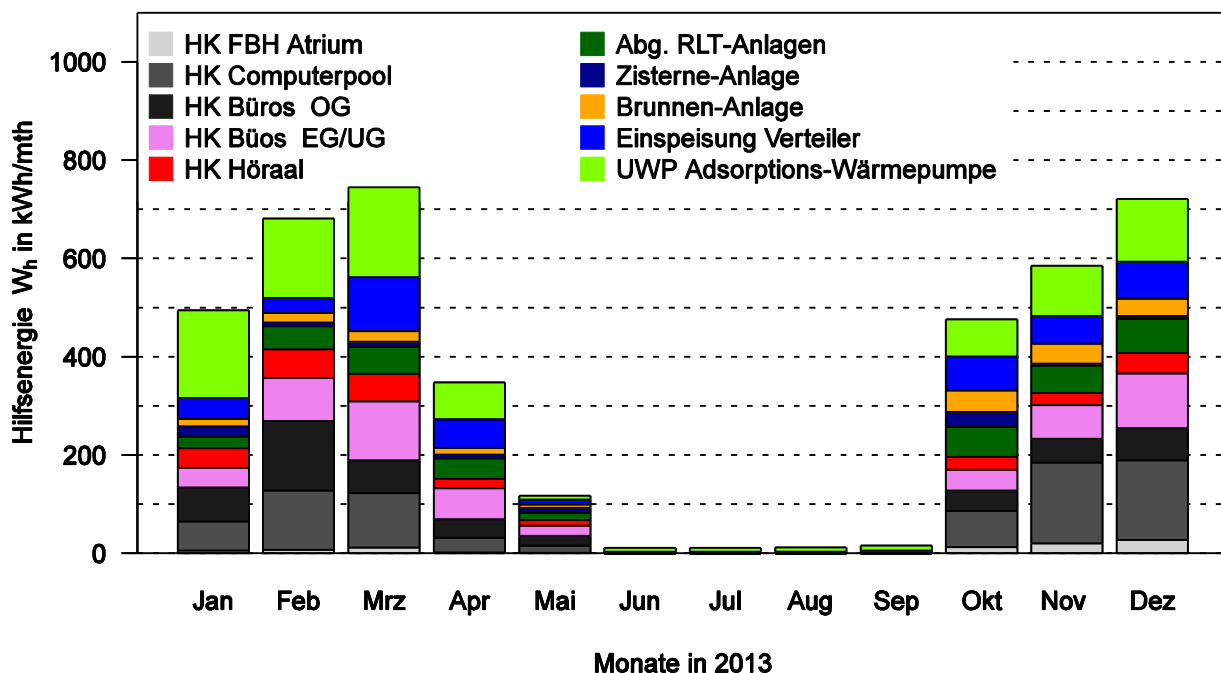


Abbildung 10-15: Monatlicher Hilfsenergieverbrauch während Betriebsmodus Heizen im Jahr 2013

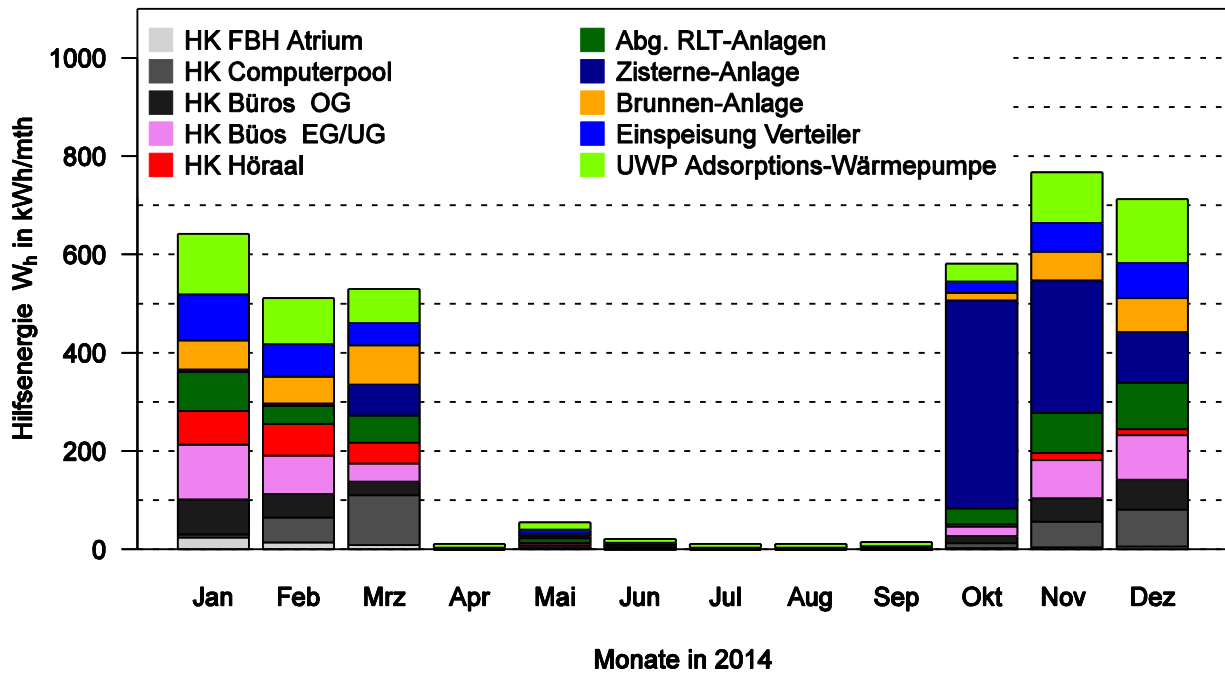


Abbildung 10-16: Monatlicher Hilfsenergieverbrauch während Betriebsmodus Heizen im Jahr 2014

Im zweiten Halbjahr kann ein ungewöhnlich hoher Verbrauch der Zisternen-Anlage festgestellt werden.

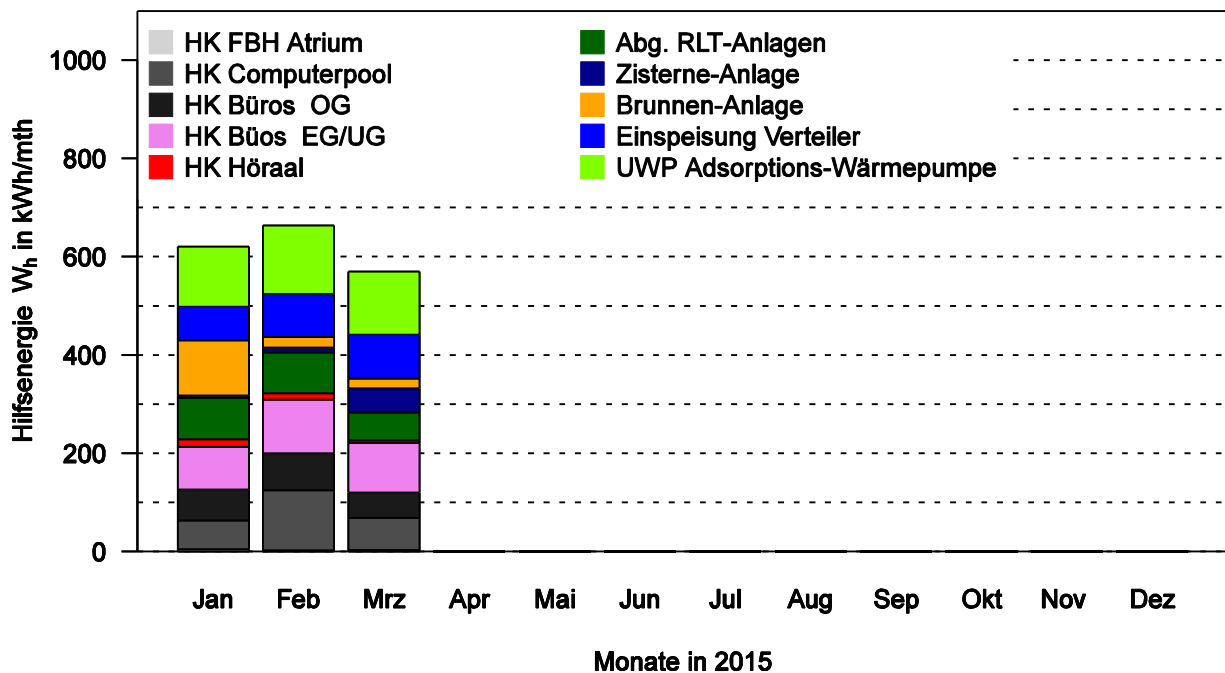


Abbildung 10-17: Monatlicher Hilfsenergieverbrauch während Betriebsmodus Heizen im Jahr 2015

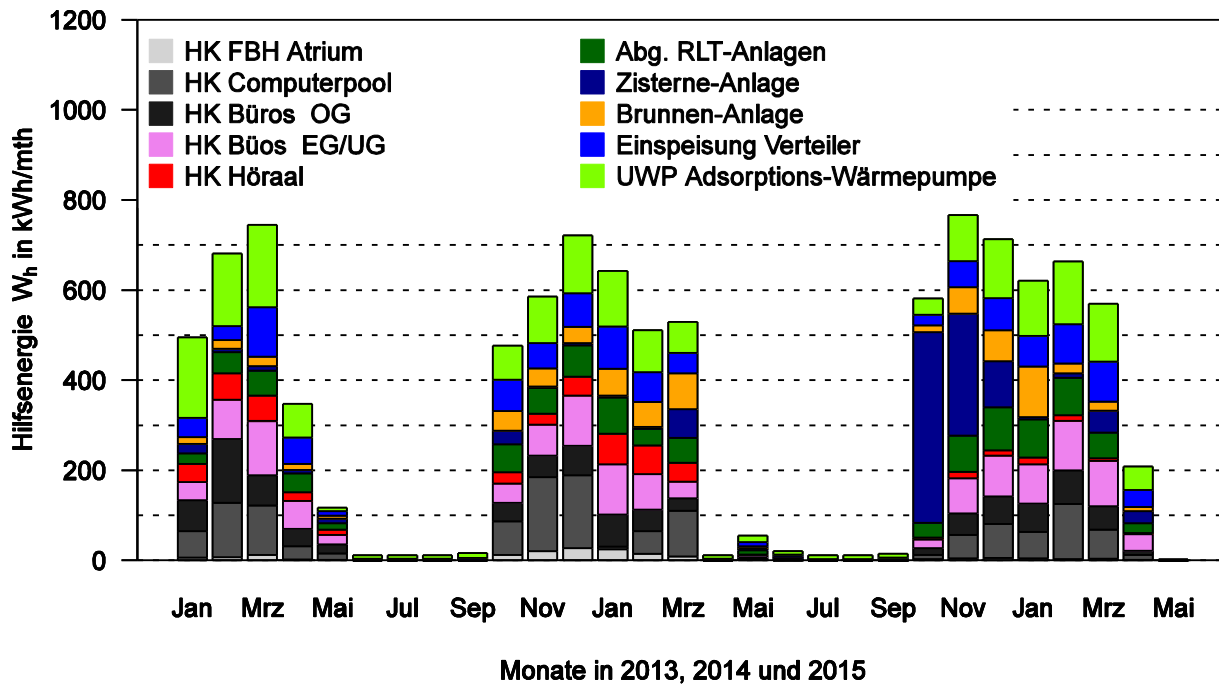


Abbildung 10-18: Monatlicher Hilfsenergieverbrauch während Betriebsmodus Heizen für die Jahre 2013, 2014 und 2015

### 10.3 Kühlenergie

Die Hilfsenergie für Kühlen umfasst die elektrische Energie, die zur Bereitstellung und Verteilung der Kühlenergie notwendig ist. Die Pumpen als Verbraucher der elektrischen Energie, dienen im Heizfall auch der Bereitstellung und Verteilung von Heizenergie.

Die eingesetzten Zähler für elektrische Energie erfassen kontinuierlich den Verbrauch, ohne Berücksichtigung ob dem Gebäude Wärme zu- oder abgeführt wird. Um den Verbrauch dem Heizen oder Kühlen zuzuordnen, wird das Steuersignal für Freigabe der Kühlung genutzt. Immer wenn diese Freigabe vorliegt, wird der Verbrauch der elektrischen Energie der Hilfsenergie Kühlen zugeordnet. Durch die übergeordnete Regelung oder manuelle Vorgabe wird die Freigabe für Kühlung gegeben. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Zeiträume in denen dies der Fall war.

Der Verbrauchsverlauf zeigt das zuerwartende saisonale Muster.

Tabelle 10-23 : Hilfsenergie für Kühlen, ohne Pumpen RLT, ohne EDV-Kühlung, 2015 unvollständig

		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
2013		0	0	0	0,6	31	296	1083	873	158	1,2	0	0	2442
2014	kWh	0	0	0	0	83	486	752	677	393	121	0	0	2512
2015		0	0	0	64	298	362	687	358	0	0	0	0	1770

Für 2013 und 2014 zeigt sich aufgelöst nach Verbrauchern die nachfolgende Verteilung am Verbrauch (vgl. Abbildung 10-19, und Abbildung 10-20).

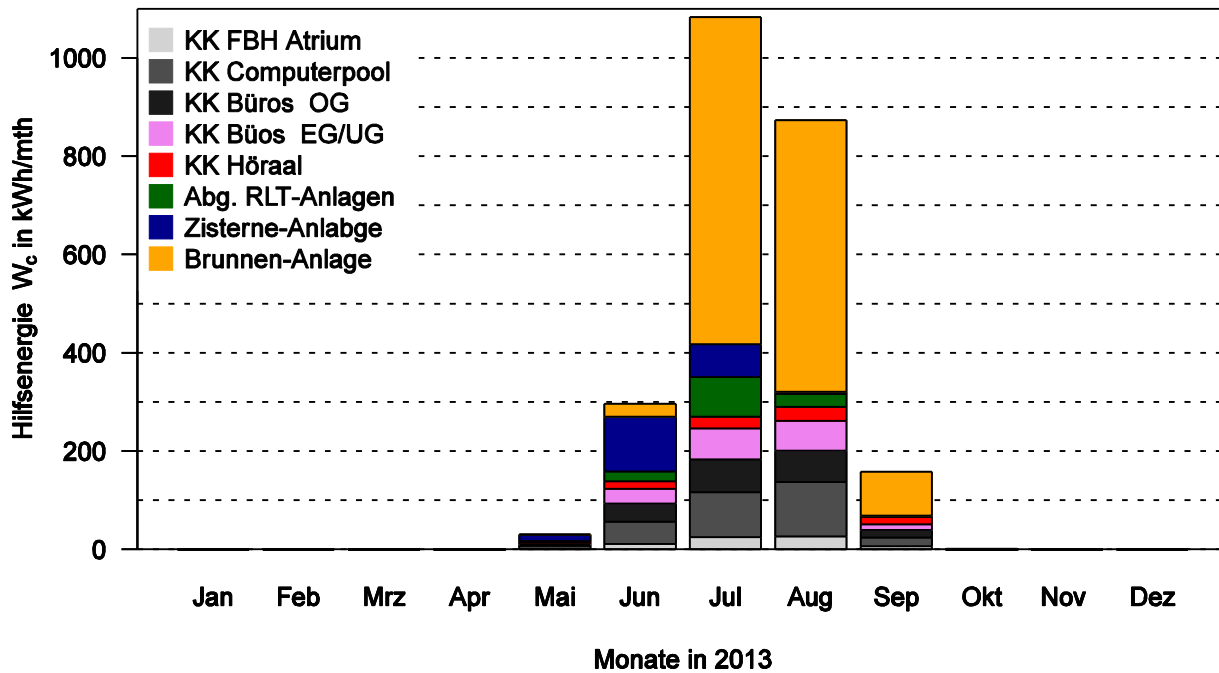


Abbildung 10-19: Monatlicher Hilfsenergieverbrauch für Kühlen im Jahr 2013

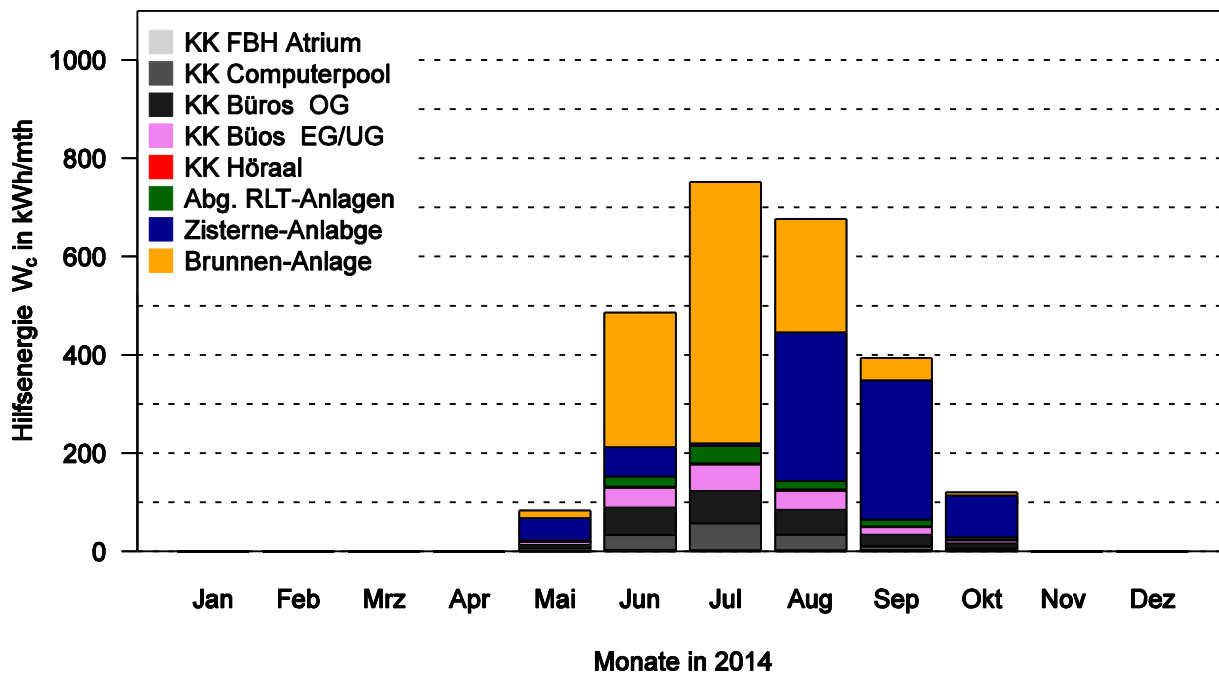


Abbildung 10-20: Monatlicher Hilfsenergieverbrauch für Kühlen im Jahr 2014

Deutlich ist erkennbar, dass die Brunnen- und Zisternen-Anlage die größten Verbraucher sind und über die Hälfte des Gesamtverbrauchs ausmachen. Diese Pumpen sind der Erschließung der Umweltenergiesenken zuzuordnen. Die Pumpen der Kühl-Kreise (KK) dienen der Verteilung im Gebäude, deren Verbrauch ist sehr gering.

## 10.4 Thermoaktive Bauteilsysteme TABS

Mittels Thermographiekamera wurde das Aufheizverhalten der Decken beobachtet. Kurz nach der herbeigeführten Änderung des Sollwertes über den aktuellen Temperaturwert öffnet das Raumven-

til und gibt die Durchströmung frei. Die Kapillarrohrmatten werden durch das warme Wärmeträgerfluid durchströmt und erwärmen die Decke. In der Abbildung 11-4 ist die anfängliche Erwärmung der Kapillare gut zu erkennen. Bereits in weniger als 4 Minuten ist die Platte zur Hälfte erwärmt. Innerhalb von sieben Minuten hat die Decke die Betriebstemperatur erreicht.

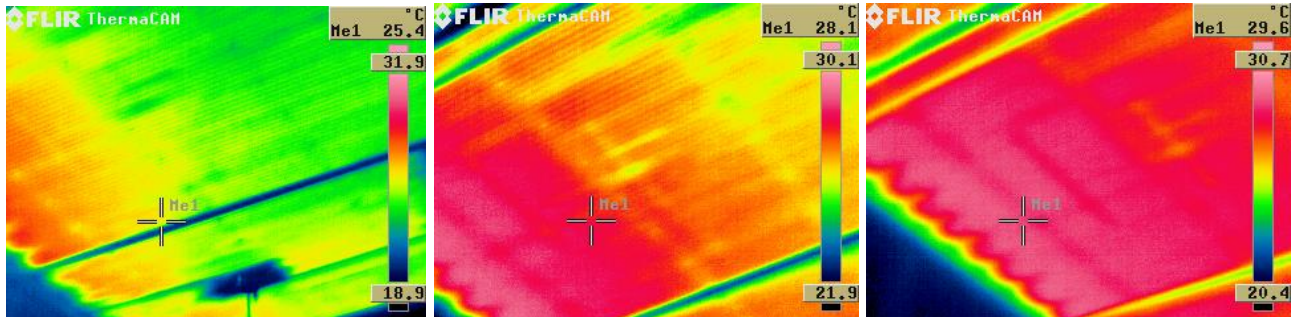


Abbildung 10-21: Zeitlicher Verlauf der Erwärmung einer Heizdecke am 7.2.2013 von links:  
um:19:04,19:06,19:09 Raum 1.E.14

Diese schnelle Änderung der Oberflächentemperatur ist vermutlich mit anderen Systemen wie der Fußbodenheizung oder einer BKT nicht erreichbar. Die Änderungsgeschwindigkeit der operativen Raumtemperatur konnte mit den zur Verfügung stehenden Messmittel, dem Globometer, nicht sicher erfolgen, da diese nur für stationäre Raumzustände anwendbar ist. Es gilt die Empfehlung die Kugeln 20 Minuten vor der Messung im Raum anzupassen. Die mittels Thermographieaufnahme festgestellte Temperatur der Kugel betrug fünf Minuten nach dem Erreichen der Betriebstemperatur an der Oberseite noch  $\theta_{S,Kugel} \approx 20 \text{ °C}$ .

## 10.5 Speicher

### 10.5.1 Situationsbeschreibung und Problemstellung

Im Zentrum des hydraulischen Systems steht ein Speicher mit einem Fassungsvermögen von  $V = 2,5 \text{ m}^3$ . Der Speicher verbindet die verschiedenen Umweltenergiequellen bzw. Senken, die EDV-Kühlung sowie die Adsorptionswärmepumpe miteinander. Im Sommer wird aus dem Speicher direkt das Gebäude gekühlt. Durch das Speichervermögen wirkt er dämpfend auf das Betriebsverhalten. Im Winter dient der Speicherinhalt der AWP als Energiequelle und wird durch die EDV-Kühlung und die Umweltenergiequellen gespeist. Insgesamt sind drei Stromkreise in den Speicher eingebunden.



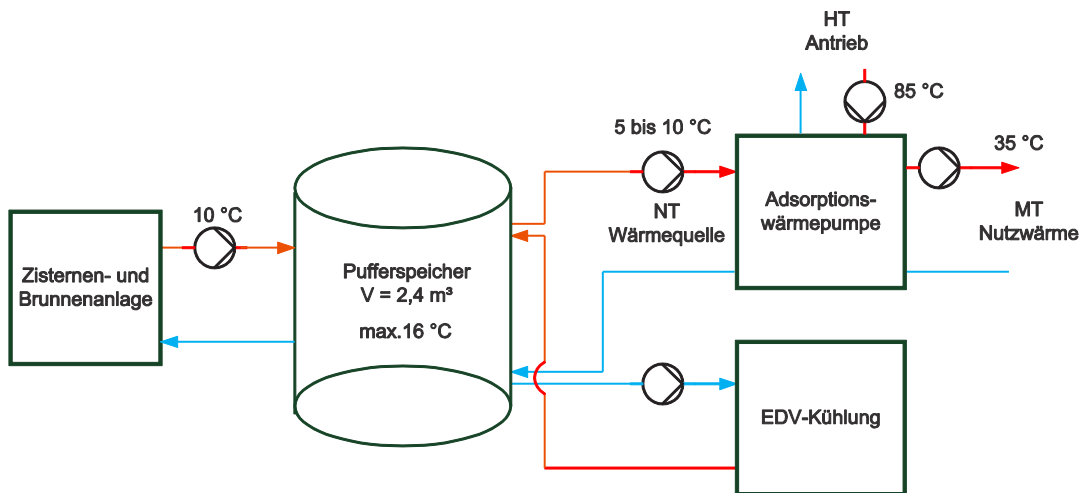


Abbildung 10-22: Hydraulische Einbindung des Speichers vereinfachtes Schema



Abbildung 10-23: Speicher kurz nach der Anlieferung

Der Speicher erwärmte sich sinnwidrig und musste gekühlt werden um die EDV-Kühlung sicherzustellen. Mit der Rückkühlung des Speichers von der Grenztemperatur  $\theta \approx 22\text{ °C}$  auf die Quellentemperatur  $\theta \approx 15\text{ °C}$  (siehe Abbildung 10-24) wurden ca. 20 kWh/d aus dem Gebäude geleitet.

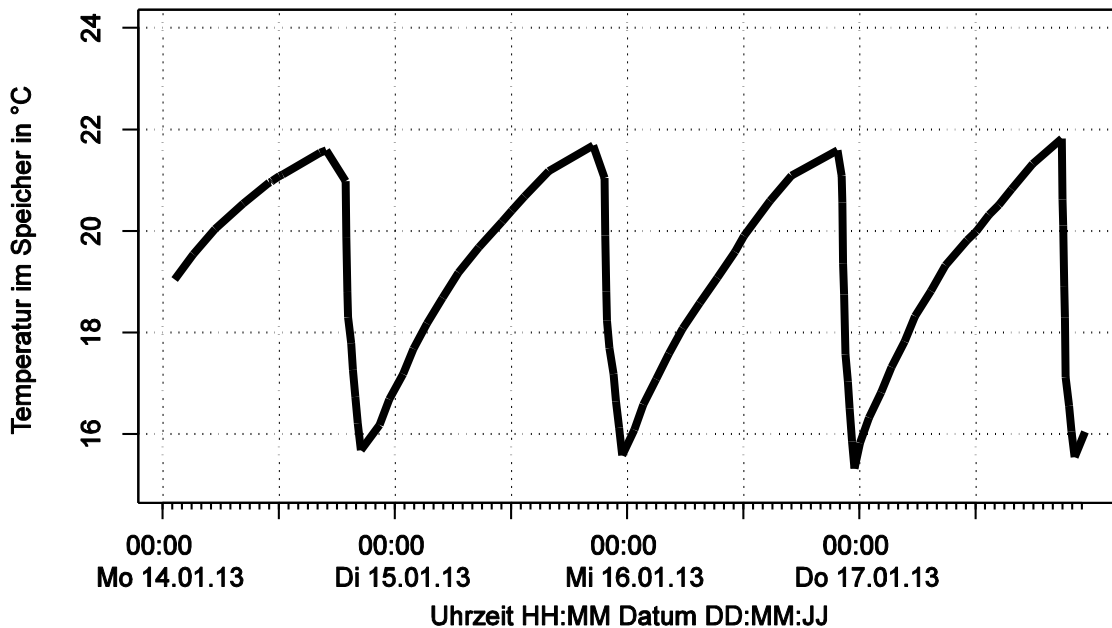


Abbildung 10-24: Typischer zyklischer Temperaturverlauf im Speicher

### 10.5.2 Ungenügende Wärmedämmung Speicher

Zu Beginn des Anlagenbetriebes im Januar 2013 zeigte sich aus nicht nachvollziehbarem Grund eine Erwärmung des Speichers. Auch bei abgeschalteter Pumpe der wärmeeintragenden EDV-Kühlung kam es zu einer schnellen Erwärmung. Durch den Betrieb der Wärmepumpe wäre ein Absinken der Temperatur zu erwarten gewesen.

Als ein Grund für die Erwärmung wurde eine unzureichende Wärmedämmung bei gleichzeitig hohen Temperaturen im Heizungsraum vermutet. Die Raumlufttemperatur im Heizungsraum betrug in Höhe der Oberkante des Speichers bis  $\theta_i = 28^\circ\text{C}$ . Die Erwärmung des Heizungsraums ist eindeutig vom Betrieb der Wärmepumpe abhängig und schwank im Tagesverlauf Wärmepumpe um 1 Kelvin. Es stellte sich heraus, dass die Wärmedämmung des Speichers nur  $d = 1,8\text{ cm}$  mit  $\lambda = 0,036\text{ W/m}^2\text{K}$  betrug. Dies war weniger als in der Leistungsverzeichnis beschrieben  $d = 3,2\text{ cm}$ . Die Dämmung war zunächst so konzipiert, dass eine Tauwasserbildung im Sommer vermieden werden sollte. Der Wärmeeintrag wurde durch Baubeteiligte zunächst sogar als positiv gewertet, da sich hiermit die Temperatur der Wärmequelle für die Wärmepumpe erhöht.

Mit einer Wärmestromplatte wurde im Januar 2013, bei einer Temperaturdifferenz von 10 Kelvin zwischen Raum und Speicher, ein Wärmestrom von  $17,5\text{ W/m}^2$  auf der Speicheroberfläche festgestellt. Dies konnte die beobachtete Erwärmung des Speichers zum Teil erklären. Im späteren Projektverlauf wurde festgestellt, dass die über die Wärmepumpe Wärme in den Speicher eingeleitet wurde.

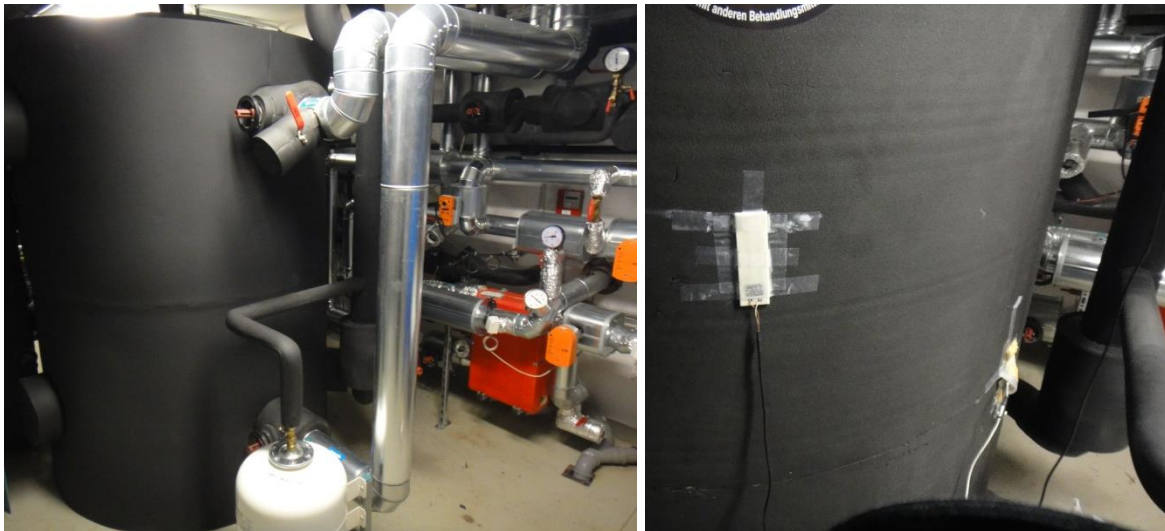


Abbildung 10-25: links: Speicher im Heizungsraum direkt neben der Fernwärmeübergabe, rechts Wärmestrommessplatte auf Speicher

Nach einem Hinweis durch das Monitoring Team auf diesen Fehler im Januar 2013, wurde durch den Bauherrn eine nachträgliche Wärmedämmung veranlasst. Der Speicher wurde am 4.06.2013 mit einer zusätzlichen Wärmedämmung ca.  $d = 5$  cm starken Hülle umschlossen. Nach Erhöhung der Dämmung auf  $d = 6,8$  cm konnte kein bedeutender Wärmestrom in den Speicher festgestellt werden.

### 10.5.3 Vertauschte Klappenantriebe

Im Verlauf der Inbetriebnahme wurden im Zusammenhang mit dem Speicher unklare Betriebszustände erkannt. Kurz nach der Inbetriebnahme wurde festgestellt, dass der Speicher unzureichend wärmegeklämt war, was zu einer Erwärmung durch die Abwärme des Heizungsraum führte. Im Verlauf der Inbetriebnahme der Wärmepumpe speiste diese im ungewollt intermittierenden Betrieb Wärme sinnwidrig in den Speicher, was ebenfalls zu Erwärmung führte. Dies warne Gründe, warum die vertauschten Klappen erst im Jahr 2014 durch das Monitoring-Team festgestellt wurden. Die Hydraulik zwischen Umweltquellen und Speicher sind mit einer eine Sommer- und Winterschaltung ausgerüstet, sodass je nach Anforderung der Speicher möglichst gekühlt oder erwärmt wird. Damit soll erreicht werden, dass beispielsweise das kühle Wasser am Boden des Speichers dirket zu den Verbrauchern im Gebäude geleitet wird. Im Winter soll möglichst warmes Wasser oben direkt zur Wärmepumpe geleitet werden. Die Abnehmer aus dem Speicher sind ohne Umschaltung fest an den Speicher angeschlossen.

## 10.6 EDV-Kühlung Prozesskühlung

Die EDV-Kühlung wird in Hinblick auf die Bilanzierung der Kühlenergie und Hilfsenergie für Kühlen als Prozesskühlung aufgefasst. Hinsichtlich der thermischen Energiebilanz des Gebäudes trägt die Kühlung der Serverschränke einen bedeutenden Anteil am Kühlaufwand und damit auch am Hilfsenergieaufwand für die Bereitstellung der Umweltenergiesenke. Namentlich für die zwei Brunnenpumpen, die Zisternenpumpe und die zugehörigen drei Speicherladepumpen. Dies hat zur Folge, dass die Energiekennwerte nicht singulär aussagefähig für den Gebäudeentwurf und nur in Zusammenhang mit der Prozesskühlung gesehen werden können. So kann während der aktiven

Gebäudekühlung, der Anteil der Hilfsenergie, die für EDV-Kühlung ursächlich ist, nicht von der Energiemenge Hilfsenergie, die für die Gebäudekühlung alleine notwendig wäre, getrennt werden. Die nachfolgenden Tabellen stellen den Hilfsenergieverbrauch der Pumpe für Server Kühlung während der Kühlung des Gebäude dem des gesamten Jahres für Kühlen gegenüber.

In den Betriebsjahren 2014 und 2015 lag dieser Anteil bei 30 %. Was bedeutet, dass 70 % der Antriebsenergie für die Pumpe zur EDV-Kühlung außerhalb der Betriebsmodus „Gebäudekühlung“ verbraucht wurden. Im Vergleich zur gesamten Energieverbrauchs der Pumpen während der Kühlung ist der Hilfsenergieeinsatz mit rund 10 % weniger bedeutsam.

Tabelle 10-24 : Energieverbrauch Umwälzpumpe EDV-Kühlung

Jahr	Einheit	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
2013	kWh	100	96	87	56	58	52	58	14	56	67	30	39	714
2014		37	50	56	25	39	22	18	60	102	81	47	28	563
2015		26	42	76	81	60	17	19	0	0	0	0	0	330

Tabelle 10-25 : Energieverbrauch Umwälzpumpe EDV-Kühlung während Freigabe Kühlung Gebäude

Jahr	Einheit	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
2013	kWh	0	0	0	0	1	27	51	9	2	0	0	0	91
2014		0	0	0	0	5	17	18	60	102	10	0	0	213
2015		0	0	0	4	44	17	19						84

## 10.7 Adsorptionswärmepumpe

Nach Fertigstellung des Gebäudes und Inbetriebnahme der Anlagentechnik wurde mit dem Monitoring der Adsorptionswärmepumpe begonnen. Dies war zu bis März 2013 nur erschwert möglich da nicht alle Wärmemengenzähler funktionstüchtig waren. Erst ab dem 20. Janaur 2013 konnte der WMZ NT genutzt werden.

Anhand der mittels Visualisierung der GLT beobachtenden Temperaturen im Vor- und Rücklauf konnte auf eine Wärmeeinleitung in den Speicher geschlossen werden. Da der WMZ NT unidirektional ausgeführt wurde, mit einer Wärmeeinleitung in den Speicher wurde nicht gerechnet, musste die negative Leistung berechnet werden. Dies kann aus den Messwerten des WMZ (Temperatur im Vor- und Rücklauf sowie dem Volumenstrom erfolgen. Die Ergebnisse zeigten, dass in den Speicher Wärme zurückgeleitet wird. Aus dem geglätteten Verlauf der thermischen Leistung wird deutlich, dass die Antriebsleistung teilweise über der Nutzleistung liegt. Es wird deutlich, dass die Leistung aus der Umweltquelle teils negativ, und damit Energie in den Speicher eingeleitet wird.

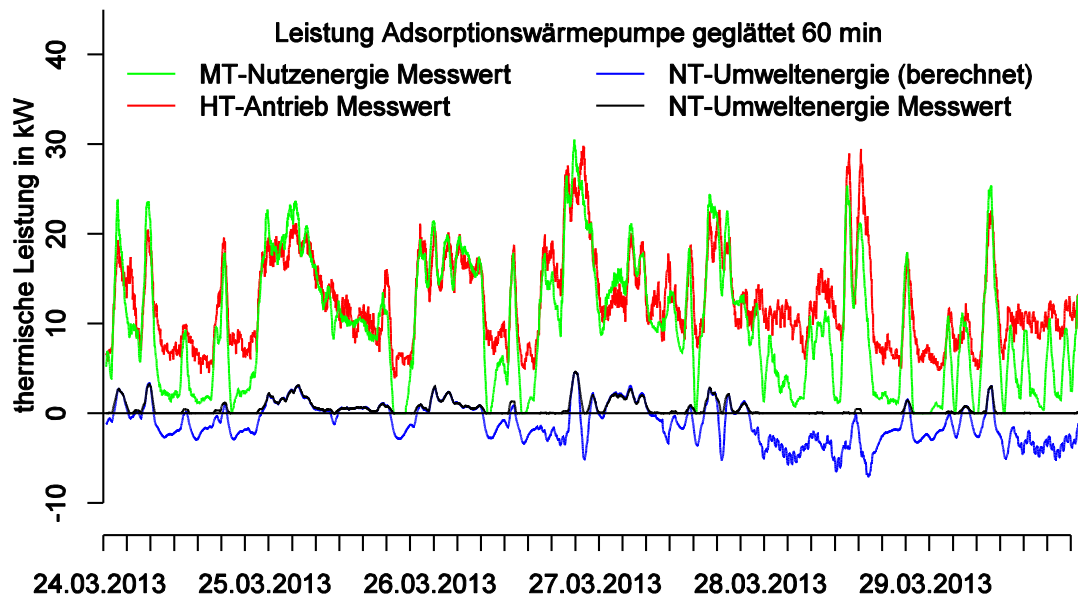


Abbildung 10-26: Zeitlicher Verlauf der thermischen Leistung der defekten Adsorptionswärmepumpe im Frühjahr 2013

Die Antriebs- und Lieferseite (Hochtemperatur und Mitteltemperatur) funktionierten sinnhaft. Es wurde Wärme aus dem Hochtemperaturkreis entnommen und Wärme in den Mitteltemperaturkreis abgegeben. Es kam nicht zu einer Warn-, Fehler- oder Störmeldung. Auch die zunächst falsche Ansteuerung durch die übergeordnete Regelung intermittierende (AN-AUS) in wenigen Minuten Abstand der AWP behinderte die Analyse.

Ohne Monitoring wäre der Fehler wahrscheinlich erst verzögert festgestellt worden. Nach Auswertung der Betriebsdaten wurde der Hersteller der AWP durch den ausführenden Heizungsbauer zur Überprüfung und gegebenenfalls Reparatur aufgefordert. Zunächst wurde die AWP durch den Hersteller überprüft und dann am 26.06.2013 ausgetauscht.

Der Adsorptionswärmepumpe kann ein Einschaltbefehl und die Solltemperatur vorgegeben werden.

Die thermische Effizienz der Adsorptionswärmepumpen kann, analog zu dem der elektrisch betriebenen Wärmepumpen, aus dem Verhältnis von Nutzenergie zu Antriebsenergie (Aufwand) ausgedrückt werden. Der zeitliche Bezugszeitrahmen ist ja nach Untersuchungsgegenstand unterschiedlich gefasst und wird als COP, Arbeitszahl, Jahresarbeitszahl oder Season Performance Factor bezeichnet. Im Rahmen dieser Untersuchung erfolgt die Bewertung auf Tages-, Monat- und Jahresbilanz. Die Kenngrößen sind die Jahres- Monats- und Tagesarbeitszahl. Die zu erwartenden thermischen Arbeitszahlen liegen zwischen 1,1 und 1,5. Die Arbeitszahl ist von der Temperatur der Niedertemperatur Wärmequelle, der Antriebstemperatur und der Liefertemperatur abhängig. In der Wärmepumpe sind zwei Betriebsmodi „Power-Mode“ und „Eco-Mode“ angelegt. Der Betriebsmodus „Power-Mode“ erhöht die thermische Leistung bei geringerem COP. In der nachfolgenden Abbildung ist für verschiedene Antriebstemperaturen der COP und die thermische Leistung dargestellt.

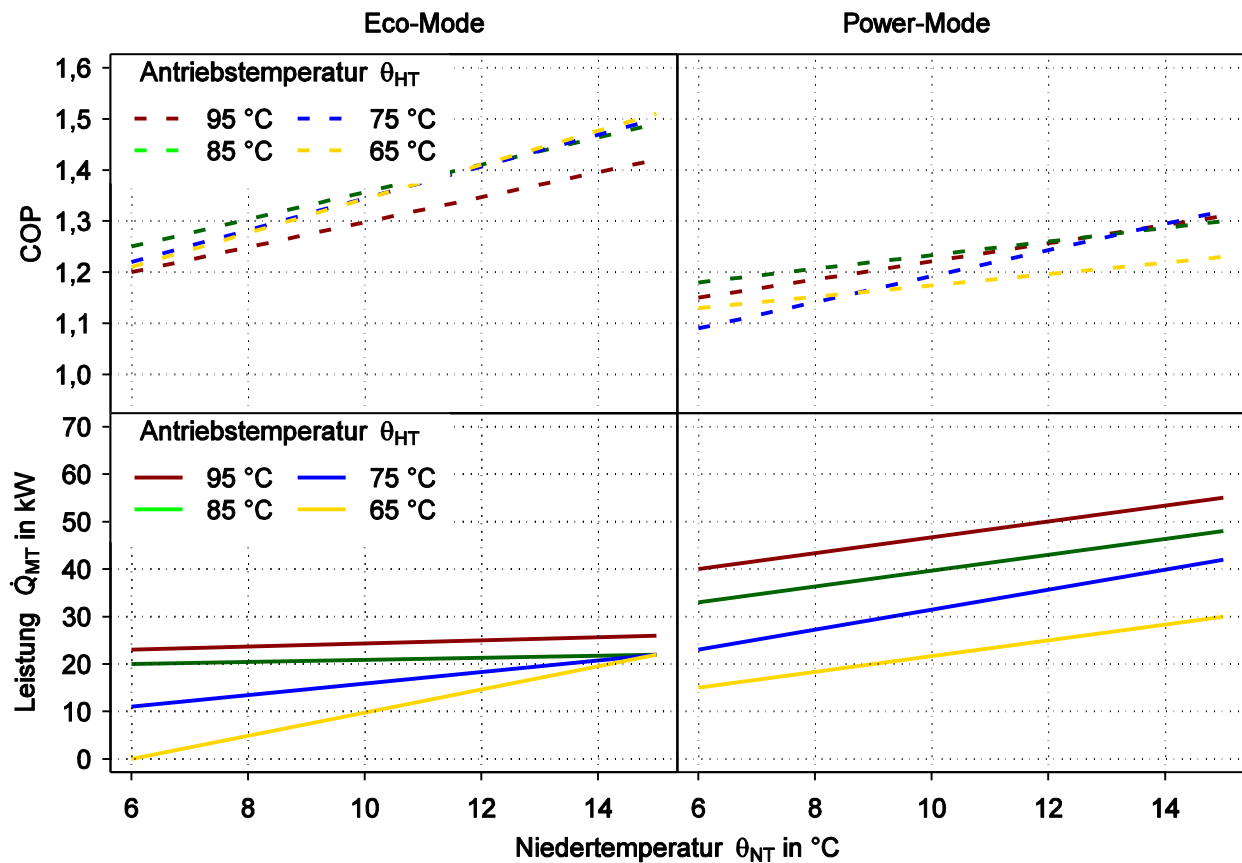


Abbildung 10-27: Kennlinienfeld der Adsorptionswärmepumpe Sortech Typ: ACS 15, für Vorlauftemperatur  $\theta_{MT} \approx 33..35\text{ °C}$  aus [92]

$$AZ = \frac{Q_{MT}}{Q_{HT}} \quad \text{Gl. 12}$$

AZ      Arbeitszahl für den beobachteten Zeitraum...

...JAZ = Jahresarbeitszahl,

...MAZ = Monatsarbeitszahl

...DAZ = Tagesarbeitszahl

$Q_{MT}$       Nutzenergie Mitteltemperatur den beobachteten Zeitraum

$Q_{HT}$       Antriebsenergie Hochtemperatur für den beobachteten Zeitraum

Neben Antriebs- und Nutzenergie kann auch die Entzugsenergie betrachtet werden.

Tabelle 10-26: Jahresbilanzen mit Jahresarbeitszahl (JAZ) der Adsorptionswärmepumpe

Jahr	JAZ	Nutzenergie $\dot{Q}_{MT}$ in kWh	Antriebsenergie $Q_{HT}$	Umweltenergie $Q_{NT}$	Bemerkung
2013	0,99	34.954	35.117	3.716	ohne Messwerte Januar, bis Juni 2013 defekt
2014	1,11	28.686	25.815	5.498	
2015	1,02	31.796	31.158	3.229	vermutlich ab September 2015 defekt

Den nachfolgenden Übersichten zu den Monatsbilanzen zeigt dies deutlich. Ab Februar bis Sommer 2013 liegt die Monatsarbeitszahl (MAZ) unter 1,0. Auch ist im Vergleich mit den darauffolgenden Monaten erkennbar, dass die die Entzugsleistung sehr viel geringer ist.

Tabelle 10-27 : Monatsbilanz für das Jahr 2013 Adsorptionswärmepumpe

	Jan	Feb	Mrz	Apr		Okt	Nov	Dez
Antriebsenergie $Q_{HT}$		8359	9642	3389		2829	4874	6024
Umweltenergie $Q_{NT}$		127	392	51		496	1243	1407
Nutzenergie $Q_{MT}$		7905	8767	2706		2810	5730	7007
Arbeitszahl		0,94	0,91	0,80		0,9933	1,18	1,16

Tabelle 10-28 : Monatsbilanz der Adsorptionswärmepumpe für das Jahr 2014

	Jan	Feb	Mrz		Mai		Sep	Okt	Nov	Dez
Antriebsenergie $Q_{HT}$	5.628	4.089	3.257		460		70	1.668	5.480	5.163
Umweltenergie $Q_{NT}$	1.297	785	696		39		7	272	1.224	1.178
Nutzenergie $Q_{MT}$	6.396	4.324	3.485		335		46	1.601	6.367	6.132
Arbeitszahl	1,14	1,06	1,07		0,73		0,66	0,96	1,16	1,19

Der nachfolgenden Tabelle ist zu entnehmen, dass der Arbeitszahl in der zweiten Jahreshälfte deutlich absinkt. Die Entzugsenergie ist sehr niedrig.

Tabelle 10-29 : Monatsbilanz der Adsorptionswärmepumpe für das Jahr 2015

	Jan	Feb	Mrz	Apr		Sep	Okt	Nov	Dez
Antriebsenergie $Q_{HT}$	6.213	5.994	4.650	1.622		747	3070	3715	5.147
Umweltenergie $Q_{NT}$	1.126	958	696	260		11	101	32	42
Nutzenergie $Q_{MT}$	7.170	6.686	4.883	1.653		681	2729	3253,	4.741
Arbeitszahl	1,15	1,12	1,05	1,02		0,91	0,89	0,87	0,92

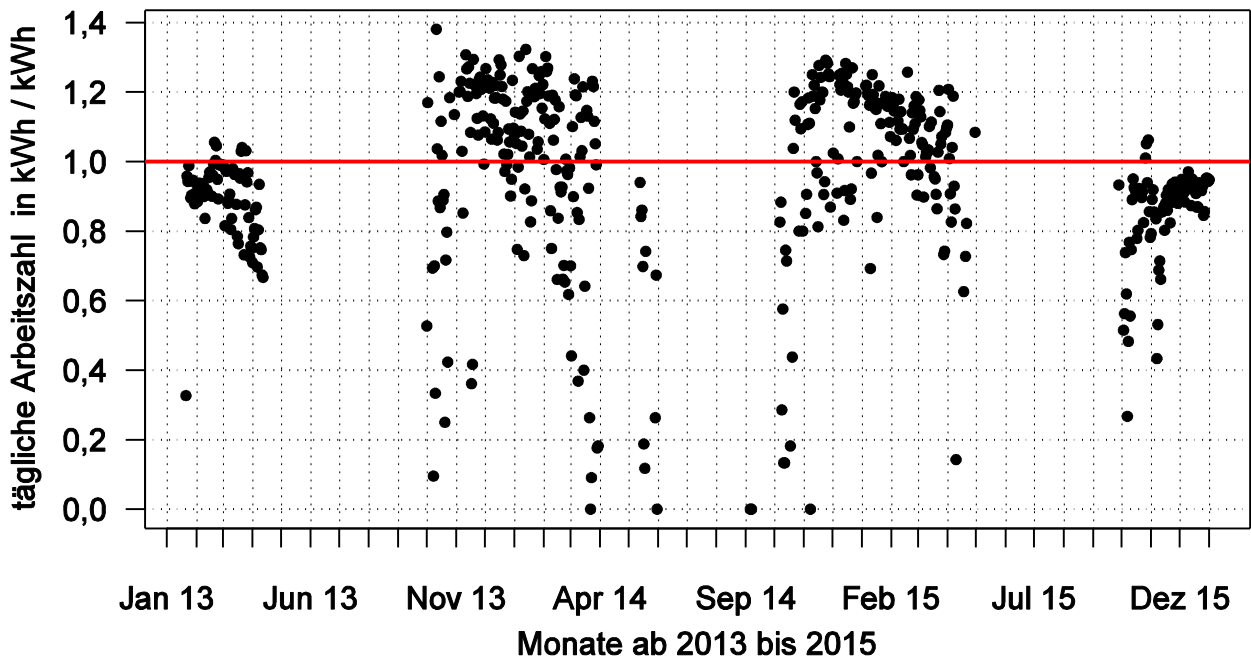


Abbildung 10-28: täglich Arbeitszahl im zeitlichen Verlauf

Die Auswertung der täglichen Arbeitszahlen bringt eine deutliche Abhängigkeit der Arbeitszahl von der gelieferten Energiemenge. Auch wird in der Abbildung unterschieden zwischen defekter Wärmepumpe (blau), evtl. defekter Wärmepumpe (rot) und nicht defekter Wärmepumpe (schwarz).

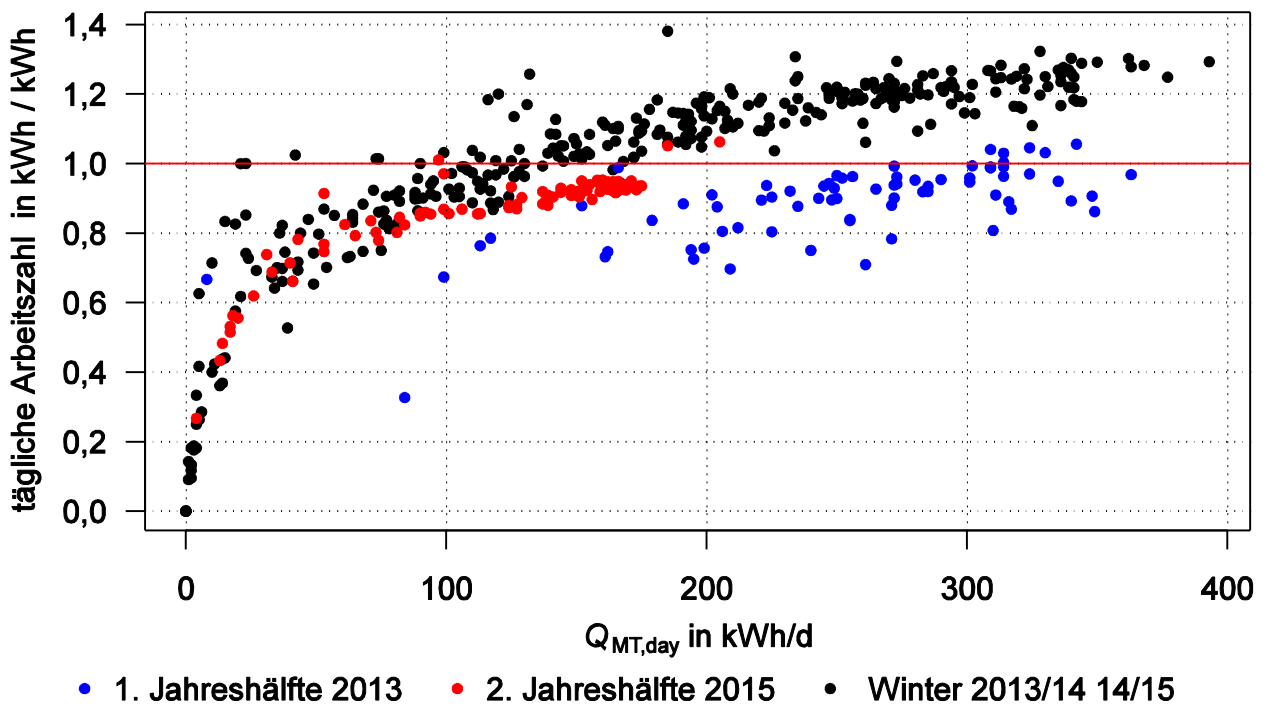


Abbildung 10-29: täglich Arbeitszahl als Funktion der täglichen Nutzwärme Adsorptionswärmepumpe



## 10.8 Primärenergiebilanz

Der Primärenergieaufwand für das Heizen mittels Adsorptionswärmepumpe setzt sich zusammen aus dem Verbrauch der Fernwärme bewertet mit dem Primärenergiefaktor der Fernwärme. Zusätzlich muss die Energie für den Betrieb der Pumpen für die Erschließung der Umweltquellen und der zusätzlichen Umwälzpumpen berücksichtigt werden. Der Energieaufwand dieser Pumpen wird mit Primärenergiefaktor für elektrische Energie bewertet.

Die Adsorptionswärmepumpe senkt den Endenergieverbrauch Wärme (Fernwärmeverbrauch).

Diesem Nutzen steht primärenergetisch ein Aufwand an Energie für Umwälzpumpen gegenüber, der ist auf Grund des niedrigen PE- Faktors sehr gering.

Es soll geklärt werden, inwieweit die APW primärenergetisch vorteilhaft gegenüber einer Variante ohne AWP ist..

$$= \frac{Q_{MT}}{(Q_{HT} f_{Pe,FW} + W_{Hyd} f_{Pe,elt})} \quad \text{Gl. 13}$$

AZ	Arbeitszahl für den beobachteten Zeitraum...
	...JAZ = Jahresarbeitszahl,
	...MAZ = Monatsarbeitszahl
	...DAZ = Tagesarbeitszahl
$Q_{MT}$	Nutzenergie Mitteltemperatur den beobachteten Zeitraum
$Q_{HT}$	Antriebsenergie Hochtemperatur für den beobachteten Zeitraum

Die Fernwärme in Erfurt wird in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugt. Unter KWK wird die gleichzeitige Erzeugung von thermischer und elektrischer Energie verstanden. Die Gleichzeitigkeit der Bereitstellung und Nutzung von Kraft (elektrischer Energie) und Wärme unterscheidet die KWK von der getrennten Erzeugung.

Dadurch wird im Vergleich zur ausschließlichen Krafterzeugung in einem Großkraftwerk eine deutliche Erhöhung des Brennstoffausnutzungsgrades erreicht. Im Vergleich zur rein thermischen Verwertung des Brennstoffes sinkt jedoch der Brennstoffausnutzungsgrad der KWK. Der ganzheitliche Vergleich, unter den derzeitigen Gegebenheiten, zwischen getrennter und gekoppelter Erzeugung zeigt einen deutlichen ökologischen Vorteil der KWK gegenüber der getrennten Erzeugung.

Diesem Sachverhalt trägt der Gesetzgeber mit der Förderung der KWK verankert im KWKG Rechnung. Es ist erklärtes Ziel, den Anteil der mittels KWK erzeugten elektrischen Energie in Deutschland bis zum Jahr 2020 auf 25 % zu erhöhen [93].

Bei der Bewertung der gekoppelten Produktion von thermischer und elektrischer Energie stellt sich das Problem der Verteilung der Primärenergie des Brennstoffs auf die Kopplungsprodukte. In diesem Abschnitt werden verschiedene Aspekte dieser Problematik diskutiert.

In der VDI-Richtlinie 4660 Blatt 2 werden zur zielenergiebezogenen Verteilung von CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschiedliche Methoden beschrieben. Die Verfahren sind ohne weiteres auf die Berechnung des Primärenergieaufwandes übertragbar.

In der Richtlinie wird keine konkrete Anwendungsempfehlung gegeben. Die vorgestellten Berechnungsmethoden führen zu unterschiedlichen Bewertungen der zwei Kopplungsprodukte.

Es kann unterschieden werden zwischen Methoden, welche die den Primärenergieaufwand entsprechend eines definierten Berechnungsschlüssels aufteilen und Methoden, die davon ausgehen, dass durch die gekoppelte Erzeugung der Primärenergieaufwand einer ungekoppelten Erzeugung eingespart und einem Koppelprodukt gutgeschrieben werden.

In der Energiewirtschaft wird zur Bewertung der KWK-Produkte in der Regel der Vergleich mit der getrennten Erzeugung beider Produkte herangezogen. Für die auf einer Referenz-erzeugung basierenden Methoden müssen Referenz-Anlagen der getrennten Erzeugung definiert werden. Drei der in der VDI-Richtlinie 4660 Blatt 2 dargestellten Methoden benötigen keinen Vergleich mit einer getrennten Erzeugung.

Die Bestimmung des Primärenergiefaktors der Fernwärme in Erfurt erfolgt mittels Methodik der FW-309-1 [3]. Diese Methode geht von einer Gutschrift des Primärenergieaufwandes (PE-Gutschrift) des verdrängten Stromes aus dem Verbundnetz, für die Wärme aus [95]. Es wird hier angenommen, dass KWK-Anlagen nicht privilegierte Stromerzeugungsanlagen aus dem Verbundnetz verdrängen. Vor dem Hintergrund der dynamischen Entwicklungen am Strommarkt, ist die Konvention dieser Annahme, bei der Bewertung der Primärenergiegutschrift für die KWK zu berücksichtigen. Mit steigendem Anteil erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung sowie einer Reduzierung des Einsatzes von Braun- und Steinkohle, wird die Gutschrift sinken und der rechnerische Primärenergieaufwand der Fernwärme steigen.

Zum Zeitpunkt der Ausstellung des Zertifikats betrug der Verdrängungsmixfaktor 3,0 [95]. In der Norm DIN V 18599-1:2011-12 / EnEV 2014 beträgt der  $f_{p,verdr} = 2,8$  [96] [95].

Unabhängig von der Diskussion um die Bewertung der Fernwärme ist aus Sicht des Autors festzustellen, dass der Primärenergiefaktor der Fernwärme nicht als feststehende physikalische Kenngrößen gesetzt werden kann. Daher ist für die primärenergetische Bewertung des Untersuchungsgegenstandes mit variablem Primärenergiefaktor angezeigt.

## 10.9 RLT-Anlagen

### 10.9.1 Situationsbeschreibung

Für die Beschreibung der RLT-Anlagen siehe auch Abschnitt 5.4.6 auf der Seite 68. Für die RLT-Anlagen „kleiner Hörsaal“ und „großer Hörsaal“ können jeweils 112 Datenpunkte für die RLT-Anlage „Labor“ 152 Datenpunkte ausgewertet werden. Die RLT-Anlagen werden jeweils von einem Wirkenergiezähler erfasst. In diesem Wert sind Elektroenergieverbrauch für Ventilatoren und Pumpen der Heiz- und Kühlregister enthalten.

### 10.9.2 Verbrauch

Nachfolgend sind die Ergebnisse aus den beiden ersten Betriebsjahren dargestellt. Neben dem absoluten Verbrauch sind flächenspezifische Kennwerte für die gesamte Energiebezugsfläche des Gebäudes sowie als spezifischer Verbrauchswert bezogen auf die durch RLT-Anlagen versorgte Raumfläche angegeben.

Tabelle 10-30: Verbrauchswerte elektrischer Energie der RLT-Anlagen für die Betriebsjahre 2013 und 2014

	Einheit	2013	2014
absoluter Verbrauch	MWh/a	24,61	17,86
spezifischer Verbrauch (nur RLT versorgte Räume)	kWh/m²a	41,29	29,96
spezifischer Verbrauch (gesamte Energiebezugsfläche)	kWh/m²a	13,5	9,79

Der Vergleich der absoluten Verbrauchswerte zeigt, dass die RLT-Anlage „Labore“ den größten Verbrauch aufweist. Der Verbrauch der Anlage „großer Hörsaal“ konnte durch Fehlerbeseitigung vom Jahr 2013 auf 2014 deutlich reduziert werden. Im Gegensatz dazu erhöhte sich der Verbrauch der Anlage „Labore“.

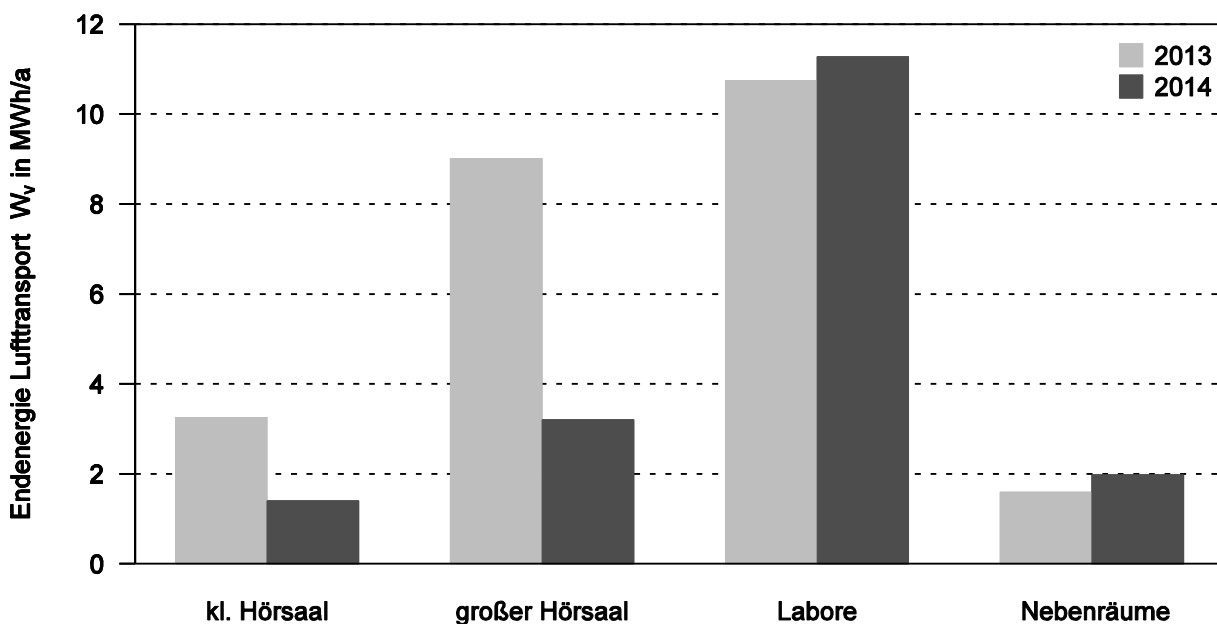


Abbildung 10-30: absoluter Elektroenergieverbrauch der RLT-Anlagen für die Jahre 2013 und 2014

Tabelle 10-31 : Verbrauch Elektroenergie RLT-Anlagen im 2013 in MWh

Anlage	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	2013
Labore	0,04	0,61	0,73	1,03	1,54	1,14	1,36	2,05	0,10	1,22	0,55	0,39	10,74
gr. Hörsaal	0,03	0,57	0,25	0,90	0,96	2,12	1,68	0,58	0,29	0,51	0,59	0,55	9,01
kl. Hörsaal	0,03	0,16	0,26	0,38	0,55	0,63	0,31	0,07	0,08	0,33	0,24	0,22	3,26
Nebenräume	0,07	0,07	0,12	0,17	0,16	0,22	0,17	0,07	0,07	0,11	0,17	0,18	1,6
Summe	0,17	1,41	1,37	2,47	3,21	4,10	3,51	2,77	0,53	2,18	1,55	1,34	24,6

Tabelle 10-32 : Verbrauch Elektroenergie RLT-Anlagen im 2014 in MWh

Anlage	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	2014
Labore	1,15	0,10	1,10	1,43	1,36	1,24	1,42	0,92	0,51	0,52	0,87	0,65	11,27
gr. Hörsaal	0,54	0,12	0,32	0,43	0,28	0,25	0,18	0,02	0,10	0,23	0,40	0,34	3,20
kl. Hörsaal	0,18	0,13	0,11	0,21	0,11	0,12	0,09	0,02	0,04	0,10	0,17	0,11	1,40
Nebenräume	0,18	0,16	0,18	0,17	0,18	0,17	0,16	0,16	0,14	0,16	0,17	0,15	1,98
Summe	2	0,51	1,7	2,2	1,9	1,8	1,8	1,1	0,8	1	1,6	1,2	17,85

Zur Bewertung des Energieverbrauchs der RLT-Anlagen bietet sich die Bildung von Teilenergiekennwerten an. Dazu wird der Energieverbrauch der Anlagen auf die Fläche der versorgten Räume bezogen. Die nachfolgende Abbildung zeigt den spezifischen Jahresverbrauch für elektrische Energie der RLT nach RLT-Anlagen.

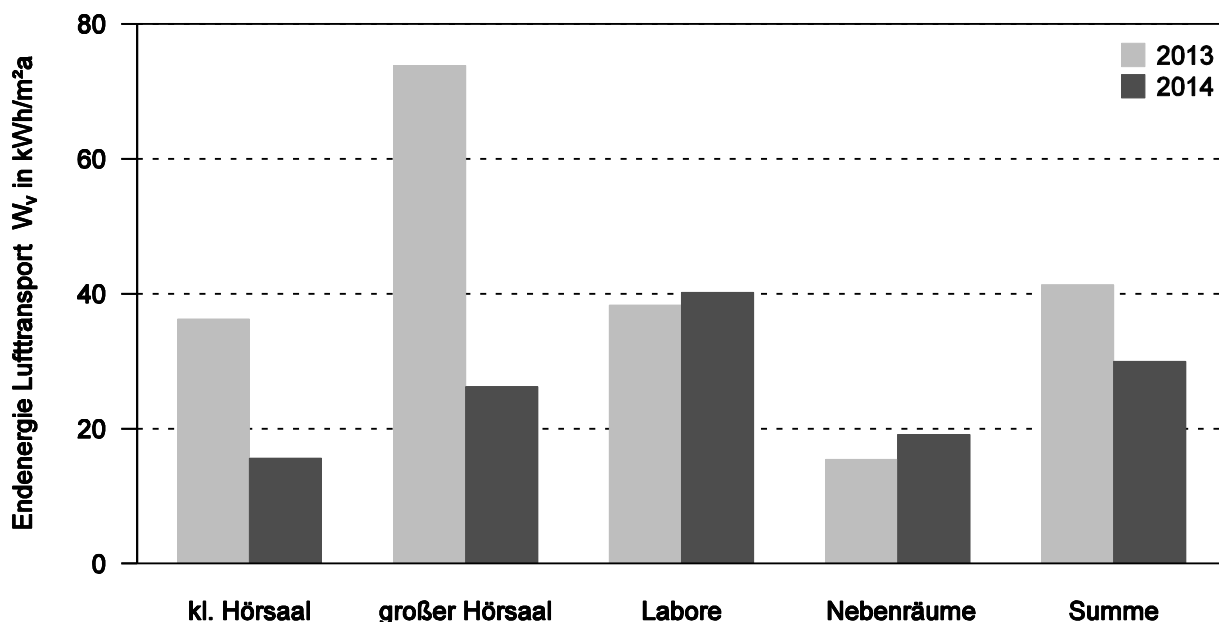


Abbildung 10-31: spezifischer Elektroenergieverbrauch der RLT-Anlagen (bezogen auf die Fläche der versorgten Räume) für die Jahre 2013 und 2014

Es können deutliche Unterschiede im spezifischen Verbrauch festgestellt werden. Der Verbrauch der Anlage „kleiner Hörsaal“ war 2014 deutlich geringer als die für die Anlage „Labore“. Der flächenspezifische Verbrauch der Anlage „großer Hörsaal“ war doppelt hoch wie der für Anlagen „La-

bore“ und „kleiner Hörsaal“. Die Anlage „Nebenräume“ hat einen geringen Anteil am Gesamtverbrauch. Der spezifische Verbrauch ist jedoch ähnlich hoch.

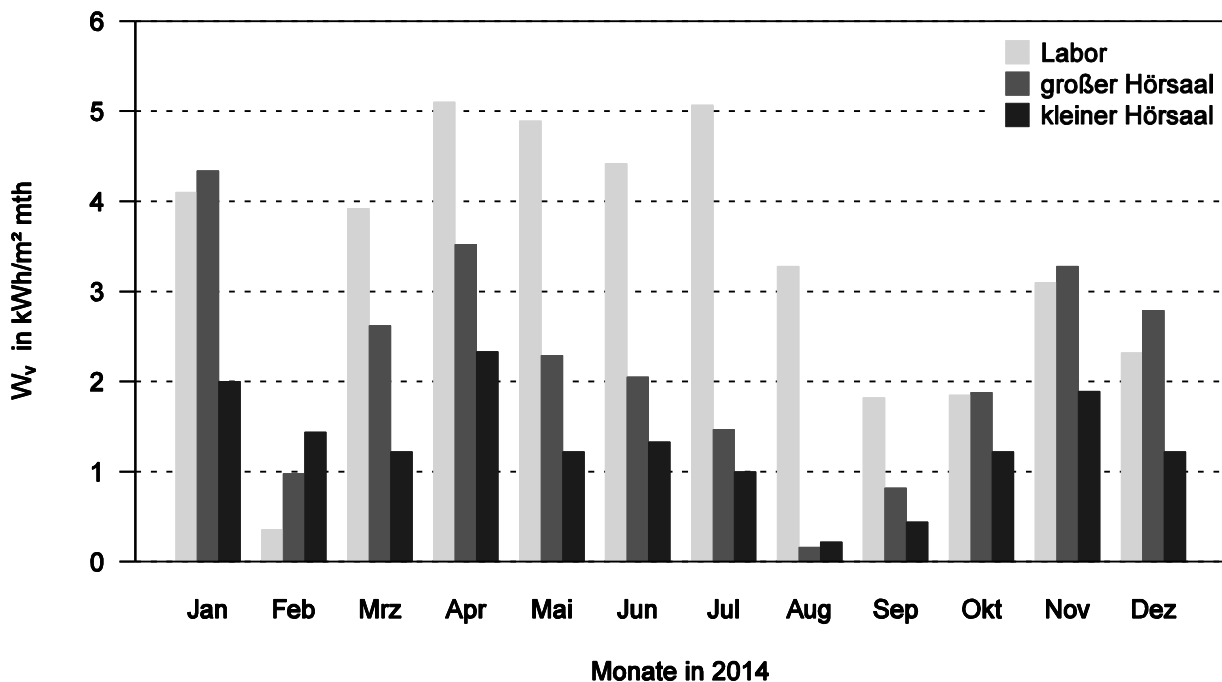


Abbildung 10-32: spezifischer Elektroenergieverbrauch der RLT-Anlagen (bezogen auf die Fläche der versorgten Räume) im Jahr 2013, 2014, 2015

Der Verbrauch der RLT-Anlagen folgt einem jahreszeitlichen Muster. Im August war der Verbrauch der Anlage „Labore“ im Vergleich zu den beiden anderen Anlagen deutlich erhöht. Im Februar war der Verbrauch im Vergleich zu den anderen Monaten sehr niedrig. Aus der offensichtlichen Varianz der monatlichen Verbrauchswerte wird deutlich, dass Benchmarking mittels Jahresverbrauchswerte, keine Rückschlüsse auf eine optimale Betriebsweise zulässt. Etwaige hohe Verbrauchswerte werden durch Monate ohne Betrieb in der Jahresbilanz egalisiert. Ein hoher monatlicher Verbrauch an sich bedeutet noch keinen fehlerhaften Betrieb, kann jedoch darauf hindeuten.

### 10.9.3 Lastverlauf

Aus den Messwerten der aufgenommen elektrischen Leistung der drei RLT-Anlagen können Raster bzw. Carpet-Plots erstellt werden. Diese geben im Vergleich zu anderen Darstellungsmethoden eine hervorragende Möglichkeit das Betriebsverhalten einzuschätzen. In den nachfolgenden neun Abbildungen ist für jede RLT-Anlage der Verlauf für drei Jahre dargestellt.

#### 10.9.3.1 RLT-Anlage „kleiner Hörsaal“

Die Anlage „kleiner Hörsaal“ zeigt im ersten Betriebssommer 2013 eine auffällige hohe Leistungsaufnahme in der Nacht bzw. im frühen Morgen. Dies kann auf die zum damaligen Zeitpunkt vorgesehen Nachtauskühlung zurückgeführt werden. Es wird deutlich, dass nach der Nachtauskühlung kaum Leistungsaufnahme und vermutlich auch keine Nutzung des Raumes vorlag. Nach Überarbeitung des Regelregimes ab August 2013 war die Anlage bis in den Herbst hinein nur selten mit geringer Leistungsaufnahme im Betrieb. Ab Herbst erhöhte sich die Leistungsaufnahme. Dies war mit zunehmender Raumnutzung in der Vorlesungszeit zu erwarten.

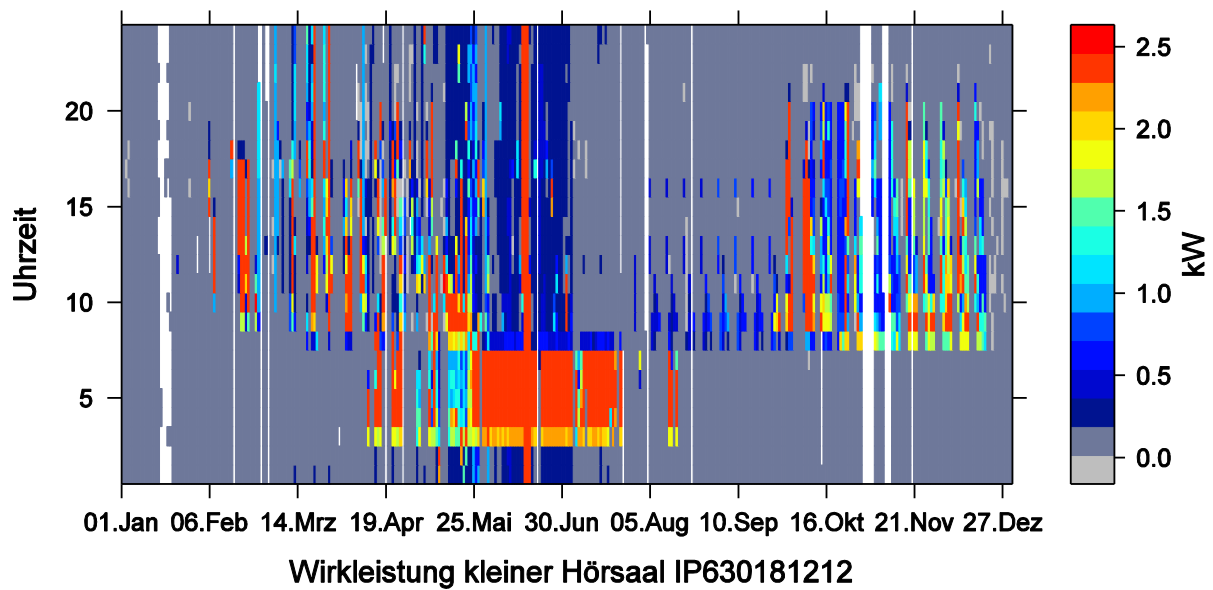


Abbildung 10-33: Carpet-Plot der elektrischen Leistung RLT-Anlage kleiner Hörsaal für 2013

Im darauffolgenden Jahr 2014 wurde die Anlage augenscheinlich bedarfsorientiert betrieben. In der vorlesungsfreien Zeit war die Anlage nicht im Betrieb.

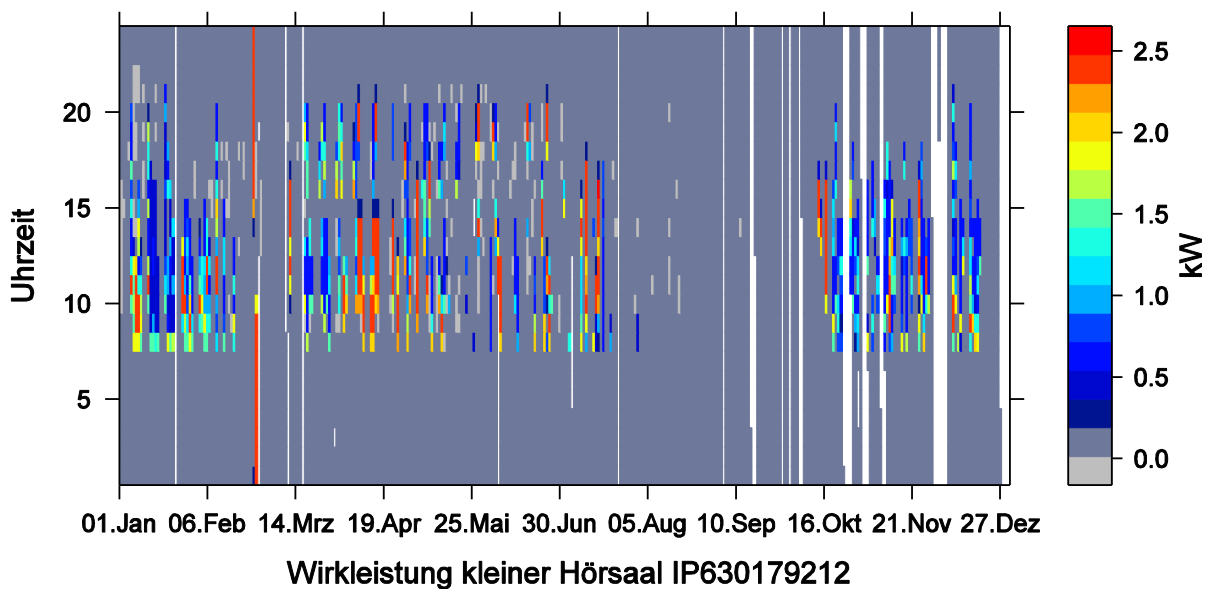


Abbildung 10-34: Carpet-Plot der elektrischen Leistung RLT-Anlage kleiner Hörsaal für 2014

Im Jahr 2015 war im Sommer und auch in der Vorlesungszeit eine gelegentliche Nutzung feststellbar. Ab Mitte Oktober kam es zu einer dauerhaft erhöhten Leistungsaufnahme, was vermutlich auf einen fehlerhaften Betrieb zurückzuführen ist. Hieran zeigt sich die Notwendigkeit eines kontinuierlichen energetischen Monitoring.

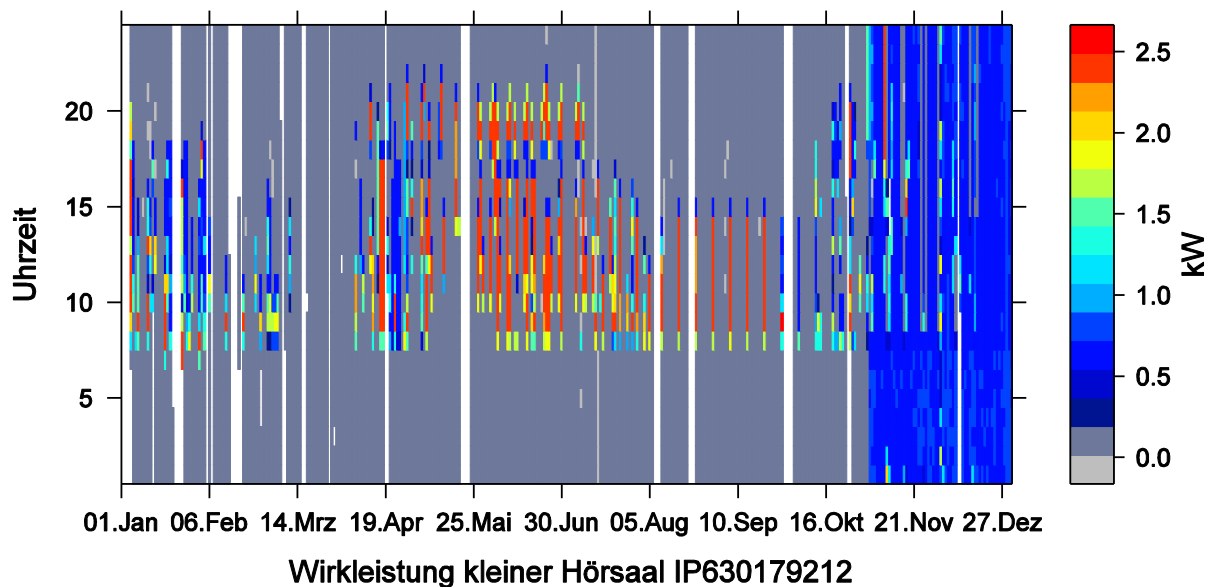


Abbildung 10-35: Carpet-Plot der elektrischen Leistung RLT-Anlage kleiner Hörsaal für 2015

Neben der elektrischen Leistung kann auch das Steuersignal zum Zuluft-Ventilator ausgewertet werden. Es zeigt, dass der Ventilator fehlerhaft mit annähernd 50 % des Maximal-Wertes betrieben wurde.

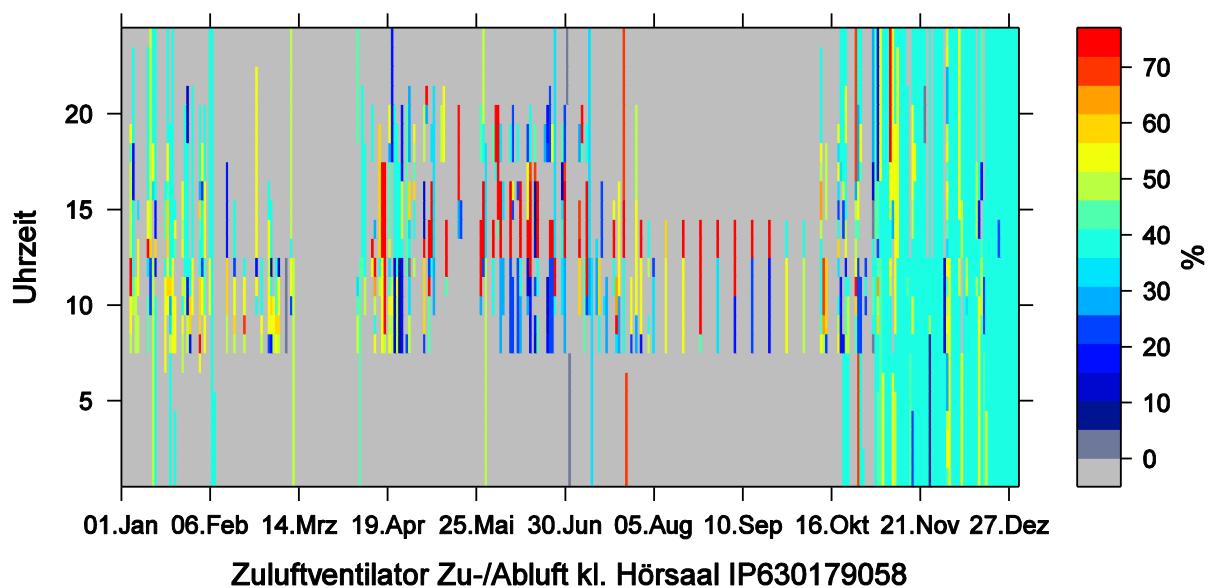


Abbildung 10-36: Carpet-Plot des Steuersignals Ventilator kleiner Hörsaal für 2015

### 10.9.3.2 RLT-Anlage Labore

Die RLT-Anlage Labore wies flächenspezifisch einen hohen und absolut einen bedeutenden Anteil am Stromverbrauch der RLT-Anlagen auf. Die Auswertung des Lastverlaufs im ersten Jahr zeigt deutliche Auffälligkeiten in der Mitte des Betriebsjahres. So war diese Anlage von April bis September annähernd durchgehend im Betrieb. Nach Fehlerbeseitigung wurden die Laufzeiten der Anlage deutlich gesenkt.

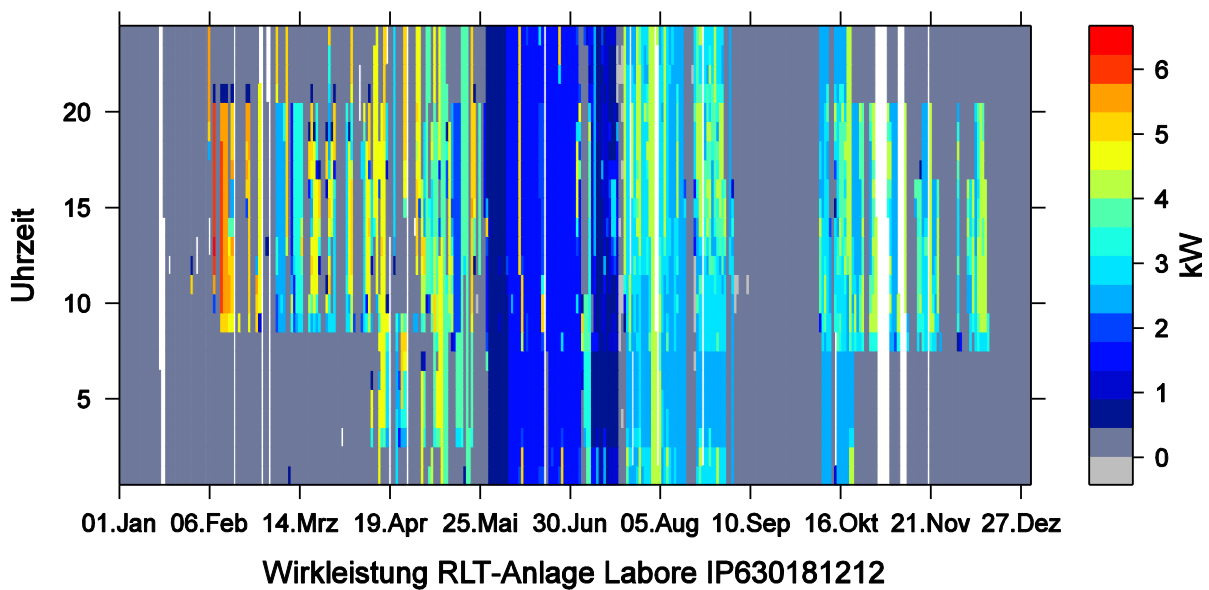


Abbildung 10-37: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die RLT-Anlage „Labore“ für 2013

Im Jahr 2014 konnte ein durchgängiger und regelmäßiger Betrieb festgestellt werden. Jedoch war die Leistungsaufnahme in der Mitte des Jahres im Vergleich zu anderen Jahreszeiten stark erhöht. Dies war auf eine fehlerhafte Umsetzung der Druckregelung zurückzuführen. Der regelmäßige Verlauf in den Sommermonaten ist auf die durchgängige kalendergesteuerte Betriebsweise der Anlage zurückzuführen. In der vorlesungsfreien Zeit wird der Raum als „offener Arbeitsraum“ ohne unterrichtsabhängige Kalendersteuerung betrieben. Anfang August 2014 wurde die Betriebsdauer der Anlage zur Energieeinsparung um zwei Stunden verkürzt. Weiteren Maßnahmen, wie einen präsenzabhängigen oder intermittierenden Betrieb wurde seitens des Nutzers nicht zugestimmt. Außerdem wurde die Abschaltung des Ventilators bei geschlossenen Volumenstromklappen implementiert, was zu einer Reduzierung der maximalen Leistungsaufnahme führte.

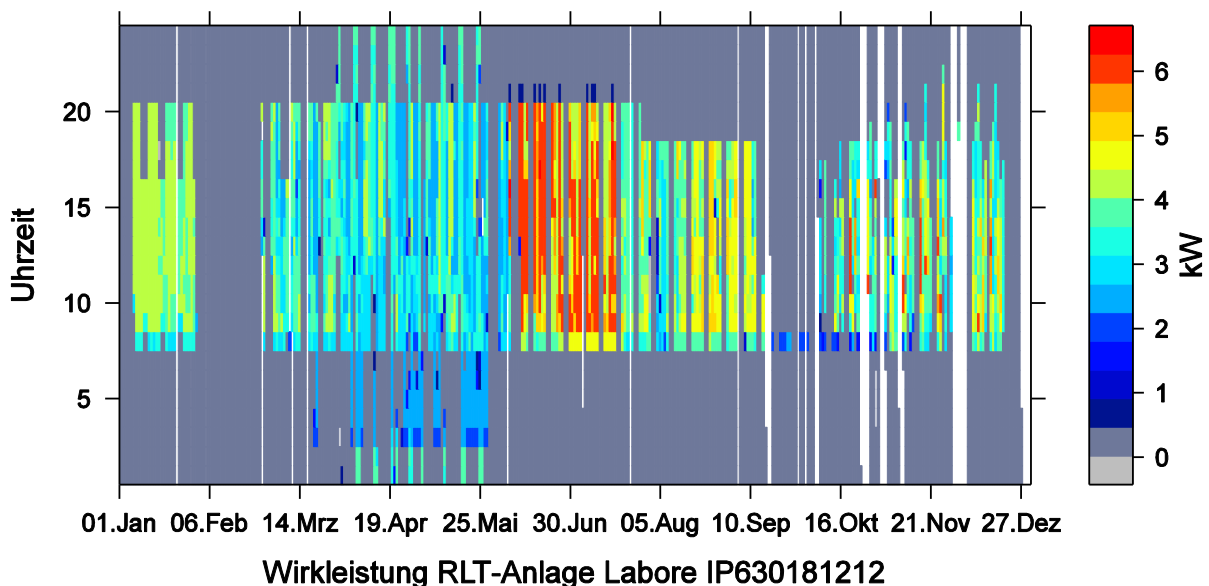


Abbildung 10-38: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die RLT-Anlage „Labore“ für 2014

Im Jahr 2015 konnte die Leistungsaufnahme und die Laufzeiten der Anlage stark reduziert werden. Es zeigte sich, dass dem sehr gleichförmigen Betriebsmuster im Jahr 2014 ein ebenso gleichförmiges



miges Betriebsmuster mit geringerer Leistungshöhe im Jahr 2015 folgt. Es kann davonausgegangen werden, dass der Betrieb im Jahr 2015 stärker am tatsächlichen Bedarf orientiert war.

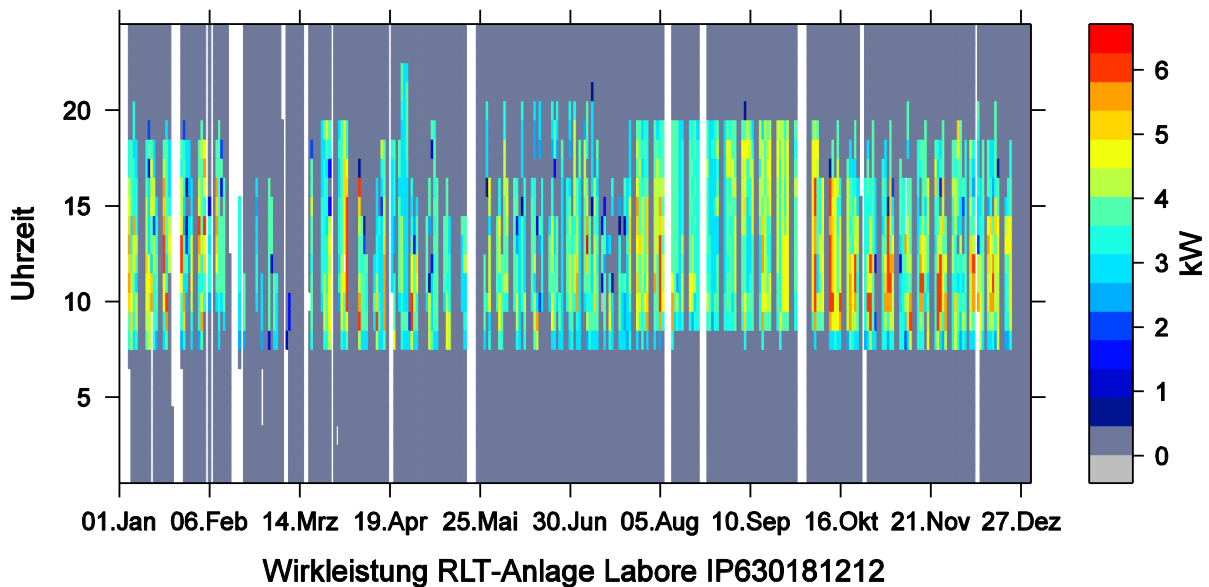


Abbildung 10-39: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die RLT-Anlage „Labore“ für 2015

### 10.9.3.3 RLT-Anlage „großer Hörsaal“

Die Auswertung des Betriebsverhaltens der RLT-Anlagen zur Versorgung des großen Hörsaals zeigt, vor allem in der Mitte des ersten Jahres 2013 Fehlfunktionen. In den darauffolgenden Jahren zeigt sich ein einzelner Betrieb, der auf eine bedarfsorientierte Betriebsweise zurückzuführen ist.

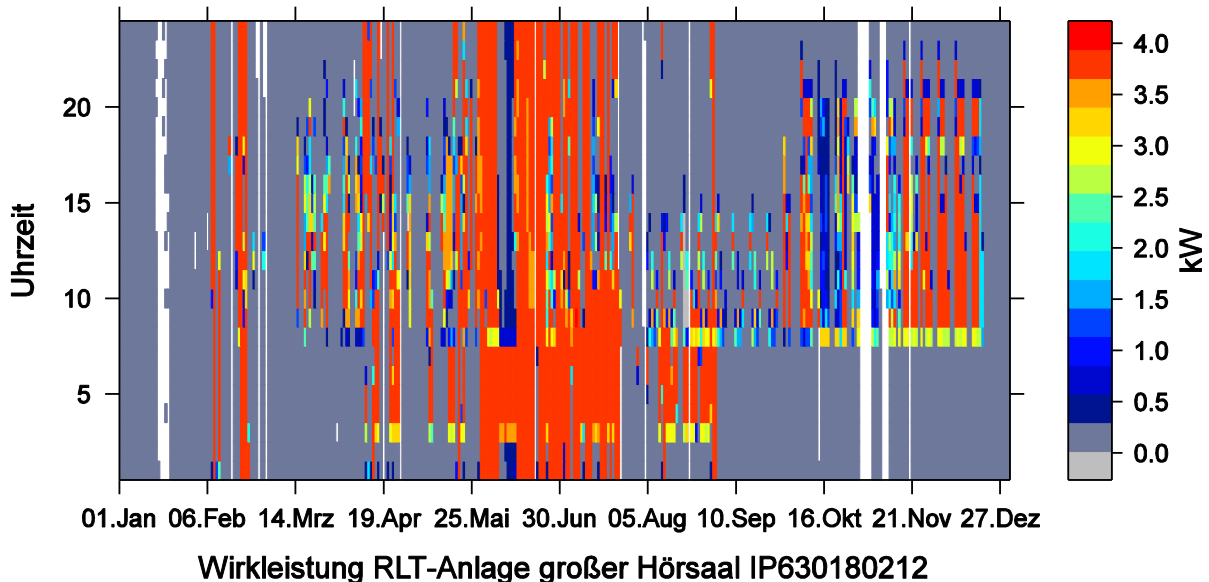


Abbildung 10-40: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die RLT-Anlage „großer Hörsaal“ für 2013

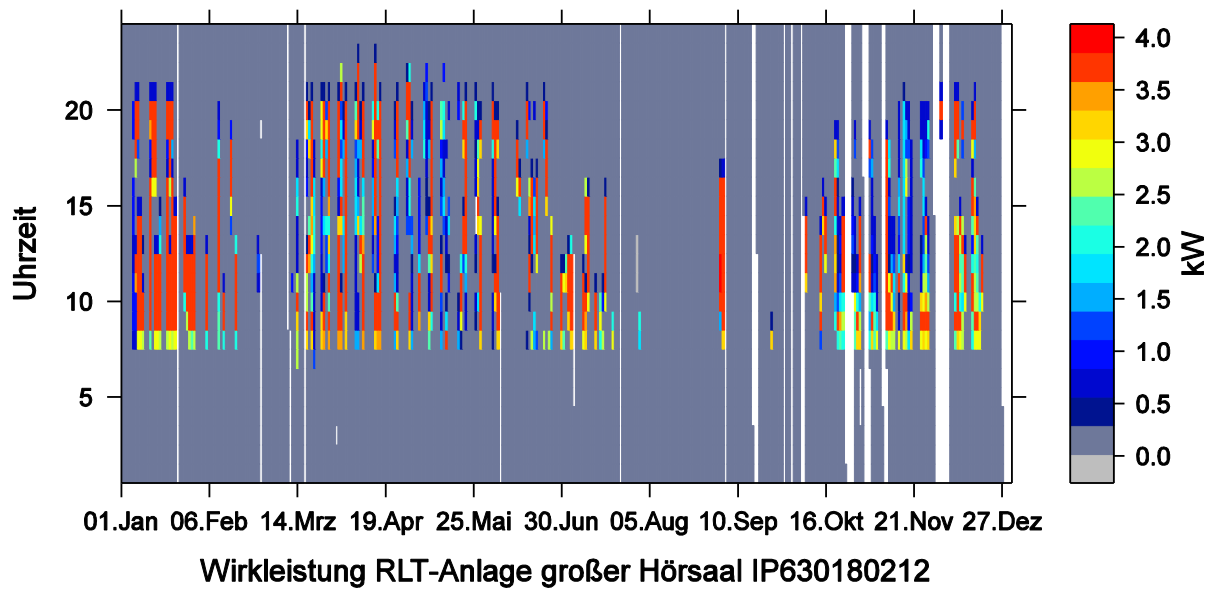


Abbildung 10-41: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die RLT-Anlage „großer Hörsaal“ für 2014

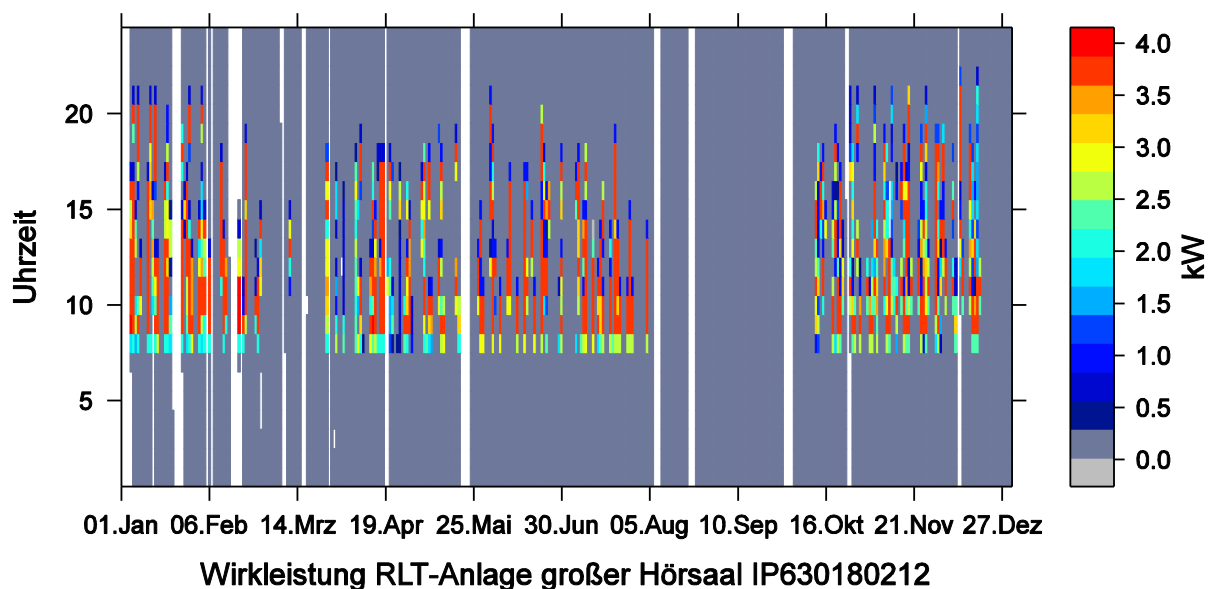


Abbildung 10-42: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die RLT-Anlage „großer Hörsaal“ für 2015

In der Praxis werden einzelne Verbraucher, wie der Antrieb eines Ventilators selten mittels separater Elektroenergiezähler erfasst. Das oftmals für die Regelung verwendete Steuersignal für die Ventilator Drehzahl kann ebenso für die Betriebsüberwachung genutzt werden. Der Vergleich der nachfolgenden Abbildung 10-43 mit der Abbildung 10-40 Seite 177 zeigt dies deutlich.

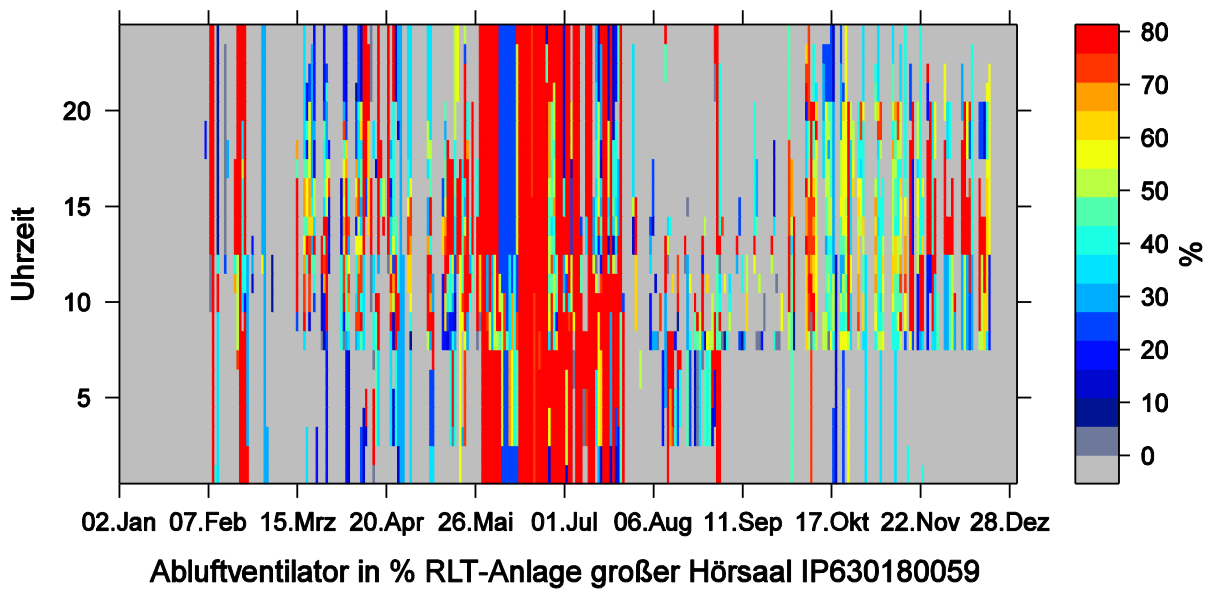


Abbildung 10-43: Carpet-Plot des Steuersignals Ventilator RLT-Anlage „großer Hörsaal“ für 2013

### 10.9.3.4 Wärmerückgewinnung RLT

#### 10.9.3.4.1 Anlagenbeschreibung

Die Zentralgeräte der RLT-Anlagen sind im Aufbau identisch. Die Abbildung 10-44 zeigt den Aufbau, bestehend aus den Hauptkomponenten: Rotationswärmeübertrager, Zu- und Abluftventilator, Luftkühler, Lufterhitzer, Klappen und Filter.

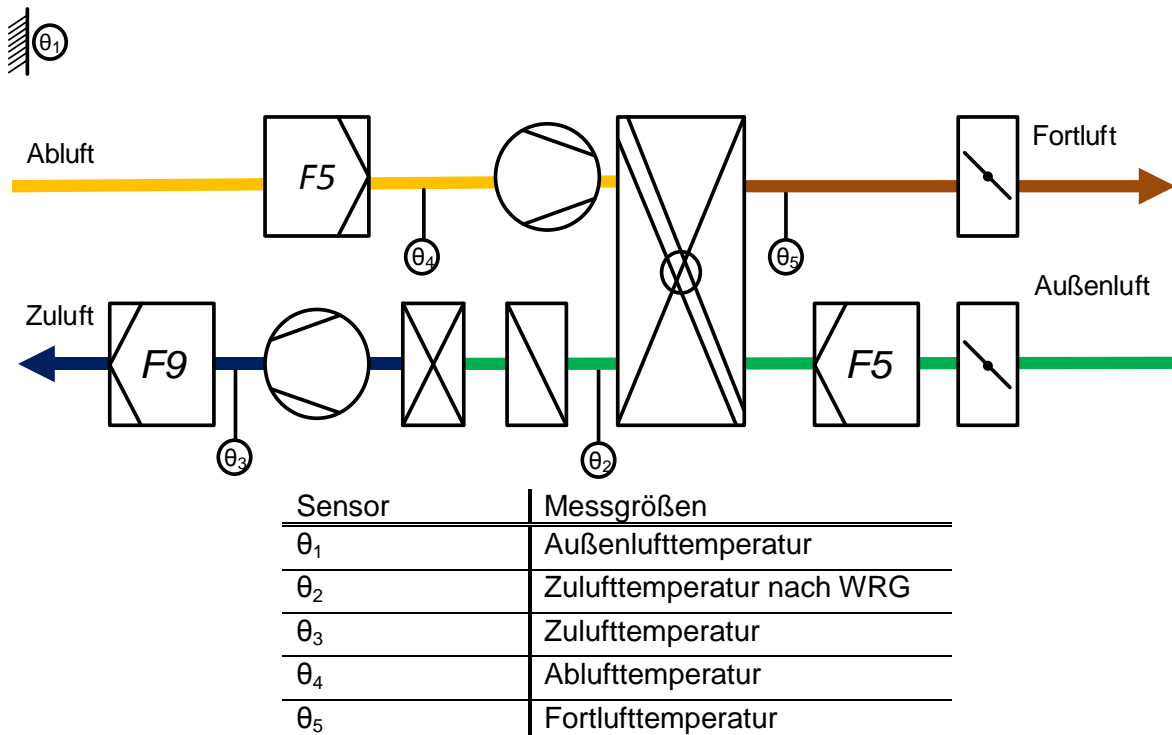


Abbildung 10-44: Schema der zentralen RLT-Geräte mit Position der Temperaturmessstellen

Die RLT-Anlagen Nr. 1 und Nr. 2 sind konzeptionell identisch und versorgen jeweils einen Raum. Die Zuluft wird für beide Anlagen über zwei Außenlufttürme angesaugt. Die Abluft wird über einen Lichtschacht abgeführt. Im Gegensatz dazu versorgt die RLT-Anlage Nr. 3 drei Räume mit ähnlicher Nutzung. Um die Räume bedarfsgerecht zu versorgen, sind in

dieser Anlage pro Raum in den Zu- und Abluftleitungen variable Volumenstromregler installiert. Außen- und Fortluftleitungen werden über das Dach geführt. Aufgrund der unterschiedlichen Leistungsanforderungen aus den Räumen ergeben sich unterschiedliche Dimensionierungen der Komponenten (vgl.

Tabelle 10-33).

Tabelle 10-33: Kennwerte der Wärmerückgewinnung in den RLT-Anlagen (Auslegung)

		RLT-1 kleiner Hörsaal	RLT-2 großer Hörsaal	RLT-3 Planungslabore
Typ		Rotor		
Zuluft-Volumenstrom	m³/h	1.000 bis 2.500	1.000 bis 4.000	1.000 bis 5.500
Abluft-Volumenstrom	m³/h	1.000 bis 2.500	1.000 bis 4.000	1.000 bis 5.500
versorgte Räume		kleiner Hörsaal	großer Hörsaal	Unterrichtsräume
Leistung WRG	kW	40	90	90
WRG-Klasse (EN13053 Stand 2011)		H1	H1	H1
Rückgewinnungsgrad	%	81,5	75,0	83,1
Strömungsgeschwindigkeit	m/s	1,6	1,8	1,6
Fläche WRG		1100	1100	1700



Abbildung 10-45: links: Blick auf die WRG-Einheit RLT-Labor; Mitte: Blick auf den Rotor; rechts Lufttemperatursensor nach WRG im RLT-Gerät

### 10.9.3.5 Berechnungsgrundlagen

In diesem Abschnitt wird das Betriebsverhalten der WRG in den RLT-Anlagen hinsichtlich des Temperaturänderungsgrades bewertet. Die Rückwärmezahl ist nach DIN V 18599-7 [97] entsprechend DIN EN 308 [98] als Änderungsgrad der Temperatur in Wärmerückgewinnungsanlagen bestimmt (vgl. Gl. 14).

$$\eta_t = \frac{(t_{22} - t_{21})}{(t_{11} - t_{21})} \quad \text{Gl. 14}$$

mit:

- $t_{11}$  Abluft (Ablufteintritt)
- $t_{21}$  Außenluft (Zulufteintritt)
- $t_{22}$  Lufttemperatur nach WRG (Zuluftaustritt)
- $\eta_t$ , bzw.  $\Phi_t$  Temperaturänderungsgrad, Rückwärmezahl

In der DIN V 18599-7 Seite 26 [97] wird von einer Rückwärmezahl, bzw. Temperaturänderungsgrad von  $\eta_t = 0,7$  für Rotationswärmeübertrager ausgegangen. Außerdem werden dort Verfahren zur Abschätzung der Temperaturänderungsgrade für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten genannt.

### 10.9.3.6 Messdaten und Berechnung

Aus den vorhandenen Messdaten der verschiedenen Lufttemperaturen kann der Temperaturänderungsgrad bestimmt werden. Die notwendigen Temperaturmesswerte wurden unabhängig vom Betriebszustand der RLT-Anlage (An oder Aus) fortwährend aufgezeichnet. Dies bedeutet, dass auch Messdaten aufgezeichnet wurden, wenn die RLT-Anlagen und Rotoren nicht in Betrieb waren. Daher war eine Messdatenaufbereitung notwendig. Zur Berechnung der Rückwärmezahl wurden Messdaten in die Bewertung einbezogen, wenn Ventilator und WRG-Rotor in Betrieb waren. Damit werden auch Betriebsphasen des Anfahr- und Abstellbetriebes abgebildet. Aufgrund eines Fehlers in der Ansteuerung des WRG-Rotors wurden Messdaten erst ab dem 01.6.2013 ausgewertet. In Hinblick auf die Interpretation des Temperaturänderungsgrades ist zu beachten, dass Luftmenge und Rotationsgeschwindigkeit des WRG-Rotors variabel sind und nicht ein möglichst hoher Temperaturänderungsgrad angestrebt wird. Die Regelung der RLT-Anlage regelt nach Soll-Wert der Raumlufthtemperatur in Abhängigkeit des Ist-Wertes der Raumlufthtemperatur die Zulufttemperatur in Kaskade (WRG-Rotor, Lufterhitzer, Ventilatordrehzahl). Neben der Temperaturregelung wird der Volumenstrom auch durch die Luftqualitätsregelung variabel vorgegeben. Für die Drehzahl findet eine Maximalauswahl statt. Mittels Drehzahlanpassung des Ventilators wird die Luftmenge eingestellt. Eine vergleichende Bewertung hinsichtlich eines Maximums des Rückwärmegrades, ist vor dem Hintergrund der Betriebsführung zu führen.

### 10.9.3.7 Ergebnisse Wärmerückgewinnung

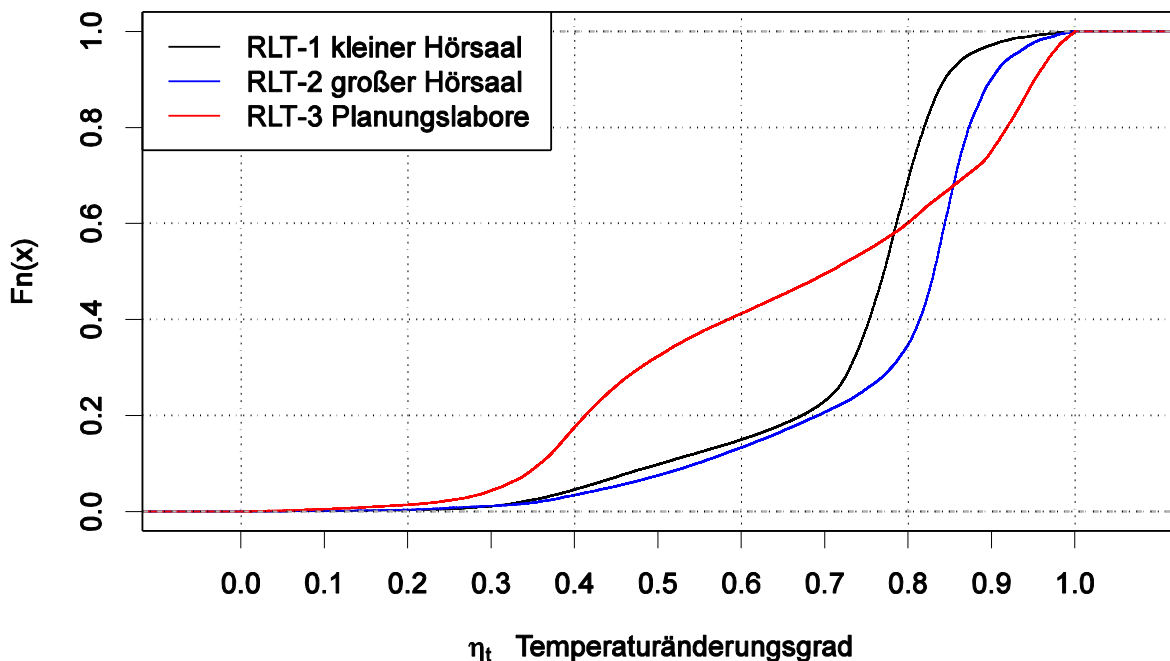


Abbildung 10-46: Verteilungsfunktionen der berechneten Temperaturänderungsgrade für RLT-Anlagen bei Steuersignal WRG-Rotor  $> 0\%$  und für  $\eta_t > 0$  (Heizfall).

Nachfolgend werden Temperaturänderungsgrade, berechnet aus Messwertreihen des Anlagenbetriebes als Verteilungsfunktion und mittels statistischer Kennwerte präsentiert. Einflussgrößen auf den Temperaturänderungsgrad werden nicht diskutiert. Es werden nur Ergebnisse für den Heizfall mit einem Steuersignal der WRG größer als  $0\%$  einbezogen.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse als statistische Kennwerte wiedergegeben. Es wird sichtbar, dass es deutliche Unterschiede zum einen zwischen den Anlagen „kleiner Hörsaal“ und „großer Hörsaal“ sowie zum anderen der Anlage „Labore“ gibt.

Tabelle 10-34: statistische Kennwerte des berechneten Temperaturänderungsgrad der RLT-Anlagen bei Steuersignal WRG  $> 0\%$  und für  $\eta_t > 0$  (Heizfall)

RTL-Anlage	1. Quartil 25 %	Median 50 %	3. Quartil 75 %	Mittelwert
„kleiner Hörsaal“	0,71	0,77	0,81	0,73
„großer Hörsaal“	0,75	0,83	0,86	0,78
„Labore“	0,44	0,71	0,90	0,67

Für die Anlagen „großer Hörsaal“ und „kleiner Hörsaal“ ist anzumerken, dass die Temperatur der Zuluft nach WRG ( $\theta_2$ ,  $t_{22}$ ) teils auch dann gegenüber der Außenlufttemperatur erhöht war, wenn keine WRG-Anforderung (d.h. Steuersignal =  $0\%$ ) vorlag. Es kann vermutet werden, dass es zu einer Erwärmung der Außenluft auch ohne Einsatz der WRG kommt. Ursachen könnten Abwärme aus dem Gebäude oder eine Erwärmung der Außenluft im ca. 6 m hohen Ansaugturm durch Solarstrahlung sein. Der Vergleich zwischen Werten der Planung (vgl.

Tabelle 10-33 Seite 180) und den gemessenen Temperaturänderungsgraden zeigt, dass diese im Betrieb tatsächlich erreicht werden. In der Charakteristik der Verteilung sind Gemeinsamkeiten und Unterschiede erkennbar. Die Anlagen „kleiner Hörsaal“ und „großer Hörsaal“ unterscheiden sich lediglich etwas im Betrag des Temperaturänderungsgrades, wobei die Werte der RLT-Anlage „großer Hörsaal“ auf einem höheren Niveau liegen. Während Temperaturänderungsgrade  $\eta_t < 70$  für die Anlagen „großer Hörsaal“ und „kleiner Hörsaal“ selten (weniger als  $25\%$  der Betriebszeit) auftraten, so waren niedrige Temperaturänderungsgrade in der Anlage „Planungslabore“ häufiger.

## 10.10 Nachtauskühlung mit RLT-Anlagen

### 10.10.1 Problemstellung und Vorbemerkung

In der Praxis hat sich die Ausnutzung des Kühlpotentials kühler Außenluft mit RLT-Anlagen etabliert. Diese Anwendung ist jedoch nicht in jeder Anlagenkonstellation und Nutzungssituation sinnvoll. So ist die Nachtauskühlung nicht sinnvoll, wenn am drauffolgenden Tag keine Nutzung des Raumes bzw. Gebäudes zu erwarten ist. Dies kann beispielsweise in der Vorlesungsfreien Zeit oder an Tagen vor Wochenend- oder Feiertagen der Fall sein. Ist ein aktives Kälteaggregat (z.B. Kompressionskältemaschine, Kühlturm, Umweltsenke) als Alternative vorhanden, so ist die Effizienz, ausgedrückt beispielsweise als COP, der Nachtauskühlung gegen diese Alternative abzuwä-

gen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Effizienz der Kühlung über RLT-Anlage und die Kühlung mittels TABS zur Nutzungszeit, in Verbindung der Umweltenergiesenke Brunnen, bedeuten effizienter ist als die Nachtauskühlung. Trotz dessen wurde eine Nachtkühlung mittels RLT-Anlage für die Unterrichtsräume umgesetzt deren Wirkung und Aufwand nachfolgend bewertet wird.

### 10.10.2 Effizienz

Die Effizienz der Nachtauskühlung kann im Rahmen dieses Monitoring nur teilweise bewertet werden. Der Aufwand kann mittels Elektroenergiezähler erfasst werden. Die Kühlleistung zur Nachtauskühlung kann aus einem angenommenen Massestrom der Zu- und Abluft und den gemessenen Temperaturdifferenzen abgeschätzt werden. Das Maß der Wirksamkeit der Kühlung zur Nutzung ist nicht bestimmbar, da zwischen Kühlung und Nutzung ein Zeitraum liegt.

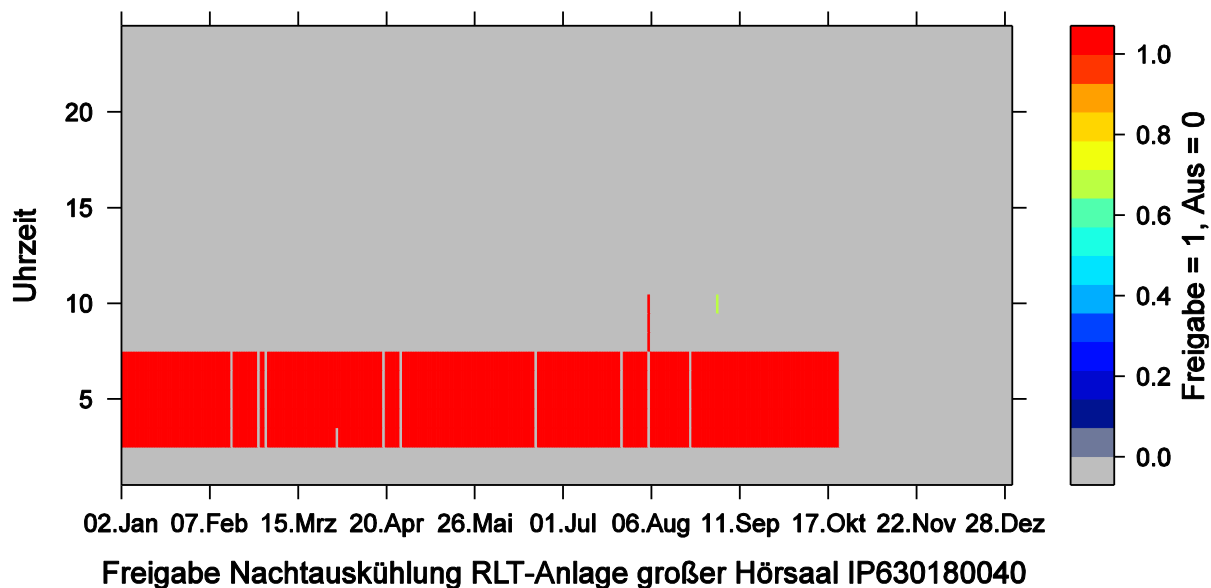


Abbildung 10-47: Freigabesignal Nachtauskühlung für RLT-Anlage großer Hörsaal für 2013

Die Auswertung des Präsenzsensors für den Raum „großer Hörsaal“ zeigt eine deutlich geringere Nutzung des großen Hörsaals in den Sommermonaten.

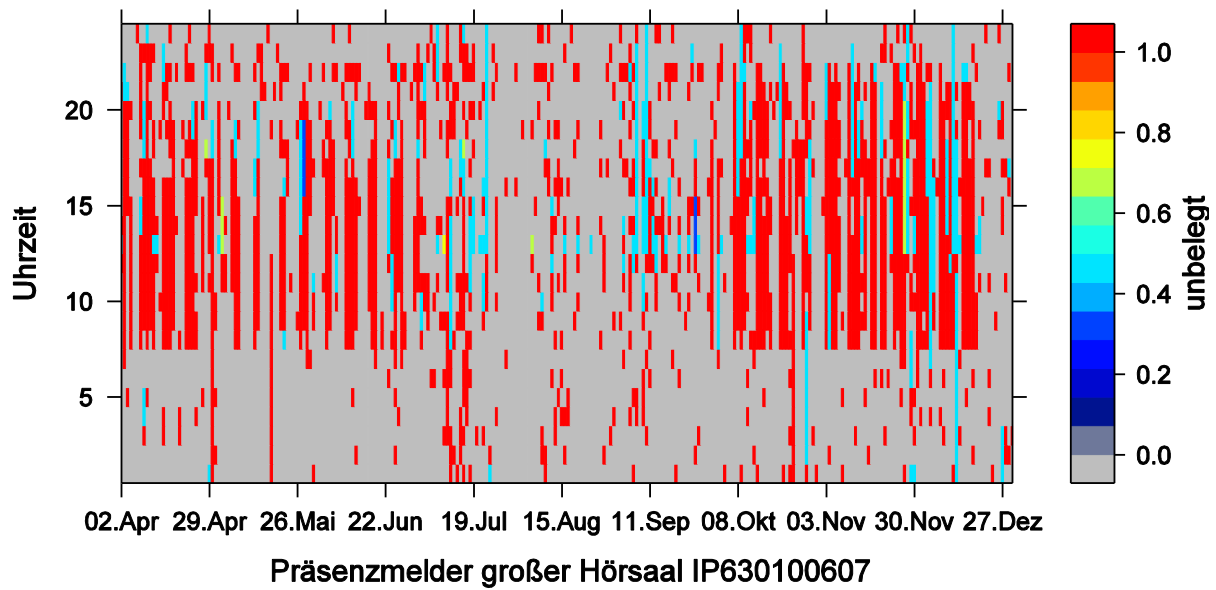


Abbildung 10-48: Präsenzmelder für Raum großer Hörsaal für 2013

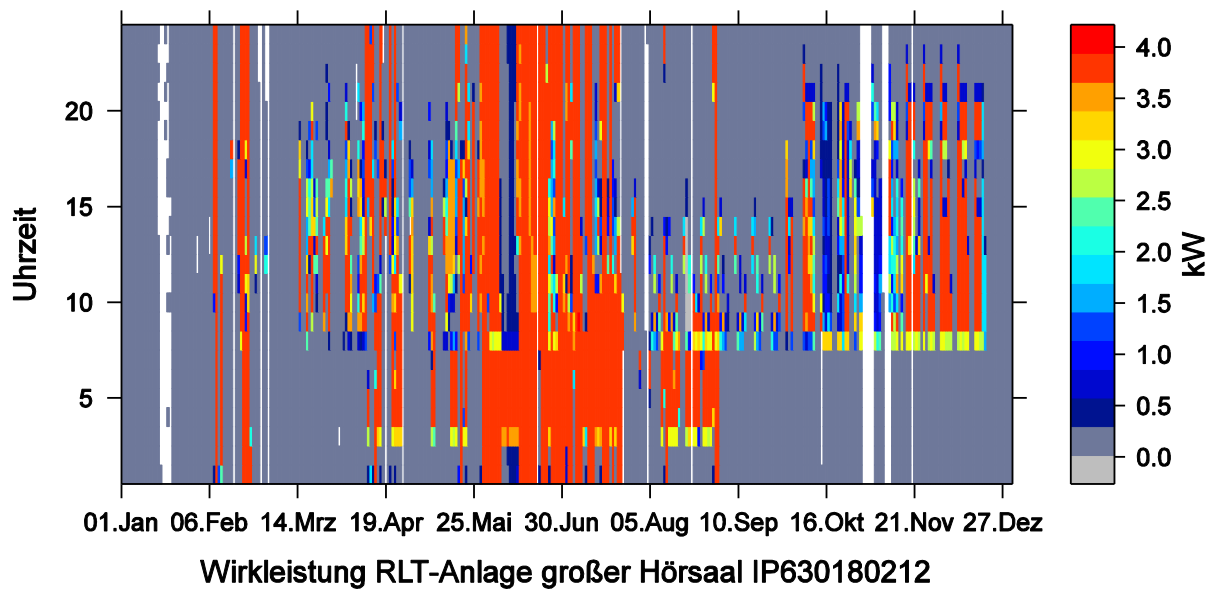


Abbildung 10-49: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die RLT-Anlage großer Hörsaal für 2013



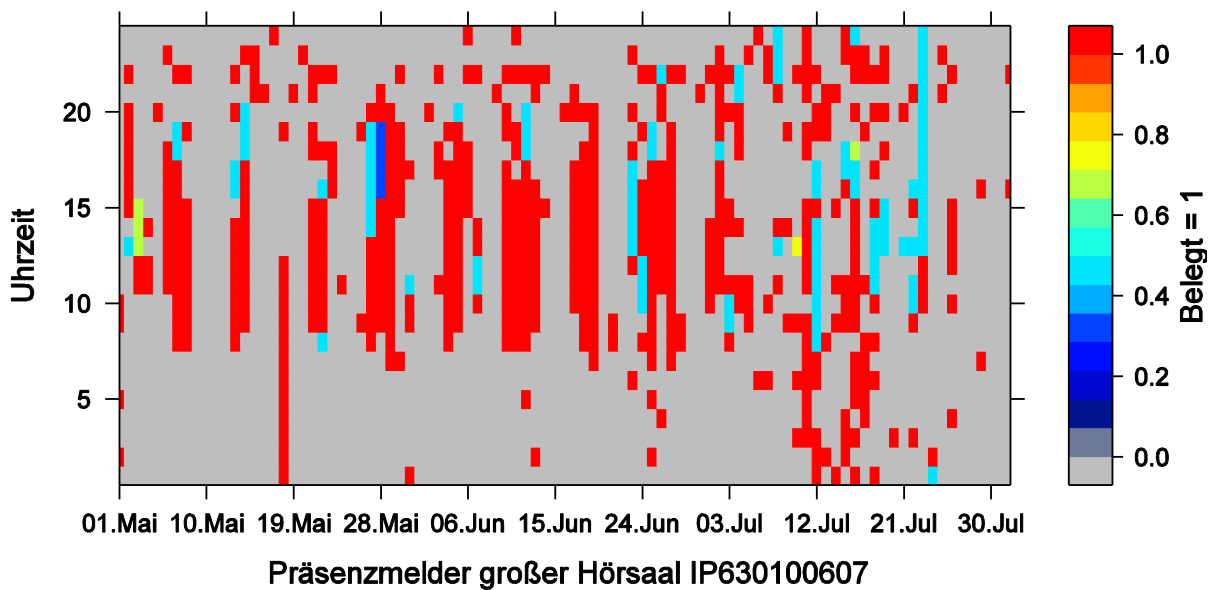


Abbildung 10-50: Präsenzmelder für Raum großer Hörsaal für Mai bis Juli 2013

## 10.11 Künstliche Beleuchtung

### 10.11.1 Messkonzept

Die Elektroinstallation und die darauf aufbauende Verbrauchserfassung sind nach Verbrauchergruppe und Geschoss differenziert aufgebaut. In den Unterverteilungen sind insgesamt acht Elektroenergiezähler (EZ) zur Erfassung des Verbrauchs der elektrischen Energie für künstliche Beleuchtung installiert. Damit werden alle Beleuchtungseinrichtungen durch diese Zähler separat erfasst. Die EZ erfassen den Energieverbrauch wie auch die elektrische Leistung. Es werden damit zwei Datenpunkte pro EZ ausgewertet. In der nachfolgenden Abbildung 10-52 ist die Zählerstruktur dargestellt. In den mit „Verkehrszonen“ bezeichneten EZ beinhalten auch Nebenräume wie WC und Technik Räume.

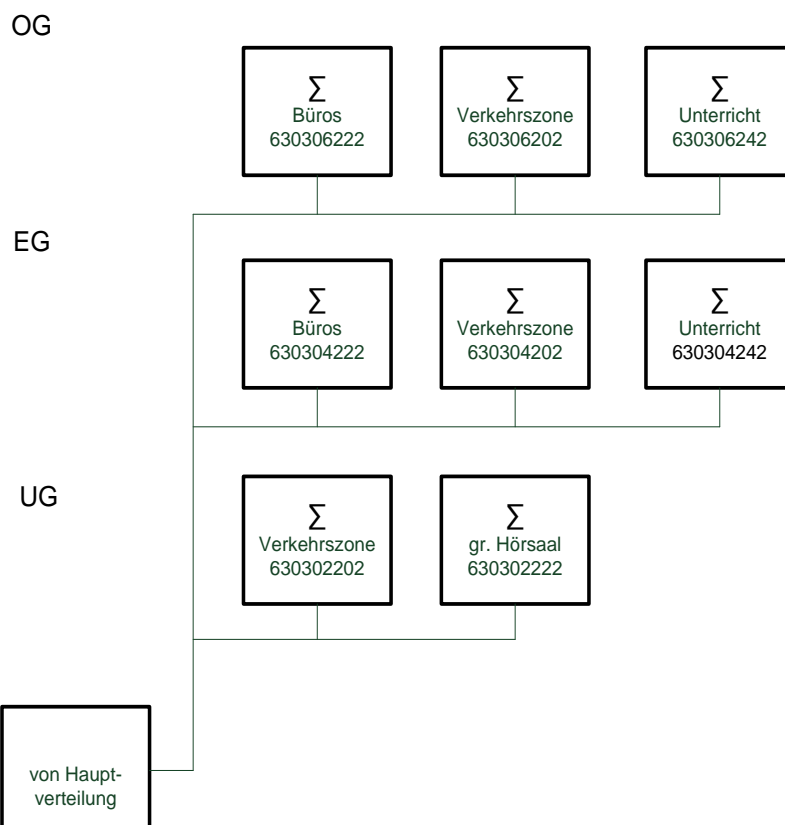


Abbildung 10-51: Zählerstruktur zur Erfassung des Energieaufwands der künstlichen Beleuchtung

### 10.11.2 Verbrauchsübersicht

Aus den Einzelwerten können für die drei Hauptverbrauchergruppen die folgenden Summen für die Jahre 2013 und 2014 gebildet werden.

Tabelle 10-35 : Endenergieverbrauch künstliche Beleuchtung für die Betriebsjahre 2013 und 2014

	2013	2014
absoluter Verbrauch in MWh/a		
Verkehrs- und Nebenflächen	19,65	18,3
Büro- und Arbeitsräume	0,82	1,13
Hörsaal- und Unterrichtsräume	2,56	3,82
Summe Endenergieverbrauch künstliche Beleuchtung	23,03	23,25
spezifischer Verbrauch in kWh/m² a (Energiebezugsfläche)		
Verkehrs- und Nebenflächen	10,78	10,04
Büro- und Arbeitsräume	0,44	0,62
Hörsaal- und Unterrichtsräume	1,4	2,09
Summe Endenergieverbrauch künstliche Beleuchtung	12,62	12,75

Die spezifischen Kennwerte wurde mit den gesamt Energiebezugsfläche des Gebäudes gebildet. Aus den Einzelverbrauchswerten können Verbrauchswerte auf der Ebene der Verbrauchergruppen gebildet werden. Diese Verbrauchswerte geben hinsichtlich der Relevanz der Verbrauchergruppe für den Energieverbrauch des Gebäudes Anhaltspunkte.

Tabelle 10-36 : Monatsverbrauch Elektroenergie künstliche Beleuchtung 2013 in kWh

IP_Index	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	2013
630306222	0	2	52	34	48	39	39	12	62	69	111	79	546
630306242	1	24	18	38	37	17	6	8	17	2	99	100	387
630306202	116	173	536	603	463	613	691	511	731	967	986	989	7380
630304222	0	3	12	16	8	13	11	3	32	51	59	63	271
630304242	27	69	30	71	98	90	84	57	22	248	419	415	1630
630304202	619	695	863	847	656	644	561	632	843	1298	1164	1153	9974
630302202	140	140	289	303	246	231	167	98	89	198	202	197	2299
630302222	28	20	46	31	22	21	1	0	15	112	135	115	545

Summe	931	1126	1846	1942	1577	1668	1560	1321	1809	2966	3176	3110	23032
-------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

Tabelle 10-37 : Monatsverbrauch Elektroenergie künstliche Beleuchtung 2014 in kWh

IP_Index	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	2014
630306222	122	77	51	44	22	13	29	25	38	78	100	59	660
630306242	140	30	26	8	12	4	36	6	8	46	67	42	425
630306202	1089	917	978	902	818	697	682	356	350	476	614	343	8223
630304222	106	59	22	11	6	10	10	25	38	39	87	64	478
630304242	561	356	43	211	177	177	139	37	78	222	486	325	2812
630304202	1320	1033	782	935	1264	538	401	200	246	361	545	355	7981
630302202	224	168	163	144	167	155	116	83	286	295	188	109	2097
630302222	124	22	39	44	44	6	15	0	3	66	141	81	587
Summe	3686	2664	2104	2300	2510	1600	1429	733	1046	1584	2229	1379	23262

Es wird deutlich, dass die Verkehrsflächen den größten Anteil am Beleuchtungsenergieverbrauch aufweisen. Dies ist bemerkenswert, da mit der Nutzung von LED-Technologie in den Verkehrsflächen der Verbrauch reduziert werden sollte. Ein Vergleich der Verbrauchswerte auf Ebene der Verbrauchgruppen mit Kennzahlen anderer Gebäude ist nicht sinnvoll da die Zusammensetzung der Flächen keine Berücksichtigung findet.

Da die Flächen zu den Verbrauchern bekannt sind, können jedem Zähler, und damit den Verbrauchswerten, eine Flächenangabe NGF differenziert nach Nutzungsrandbedingung zugeordnet werden. Aus dem Verbrauch und der Fläche können spezifische Kennwerte gebildet werden. Die Tabelle 10-38 gibt eine Übersicht zu den versorgten Flächen und dem spezifischen Jahresverbrauch. Der Flächenbezug wurde aus den versorgten Flächen ermittelt. Die Flächen der Technikräume gehen nicht diese spezifischen Kennwerte ein.

Tabelle 10-38 : Verbrauch Elektroenergie künstliche Beleuchtung 2013 und 2014

Fläche in m²	Jahresverbrauch kWh/a	spezifische Verbrauch kWh/m²a
--------------	-----------------------	-------------------------------

Zähler In- dex	1 (Einzelbüro)	16 (Sanitäräume)	17 (Sonstige Aufenthaltsräume)	18 (Nebenflächen, keine Aufenthaltsräume)	19 (Verkehrsflächen)	3 (Großraumbüro)	9 (Hörsaal)	Summen	2013	2014	2013	2014
630302202	0	26	0	107	209	0	0	342	2.299	2097	6,7	6,1
630302222	0	0	0	0,0	0	0	122	122	545	587	4,5	4,8
630304202	0	26	10	4	203	0	0	243	9.974	7.981	41,1	32,9
630304222	120	0	33	0	0	0	0	153	271	478	1,8	3,1
630304242	0	0	0	6	0	170	90	266	1.630	2.812	6,1	10,6
630306202	0	31	0	10	101	0	0	142	7.380	8.223	52,0	57,9
630306222	152	0	11	0	0	0	0	163	546	660	3,4	4,1
630306242	0	0	0	0	0	0	110	110	387	425	3,5	3,8
Summen	272	82	54	127	514	170	322	1.541	23.032	23.262	14,9	15,1

Der Vergleich der flächenspezifischen Verbrauchswerte in Tabelle 10-36 zeigt deutlich Unterschiede. So ist der Verbrauch in den Verkehrszonen deutlich höher als die in den anderen Zonen. Diese Verbraucher, erfasst durch Zähler mit den Nummern 630306202 und 630304202, sind von besonderem Interesse. Die nachfolgende Aufstellung gibt die monatlichen Verbrauchswerte wieder. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die jeweilige Verbrauchergruppe detailliert eingegeben. Die spezifischen Verbrauchswerte in der Tabelle 10-38 können mit Zonen ähnlicher Nutzung anderer Gebäude für Zwecke des Benchmarking verglichen werden.

### 10.11.2.1 Verkehrsflächen

#### 10.11.2.1.1 Situationsbeschreibung

In den Verkehrsflächen kommen LED und Leuchtstoffröhren zum Einsatz. Ursprünglich war im Energiekonzept die Beleuchtung der Verkehrsflächen ausschließlich mittels LED vorgesehen. In den Planungsgesprächen wurde bekannt, dass im Beleuchtungskonzept, auch aus gestalterischen Erwägungen heraus, die Nutzung von Leuchtstoffröhren, verortet an den Decken über dem Luft-

raum im Foyer, vorgesehen wurde. Im Planungsteam wurde erörtert inwieweit der Betrieb dieser Beleuchtung sich negativ auf den Energieverbrauch auswirken könnte. Es wurde damals angenommen, dass durch die Raumautomation mit Präsenz- und Leuchtstärkesensoren eine bedarfsgerechte, und damit energieeffiziente, Beleuchtung erreicht werden kann. Auch die transparente Fassadenfläche sollte mit hohem Tageslichtangebot dazu beitragen.



Abbildung 10-52: links: Blick in das Foyer im EG, rechts: Blick in Foyer aus UG auf Leuchtbänder

#### 10.11.2.1.2 Detaillierte Verbrauchsauswertung

Die wesentliche Ursache für den erhöhten Verbrauch für die Beleuchtung der Verkehrsflächen sind sehr lange Betriebszeiten der Leuchtstoffröhren im Foyer. Anlass für eine Überprüfung der Beleuchtung war nicht der hohe Energieverbrauch, sondern bereits die Feststellung des sinnwidrigen Betriebes der Beleuchtung („Dauer-An“) kurz nach Inbetriebnahme des Gebäudes. Die nachfolgende Abbildung zeigt die typische Situation, dass bei ausreichend Tageslichtangebot die Beleuchtung eingeschaltet ist.

Der Grund für den fehlerhaften Betrieb, ist in fehlerhafter Sensorik bzw. deren Einbindung in die Lichtsteuerung zusehen. Bereits im Jahr 2013 wurde festgestellt, dass an der GLT einzelnen Präsenzsensoren im Foyer keine plausiblen Signale ausgaben. Dies führte in der Lichtsteuerung dazu, dass Präsenz in der Nacht detektiert wurde, die zur Einschaltung der Beleuchtung führte. Zur Fehlererkennung wurde zunächst die Haltezeit der Präsenzsensoren verringert. Dies ermöglichte eine genauere Überprüfung die zum Schluss kam, dass Präsenzsensoren eine Präsenz signalisierten, die sehr wahrscheinlich tatsächlich nicht vorlag. Der Austausch der/des betreffenden Sensor/en erfolgte nicht. Die Lichtsteuerung im Foyer wurde mit mehreren Präsenzsensoren ausgestattet. Die fehlerhaften Sensoren wurden im Sommer 2014 deaktiviert und gingen nicht mehr in die Lichtsteuerung ein. Neben der Korrektur dieses Fehlers wurde die Einstellung des außenliegenden Sonnenschutzes im Foyer verbessert. Im Regelbetrieb des geschlossenen Sonnenschutzes wurden die oberen Lamellen der Raffstores horizontal ausgerichtet. Damit wird Tageslicht in den Raum gelenkt, was die Beleuchtungsstärke durch Tageslicht, bei geschlossenem Sonnenschutz, erhöht und die Einschaltung der künstlichen Beleuchtung verringerte.



Abbildung 10-53: Blick auf das Foyer von außen, Beleuchtung eingeschaltet (Aufnahme am 16. September 2013)

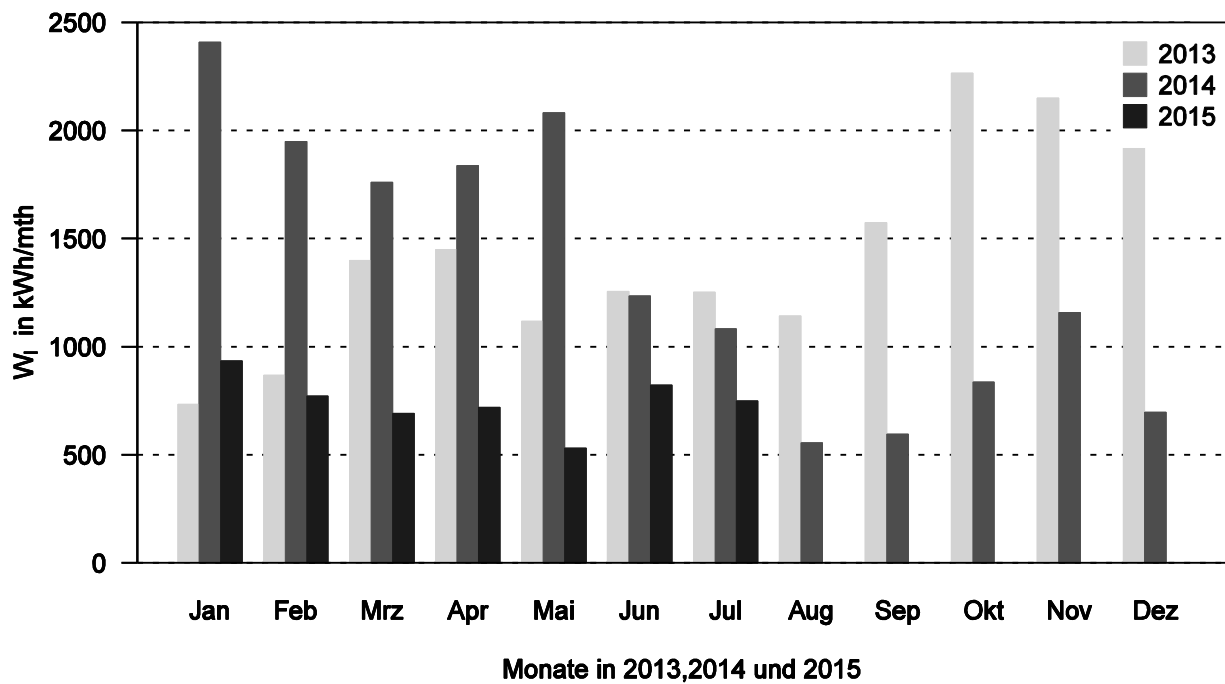


Abbildung 10-54: Gegenüberstellung des monatlichen Verlaufs des Elektroenergieverbrauchs der künstlichen Beleuchtung Verkehrsflächen

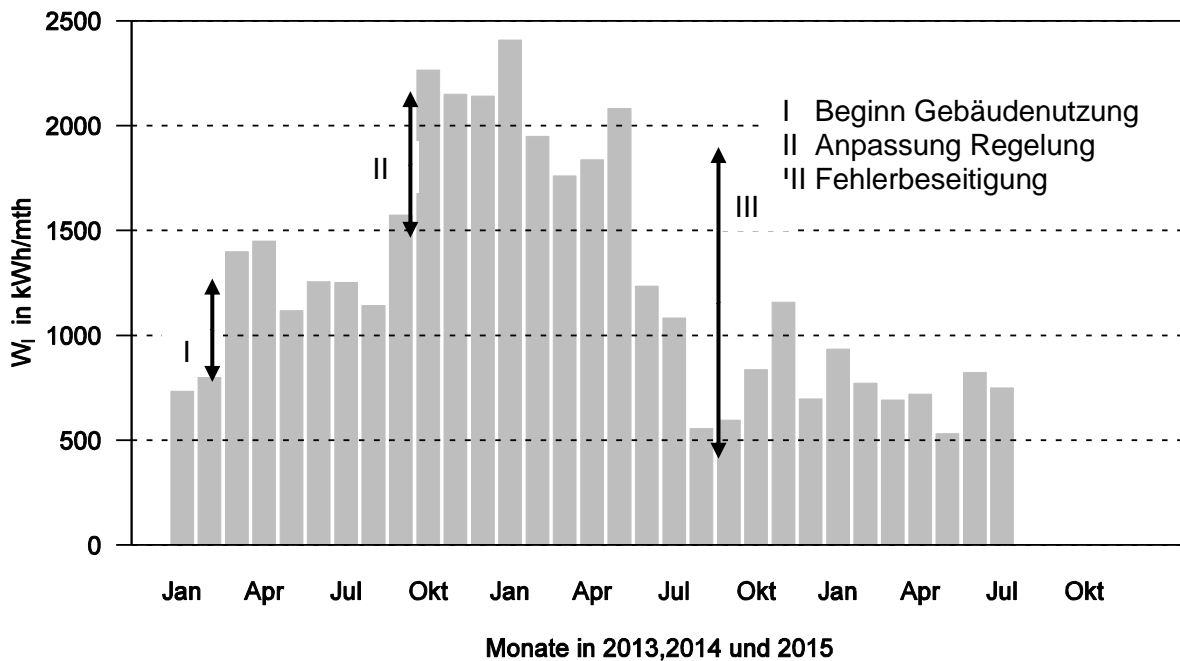


Abbildung 10-55: Verlauf des monatlichen Elektroenergieverbrauchs der künstlichen Beleuchtung Verkehrsflächen

Durch die Fehlerbeseitigung in der Sensorik der Lichtregelung und Optimierung der Einschaltparameter, sowie des außenliegenden Sonnenschutzes konnte der Verbrauch deutlich gesenkt werden. Der Vergleich der Monate des ersten Halbjahres 2014 und 2015 zeigt, dass der Monatsverbrauch auf ein Viertel reduziert wurde.

Auch im Verlauf der Leistungsaufnahme (IP630306203) der künstlichen Beleuchtung kann mittels Carpet-Plot der Fehler dargestellt werden. Es können unterschiedliche Verbrauchsmuster in den Jahren festgestellt werden. Ab Oktober 2013 bis zum August 2014 sind auch in der Nacht und ohne Wochenendunterbrechung hohe Leistungen und damit Verbrauch feststellbar.

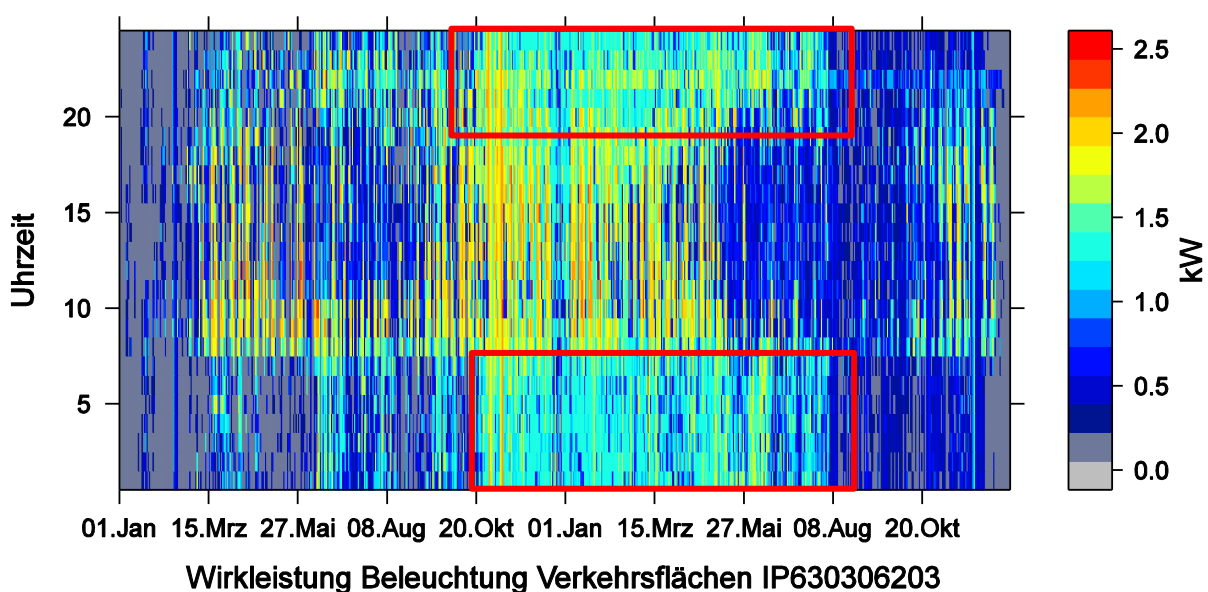


Abbildung 10-56: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die künstliche Beleuchtung der Verkehrsflächen für die Jahre 2013 und 2014

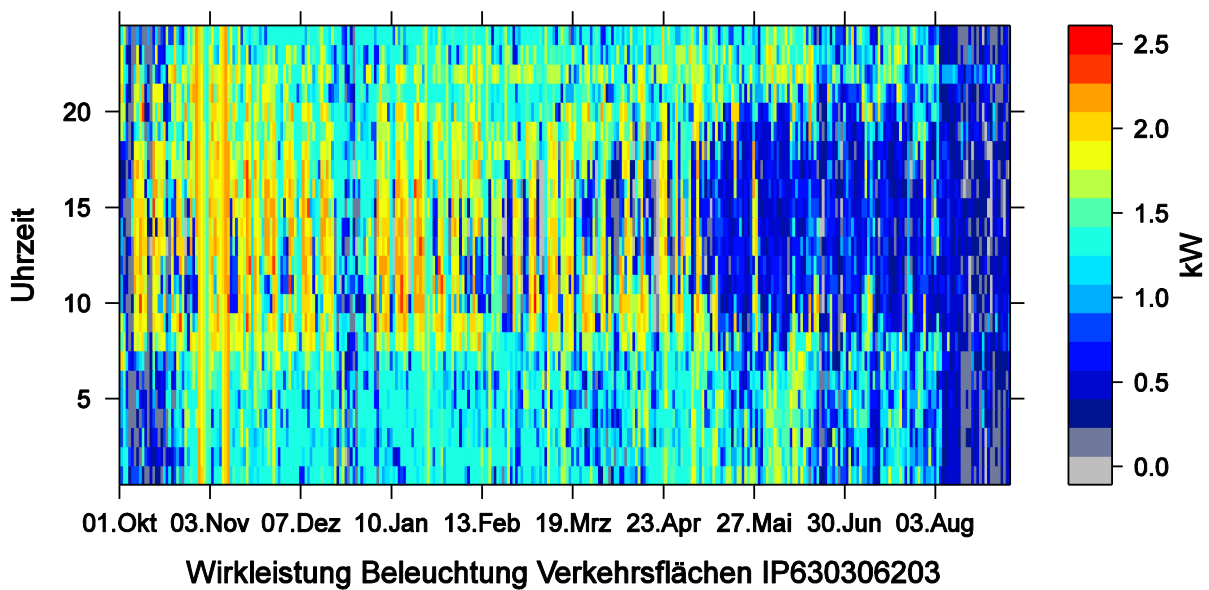


Abbildung 10-57: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die künstliche Beleuchtung der Verkehrsflächen von Oktober 2013 bis August 2014

Nach August 2014 konnte die Beleuchtungssteuerung ohne Fehler betrieben werden. Die Abbildung 10-58 zeigt den Verlauf ohne sichtbare gravierende Fehler. Teilweise ist jedoch auch in den Nachstunden ein unerwarteter Verbrauch sichtbar.

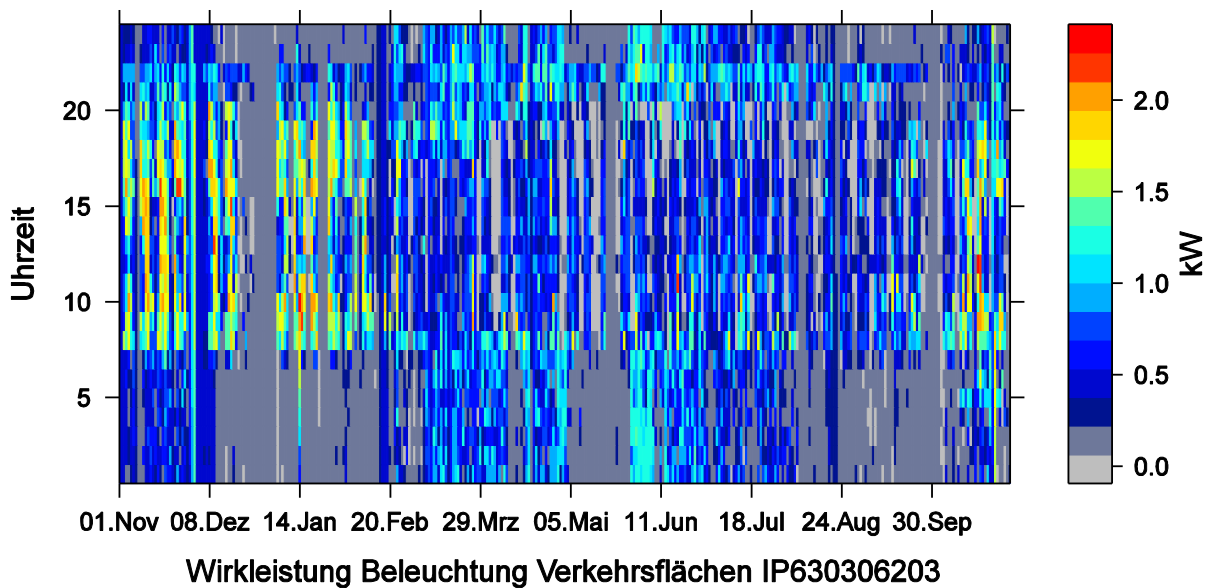


Abbildung 10-58: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die künstliche Beleuchtung der Verkehrsflächen von November 2014 bis November 2015 ohne erkennbare Fehlfunktionen

Die Situation für die Beleuchtung der Verkehrsflächen mittels Leuchtstoffröhren im Erdgeschoss stellt sich ähnlich dar wie die im Obergeschoss. So war ab Nutzungsbeginn des Gebäudes 2013 bis in den Juni 2014 die Beleuchtung auch in der Nacht eingeschaltet (siehe Abbildung 10-59).



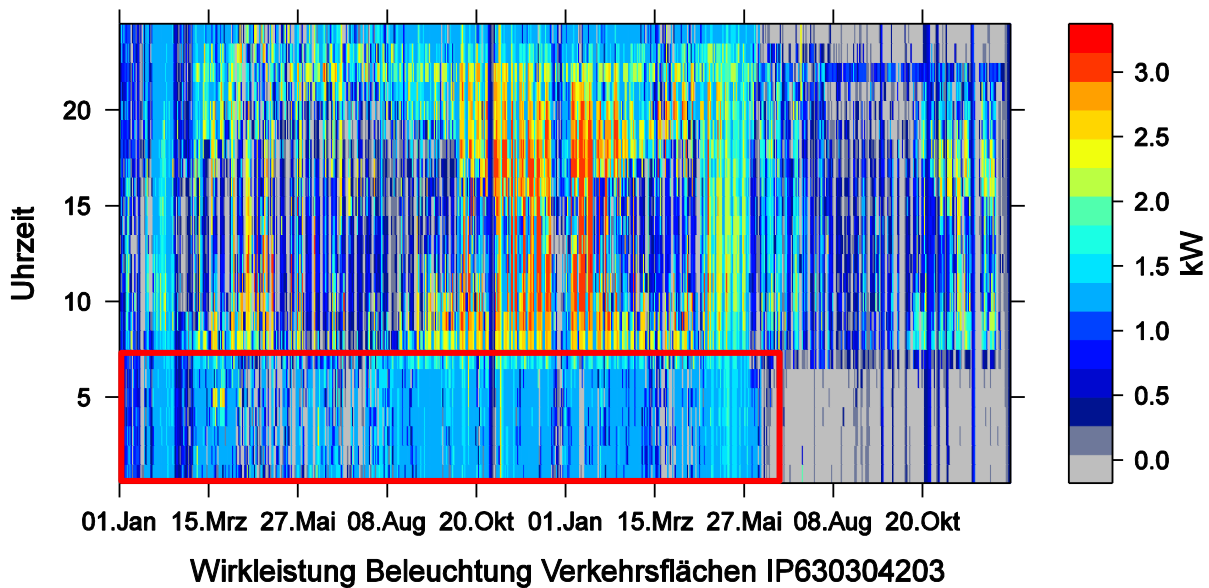


Abbildung 10-59: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die künstliche Beleuchtung der Verkehrsflächen im Erdgeschoss von 2013 bis 2014

Im Vergleich dazu, zeigt sich nach der Fehlerbeseitigung im Juni 2014 ein anderes Betriebsmuster mit nachvollziehbaren Verbrauchszeiten (siehe Abbildung 10-60). In der Abbildung 10-60 ist jedoch auch das Wiederauftreten der Fehlfunktion ab September 2015 sichtbar. Dies macht deutlich, dass kontinuierliches Monitoring und Fehlerbehebung notwendig ist.

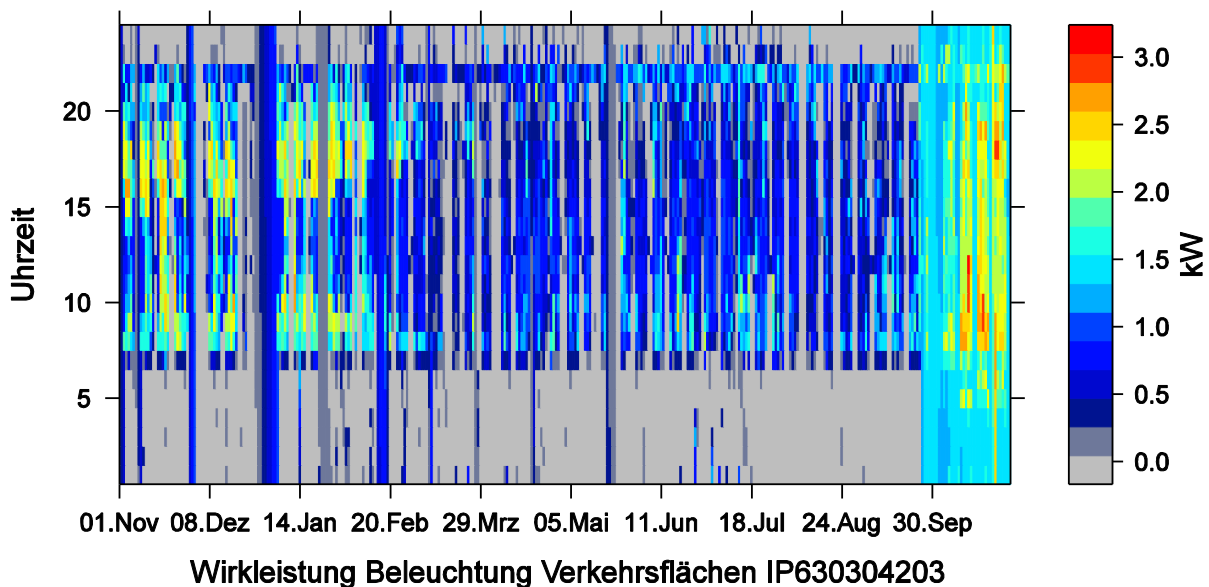


Abbildung 10-60: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die künstliche Beleuchtung der Verkehrsflächen im Erdgeschoss im Jahr 2015

Tabelle 10-39 : Verbrauch Elektroenergie künstliche Beleuchtung 2013 und 2014, Verkehrsflächen

Zähler Index	Fläche in m²								Jahresverbrauch kWh/a		spezifische Verbrauch kWh/m²a	
	1 (Einzelbüro)	16 (Sanitäräume)	17 (Sonstige Aufenthaltsräume)	18 (Nebenflächen, keine Aufenthaltsräume)	19 (Verkehrsflächen)	3 (Großraumbüro)	9 (Hörsaal)	Summen	2013	2014	2013	2014
630302202	0	26	0	107	209	0	0	342	2.299	2097	6,7	6,1
630304202	0	26	9,6	4	203	0	0	243	9.974	7.981	41,1	32,9
630306202	0	31	0	10	101	0	0	142	7.380	8.223	52,0	57,9
Summen	0	82	9,6	121	313	0	0	727				

### 10.11.2.2 Unterrichtsräume

#### 10.11.2.2.1 Situationsbeschreibung

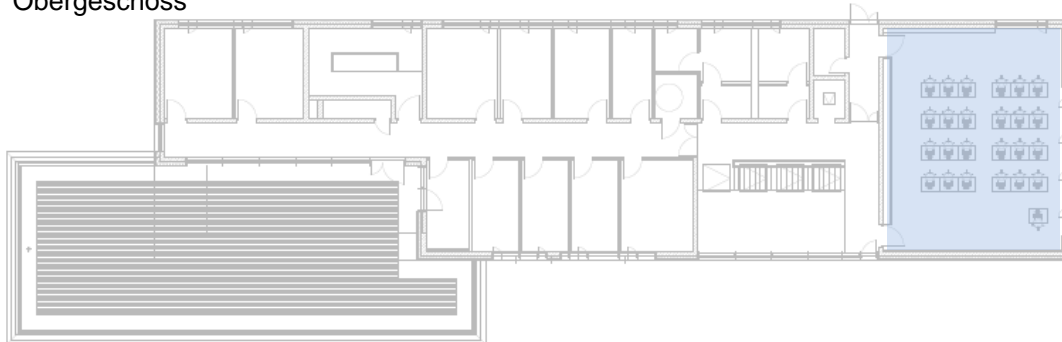
Mittels drei Elektroenergiezähler (630302222, 630304242, 630306242) wird der Verbrauch der künstlichen Beleuchtung der fünf Unterrichtsräume im Gebäude erfasst. Die Räume weisen eine unterschiedlicher Lage, Ausrichtung der Fenster und Nutzungscharakteristik auf. Drei Räume werden der Nutzungsrandbindung Hörsaal nach DIN V 18 599 (ohne interne Lasten, mit RLT-Anlage), zwei Räume (Planungslabore EG) der Nutzungsrandbindung „Großraumbüro“ zugeordnet. Die Zuordnung Großraumbüro ist begründet durch die Ausstattung dieser Räume mit je einem PC und Bildschirm je Arbeitsplatz.

In den Unterrichtsräumen sind neben den Deckenleuchten jeweils zwei Wandfluter mit zusammen 108 W zur Ausleuchtung der Tafeln installiert.

Tabelle 10-40 : Übersicht künstliche Beleuchtung in den Unterrichtsräumen

	Beleuchtungselement	elektrische Leistung		Zähler/ Leistung
		spezifisch W/m <sup>2</sup>	absolut W	
großer Hörsaal	Einbauleuchte Typ A4	122,1	1.344	630302202
kleiner Hörsaal	Anbauleuchte Typ A3	90,0	980	630304202
EDV-Labor EG	Hängeleuchte Typ A 2	111,7	1.440	
Computerpool EG	Hängeleuchte Typ A 2	58,1	980	
Seminarraum OG	Hängeleuchte Typ A 2	110,5	1.440	630306202
Summe			4.744	

Obergeschoss



Erdgeschoss

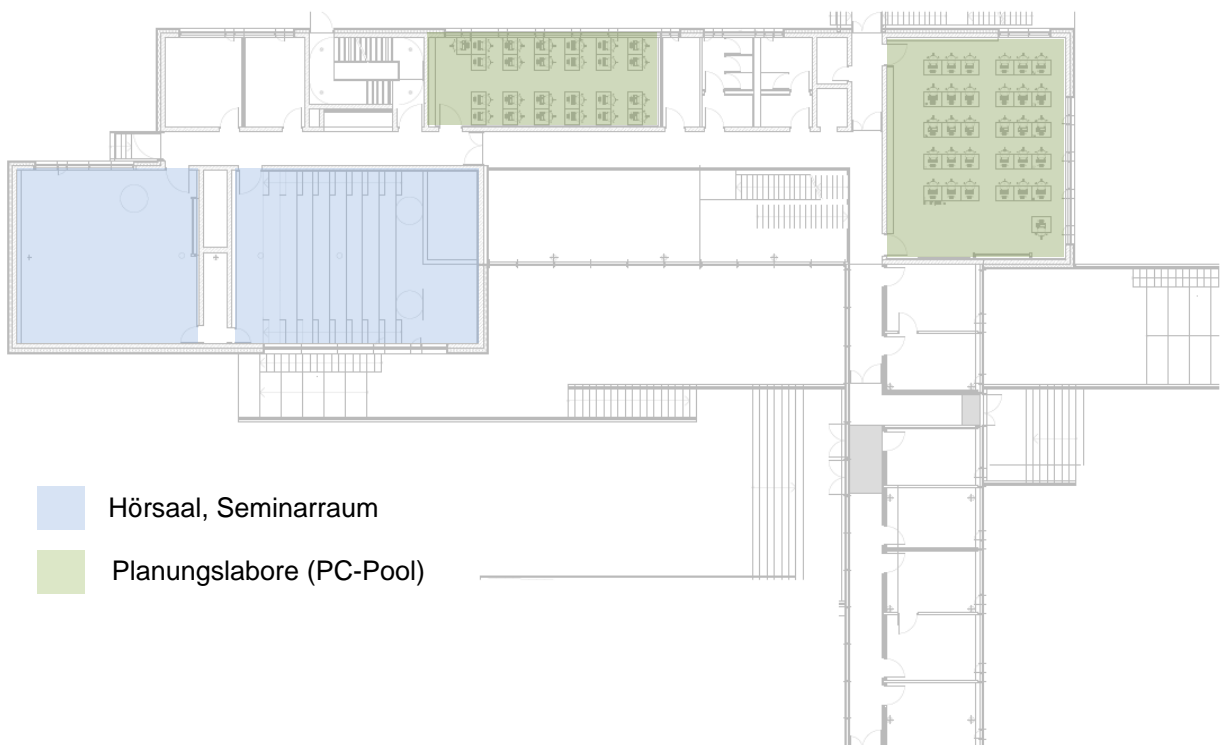


Abbildung 10-61: Übersicht zur Lage der Unterrichtsräume im Gebäude

Der mit festem Gestühl ausgestattete „große Hörsaal“ erstreckt sich vom Erdgeschoss ins Untergeschoss und ist abgetreppt. Damit ergibt sich ein unterschiedlicher Abstand zwischen Lichtquelle und Aufenthaltsbereich. Ein nach Süden orientierte Glasfassade sorgt für Tageslichtversorgung.

## 10 Ergebnisse im Detail



Abbildung 10-62: Blick in den Raum „großer Hörsaal“



Abbildung 10-63: Abbildung der Hängeleuchte im Raum Planungslabor EG identisch zu Seminarraum OG

### 10.11.2.2 Detaillierte Verbrauchsauswertung

Der monatliche Energieverbrauch folgt einem jahreszeitlichen Muster. Mit höherem Verbrauch im Winter von Oktober bis Januar. In den Sommer- und Ferienmonaten Juni bis September wird vergleichsweise sehr viel weniger Energie verbraucht.

Die Erfassung des Elektroenergieverbrauchs für künstliche Beleuchtung der drei Unterrichtsräume im Erdgeschoss ist mit einem Zähler zusammengefasst. Im Gegensatz zum Raum großer Hörsaal ist das jahreszeitliche Profil nicht so genauso stark ausgeprägt (vgl. nachfolgende Abbildung 10-65).

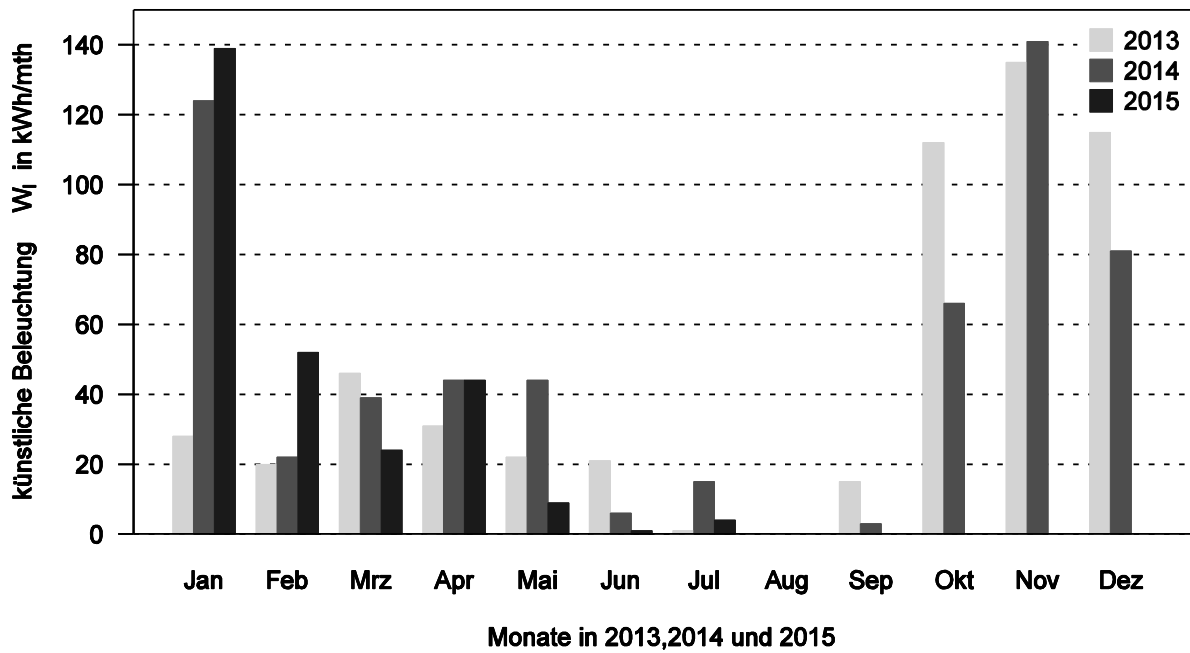


Abbildung 10-64: Verlauf des monatlichen Elektroenergieverbrauch für künstliche Beleuchtung Raum „großer Hörsaal“ (2015 bis August)

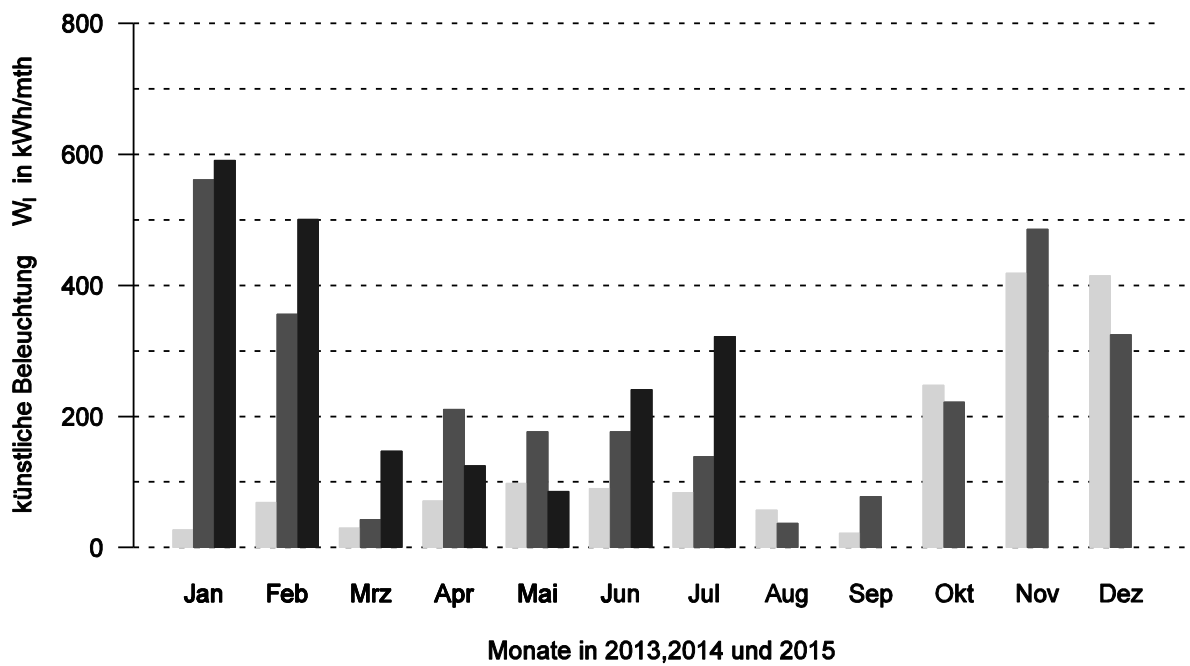


Abbildung 10-65: Verlauf des monatlichen Elektroenergieverbrauch für künstliche Beleuchtung drei Unterrichtsräume im Erdgeschoss (2015 bis August), Legende wie in Abbildung 10-64

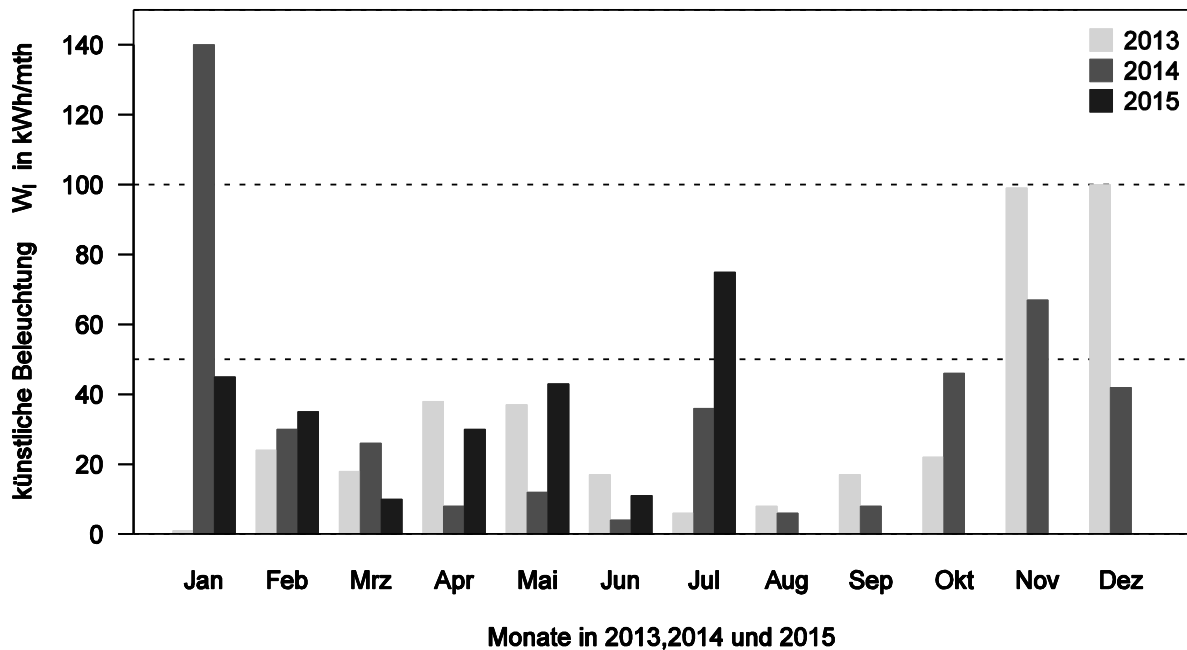


Abbildung 10-66: Verlauf des monatlichen Elektroenergieverbrauch für künstliche Beleuchtung für ein Unterrichtsräume im Obergeschoss (2015 bis August)

Für den Vergleich der Räume untereinander müssen spezifische Kennwerte gebildet werden. Der Vergleich mittels flächenspezifischer Kennwerte zwischen den Unterrichtsräumen (vgl. Abbildung 10-67) zeigt, dass Verbrauch in den Unterrichtsräumen EG deutlich über den der anderen liegt.

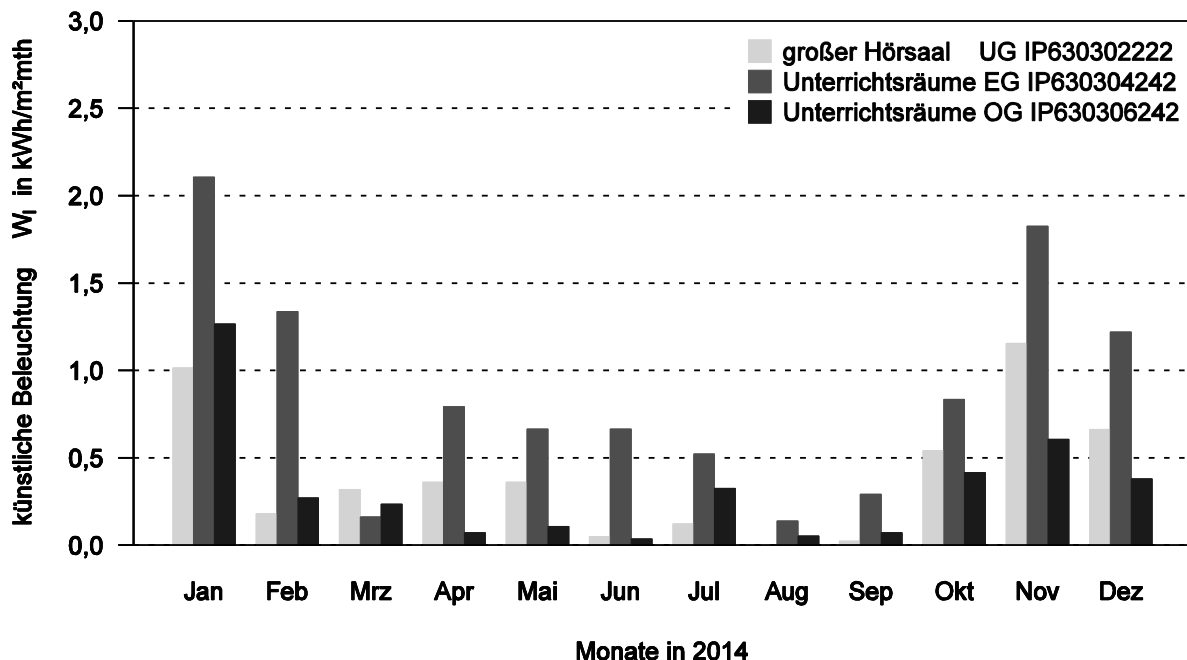


Abbildung 10-67: Gegenüberstellung des spezifischen monatlichen Elektroenergieverbrauchs für künstliche Beleuchtung der Unterrichtsräume, großer Hörsaal, Räume im Erd- und Obergeschoss

Die Jahresauswertung vgl. Tabelle 9-21 weist für die Räume im Erdgeschoss einen doppelt so hohen Energieverbrauch aus.

Tabelle 10-41 : Verbrauch Elektroenergie künstliche Beleuchtung 2013 und 2014

Zähler Index	Fläche in m²								Jahresver- brauch kWh/a		spezifische Verbrauch kWh/m²a	
	1 (Einzelbüro)	16 (Sanitäräume)	17 (Sonstige Aufenthaltsräume)	18 (Nebenflächen, keine Aufenthaltsräume)	19 (Verkehrsflächen)	3 (Großraumbüro)	9 (Hörsaal)	Summen	2013	2014	2013	2014
630302222	0	0	0	0	0	0	122	122	545	587	4,5	4,8
630304242	0	0	0	6	0	170	90	266	1.630	2.812	6,1	10,6
630306242	0	0	0	0	0	0	110	110	387	425	3,5	3,8
Summen	0	0	0	6	0	170	322	498	2.562	3.662	5,14	7,35

In der nachfolgenden Darstellung (Abbildung 10-56) ist die Leistungsaufnahme der künstlichen Beleuchtung im Erdgeschoss über zwei Jahre dargestellt. Im Vergleich zu der Leistungsaufnahme der Beleuchtung der Verkehrsflächen können deutliche Unterschiede festgestellt werden. Die Beleuchtung ist überwiegend nicht in Betrieb, in der Morgen- und Nachstunden kann grundsätzlich kein Betrieb festgestellt werden. Exemplarisch ist in der Abbildung 10-69 der Verlauf für zwei Monate im gezeigt. Deutlich sind Beginn und Energie der Raumnutzung sowie Wochenenden erkennbar. Fehler in der Betriebsführung bzw. Nutzung können nicht festgestellt werden.

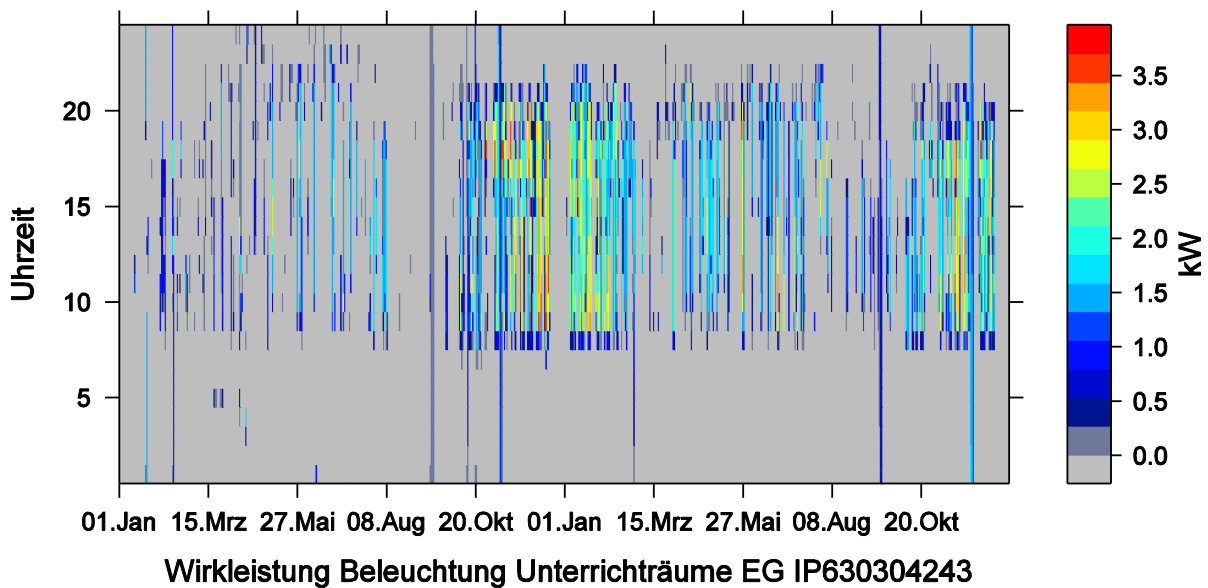


Abbildung 10-68: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die künstliche Beleuchtung der Unterrichtsräume im Erdgeschoss von 2013 bis 2014

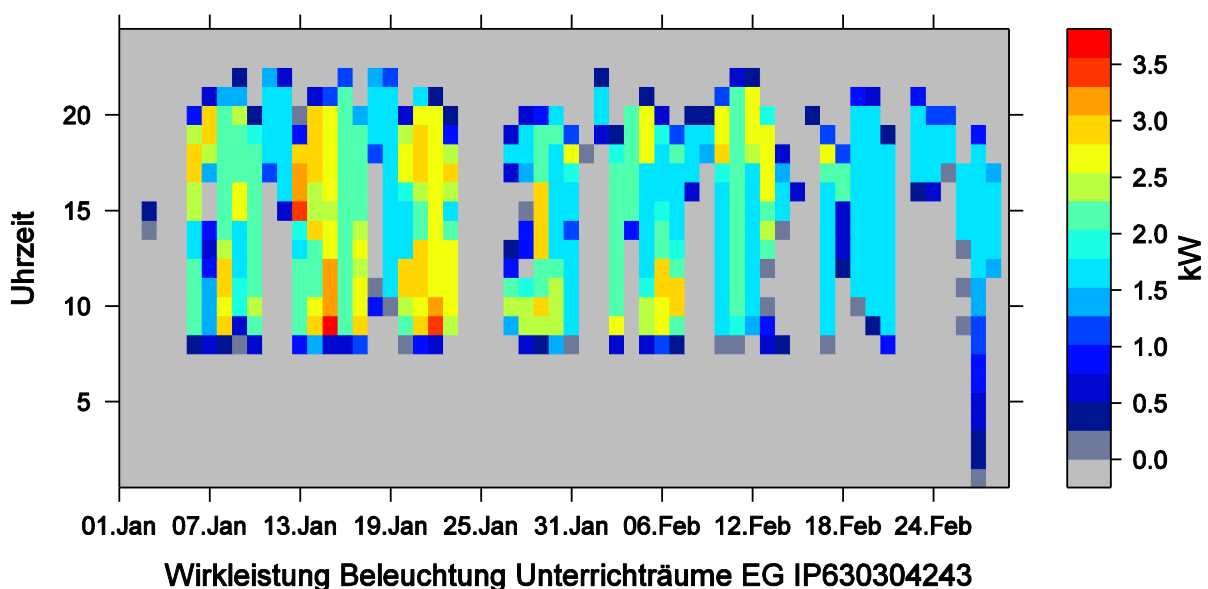


Abbildung 10-69: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die künstliche Beleuchtung der Unterrichtsräume im Erdgeschoss Januar 2014 bis Ende Februar 2014

### 10.11.2.3 Büroräume

#### 10.11.2.3.1 Situationsbeschreibung

Mittels zweier Zähler (630306222, 630304222) wird der Verbrauch für künstlicher Beleuchtung von 21 Büroräumen bzw. Arbeitsräumen mit unterschiedlicher Lage im Gebäude, Ausrichtung der Fenster und Nutzung erfasst. Die Büroräume im Erdgeschoss sind auf der Ostseite des Verbinderbauwerks zwischen dem Hauptgebäude und Altbau verortet. Die Räume werden von Mitarbeiter sowie dem Dekan genutzt. Drei Räume werden nicht als Büroräume sondern als Druckraum, Poststelle und Besprechungsraum genutzt (grün und orangemarkiert). Die Büroräume im Obergeschoss des Hauptgebäudes sind nach Süden und Norden orientiert und werden hauptsächlich von Professoren



oder Mitarbeitern genutzt. Alle Büroräume werden als Einzelbüro genutzt. Hinsichtlich der Nutzung ist in den Büroräumen im Erdgeschoss von einer typischen Büronutzung und im Gegensatz dazu in den Räumen im OG teilweise von einer atypischen Nutzung auszugehen. Die atypische Nutzung ist durch niedrige Anwesenheit in den Büroräumen begründet.



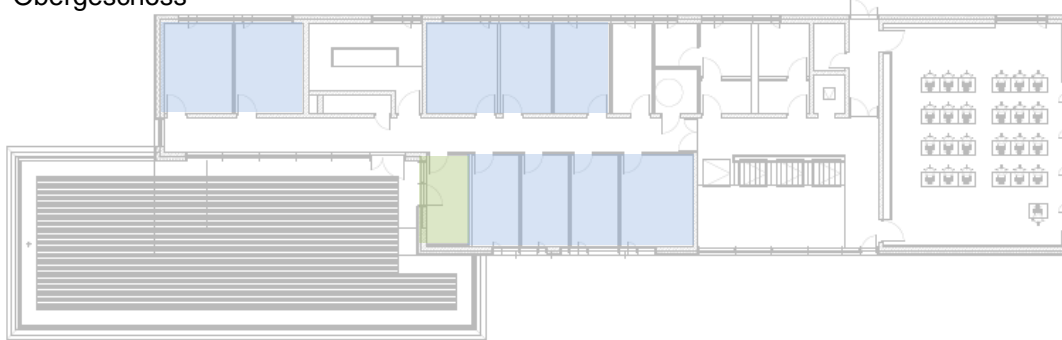
Abbildung 10-70: Büro mit Pendelleuchten [[14]]

Tabelle 10-42 : Übersicht künstliche Beleuchtung in den Arbeitsräumen

	Beleuchtungselement	elektrische Leistung		Zähler/ Leistung
		spezifisch W/m <sup>2</sup>	absolut W	
10 Arbeitsräume OG	Hängeleuchte Typ A1 und A2	13,45	2.003	630306222
9 Arbeitsräume EG		11,26	1.720	630304222

## 10 Ergebnisse im Detail

### Obergeschoss



### Erdgeschoss

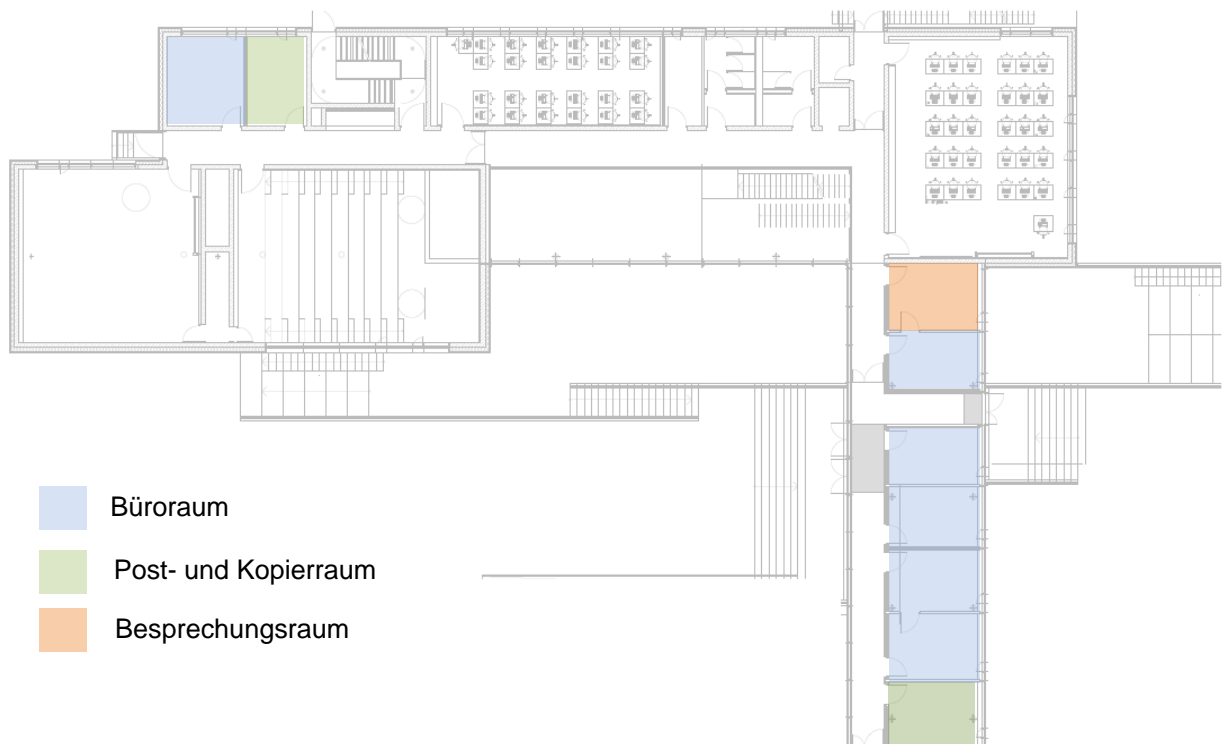


Abbildung 10-71: Grundrisse EG und OG mit Zuordnung Zähler zu Flächen

In den ersten Betriebsjahren wurden keine Fehler in der Installation bzw. Automation festgestellt. Nutzerbeschwerden zur künstlichen Beleuchtung in den Arbeitsräumen, einschließlich der Regelung, wurden nicht bekannt. Es wurde keine wesentlichen Änderungen an der Beleuchtungssteuerung vorgenommen. Der monatliche Elektroenergieverbrauch ist deutlich vom Kalendermonat des Jahres abhängig. Für die ausgewerteten Jahre ist der Verbrauch in den Monaten sehr ähnlich. Der spezifische Verbrauch ist im Erdgeschoss etwas niedriger als im Obergeschoss.

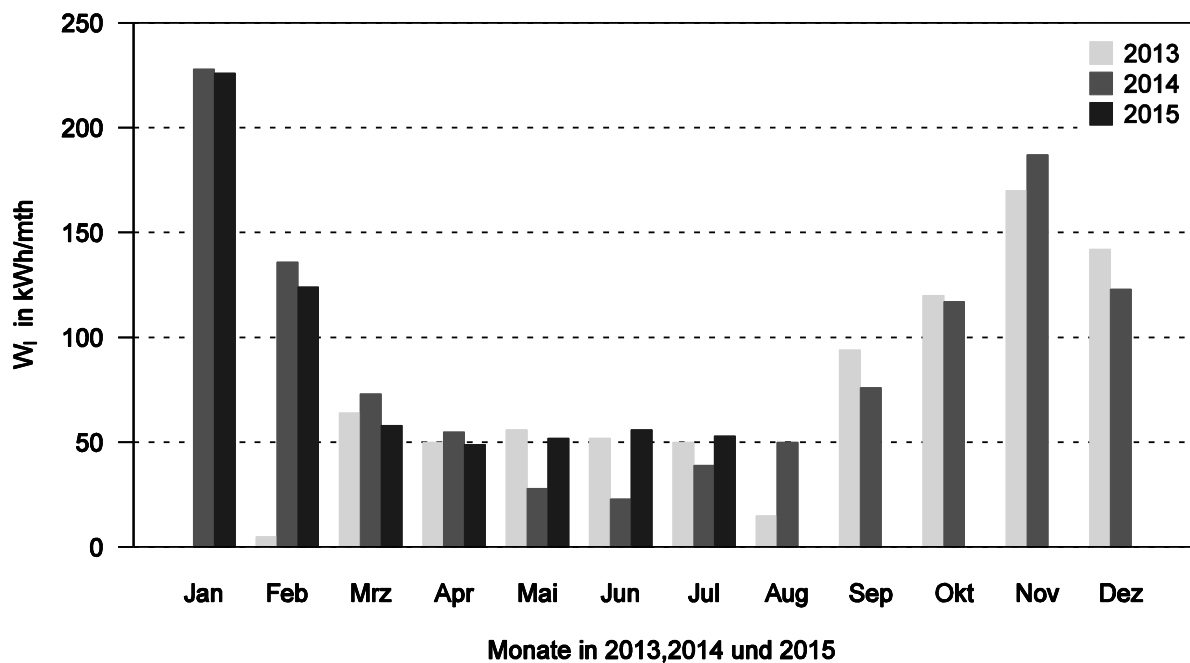


Abbildung 10-72: Gegenüberstellung monatlicher Elektroenergieverbrauch für künstliche Beleuchtung Büros

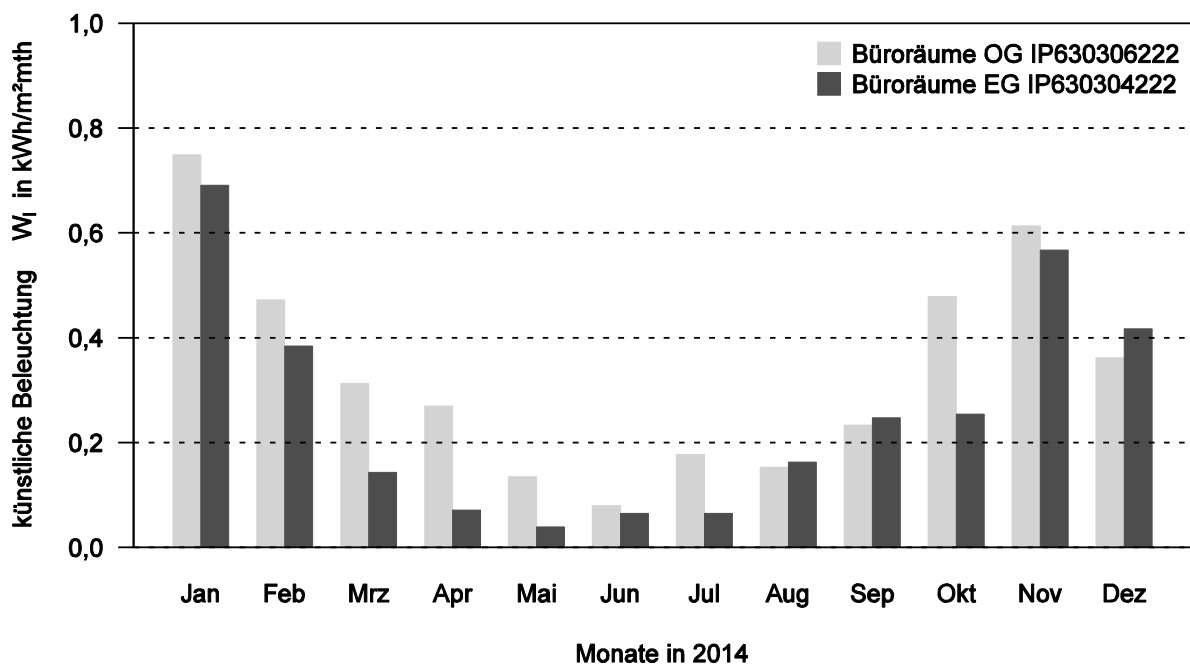


Abbildung 10-73: Gegenüberstellung spezifischer monatlicher Elektroenergieverbrauch für künstliche Beleuchtung Büros im Ober- und Erdgeschoss

Tabelle 10-43 : Übersicht künstliche Beleuchtung

Zähler Index	Fläche in m²								Jahresverbrauch kWh/a		spezifische Verbrauch kWh/m²a	
	1 (Einzelbüro)	16 (Sanitäräume)	17 (Sonstige Aufenthaltsräume)	18 (Nebenflächen, keine Aufenthaltsräume)	19 (Verkehrsflächen)	3 (Großraumbüro)	9 (Hörsaal)	Summe	2013	2014	2013	2014
630304222	120	0	33,5	0	0	0	0	153,5	271	478	1,8	3,1
630306222	152	0	10,7	0	0	0	0	163,7	546	660	3,4	4,1
Summe	272		44,2	0	0	0	0	316,2	817	1038	2,58	3,28

Folgende Aspekte sollten bei der Interpretation berücksichtigt werden. Das Tageslichtangebot schwankt jahreszeitlich. Die Gebäudenutzung unterliegt wöchentlichen, jahreszeitlichen Schwankungen. Für Optimierungen wurde die Beleuchtungssteuerung geändert. Die Bildung eines funktionalen Zusammenhangs ist nur für Nutzungszeiten sinnvoll.

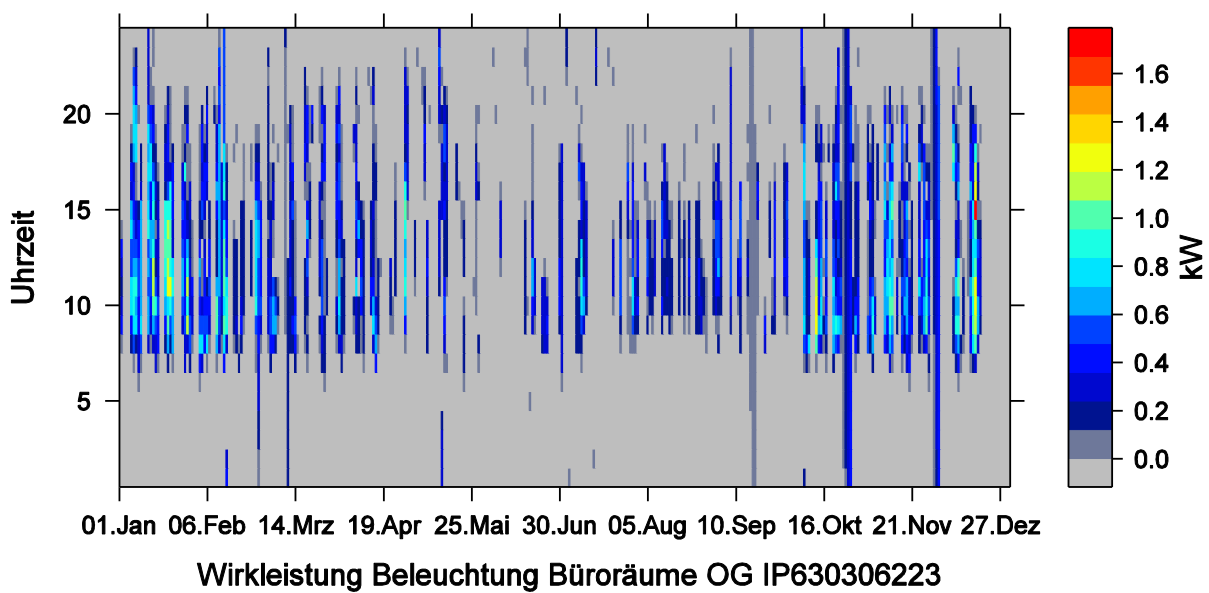


Abbildung 10-74: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die künstliche Beleuchtung der Büroräume im Obergeschoss im Jahr 2014

In der exemplarischen Darstellung über zwei Monate zeigt sich ein deutlich vom Wochentag abhängiges Verbrauchsprofil mit teilweise langen Nutzungszeiten.

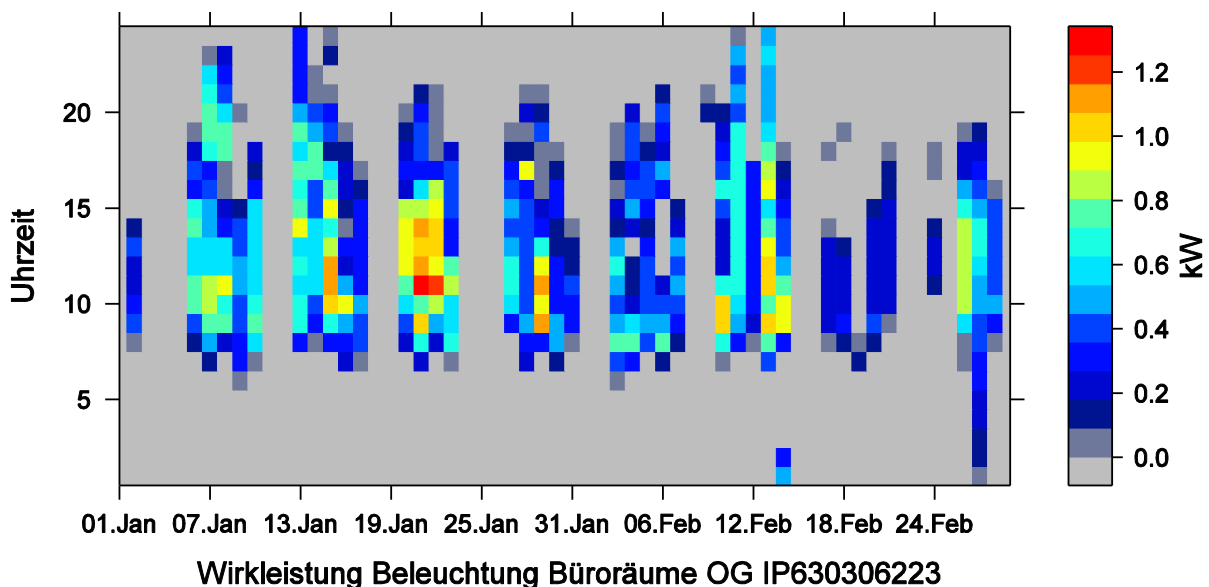


Abbildung 10-75: Carpet-Plot der elektrischen Leistung für die künstliche Beleuchtung der Büroräume im Obergeschoss Januar 2014 bis Ende Februar 2014

## 10.12 Elektroenergieverbrauch Nutzer

Die Elektroinstallation und Verbrauchserfassung ist nach Verbrauchergruppe und Geschoss differenziert aufgebaut. In den Unterverteilungen sind insgesamt sechs Elektroenergiezähler (EZ) zur Erfassung des Verbrauchs der elektrischen Energie für Arbeitsmittel installiert. Die EZ erfassen den Energieverbrauch wie auch die elektrische Leistung. Es werden damit zwei Datenpunkte pro

EZ ausgewertet. Unter Arbeitsmittel werden Verbraucher erfasst, die über Schutzkontaktsteckdosen für 230 Volt versorgt werden.

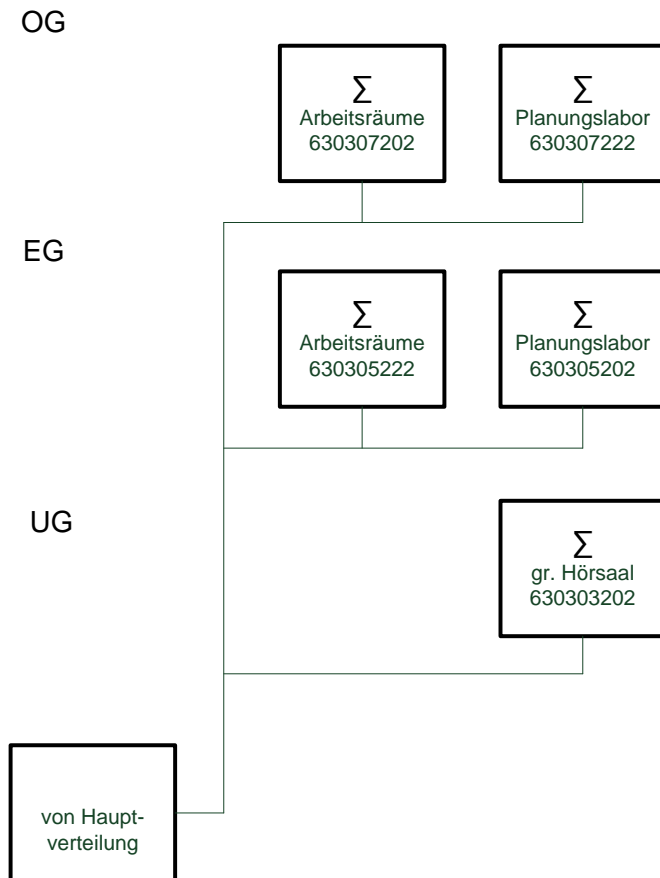


Abbildung 10-76: Zählerstruktur zur Erfassung des Energieaufwands der Arbeitsmittel

Die Zähler Planungslabor im OG und großer Hörsaal erfassen jeweils einen Raum. Der Zähler Planungslabor (630350202) im Erdgeschoss erfasst drei Unterrichtsräumen von den zwei Räumen als PC-Pools betrieben werden und damit ein besonderes Verbrauchsprofil erwarten lassen.

### 10.13 Energiezähler der Umwälzpumpen

Im Gebäude werden von 24 Umwälzpumpen Datenpunkte aufgezeichnet. Einer ist der jeweilige Stromverbrauch der Pumpe.

### 10.14 Trinkwasserverbrauch

Im Verlauf des Trinkwasserverbrauchs sind deutlich zwei horizontale Linien erkennbar, die auf ein widerkehrendes automatisch Ereignis hindeuten.

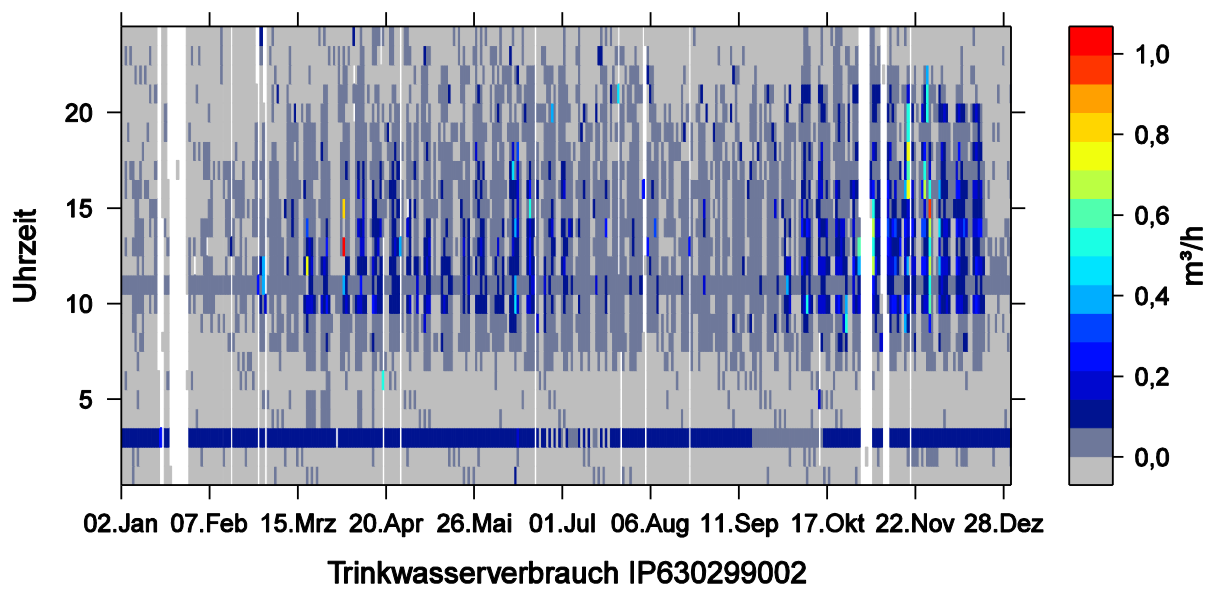


Abbildung 10-77: Carpet-Plot 2013 Trinkwasserverbrauch

Auffällig zudem ein Verbrauch am Wochenende, der nicht erklärt werden kann. Deutlich ist jedoch ein Wochentags-Muster erkennbar.

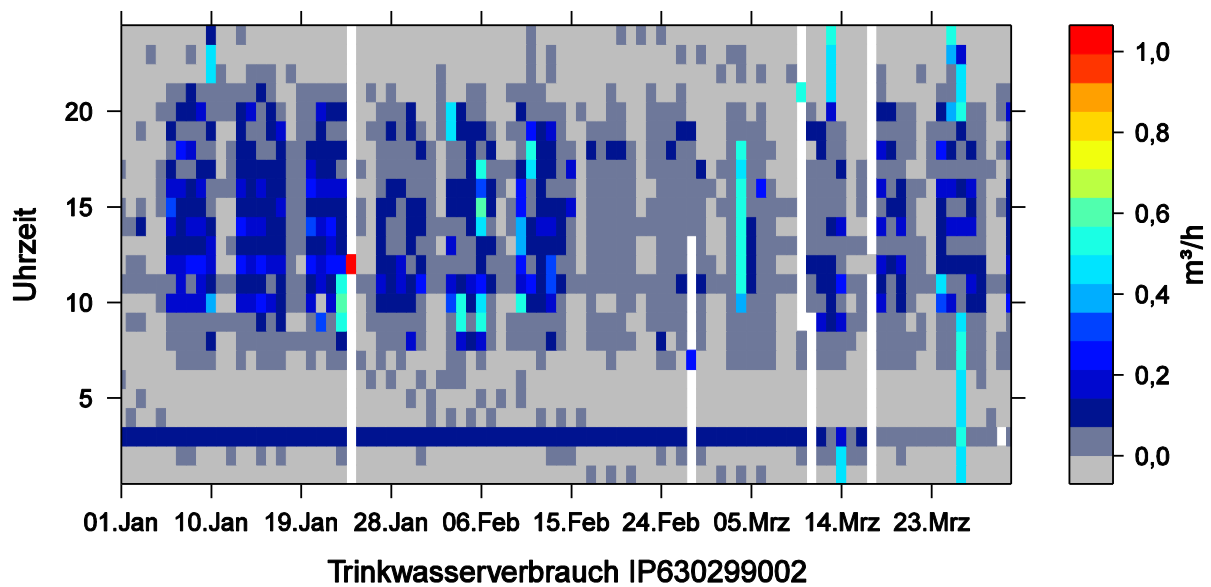


Abbildung 10-78: 2014 Trinkwasserverbrauch kalt Auszug

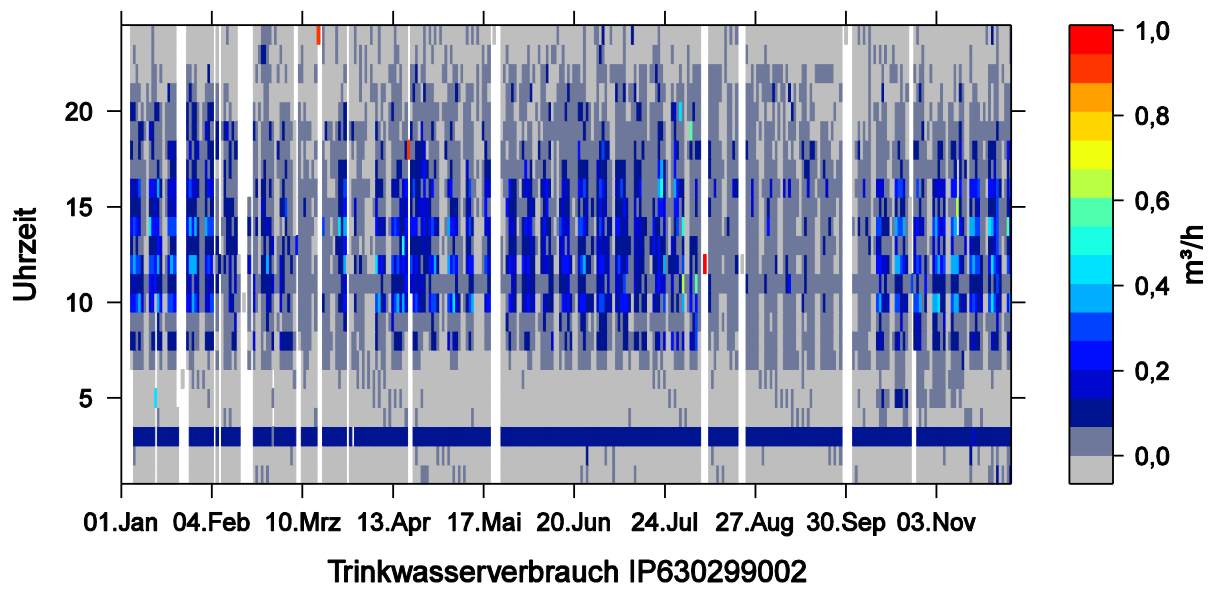


Abbildung 10-79: 2015 Trinkwasserverbrauch kalt Auszug

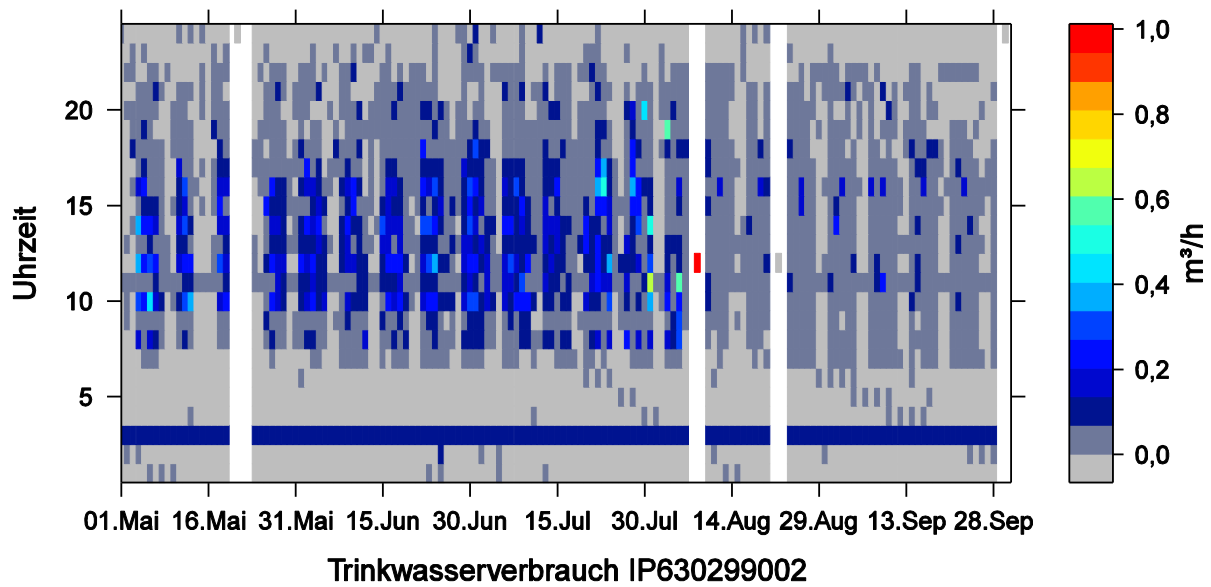


Abbildung 10-80: 2015 Auszug Trinkwasserverbrauch kalt Auszug



# 11 Thermische Behaglichkeit

## 11.1 Fragebogen

Es wurde der Fragebogen verteilt. Jedoch wurde dieser nur von 5 ausgefüllt, sodass eine sinnhafte Auswertung nicht möglich war.

## 11.2 PMV-PPD

Die DIN EN ISO 7730:2006 [99] gibt einen normativen Rahmen für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit auf Grundlage physikalischer Eingangsparameter für aktiv konditionierte Räume. Das Modell geht auf Fanger zurück und findet breite Anwendung in Planung und Betrieb von Gebäuden. In der DIN EN ISO 7730 werden drei Komfortklassen A,B,C in Abhängigkeit des PPD gebildet. Die Klasse B kann als Zielvorgabe für Neubauten gelten. Das Messverfahren zur Erfassung des Umgebungsklima ist in der DIN EN ISO 7726 beschrieben [100]. Eingang in die Berechnung des PPD finden die folgenden Parameter.

Tabelle 11-1: Übersicht der Eingangsparameter zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Herkunft
Bekleidung	$I_{cl}$	clo	Annahme
Energieumsatz	M	met	Annahme 1,2 met
Lufttemperatur	$t_a$	°C	Messung
Mittlere Strahlungstemperatur	$\bar{t}_r$	°C	Berechnung aus Luft- und Globtemperatur (Seite 20 [100])
Relative Luftgeschwindigkeit	$v_{ar}$	m/s	Messung
Relative Luftfeuchte	e,RH	%	Messung
Wasserdampfpartialdruck	$p_a$	Pa	Berechnung aus RH

Die Umsetzung der Zusammenhängen in der DIN EN ISO 7730 erfordert die iterative Lösung einer Wärmebilanzgleichung. Am IBIT Institut steht zu dem Behaglichkeitsmessplatz ein Computerprogramm zur Ausgabe der Ergebnisse zur Verfügung. Die Ergebnisse dieses Programms stimmen mit beispielhaften Ergebnissen überein.

Um die Messdaten des Gebäude-Monitorings und die berechneten PMV-PPD Werte zusammenzuführen wurde das Computer Programm zur Berechnung von PMV und PPD in BASIC aus der DIN EN ISO 7730:2006-05 Anhang D [99] in die Programmiersprache R-Project überführt. Zunächst konnten die in der Norm veröffentlichten beispielhaften Ergebnisse nicht erreicht werden. Die intensive Begutachtung des Code in der DIN EN ISO 7730:2006-5 im Vergleich mit der ISO 7730:2005 [101] zeigte, dass der in DIN EN ISO 7730:2006-5 [99] abgedruckte Code fehlerhaft ist. Der Fehler ist wie folgt:

In der Zeile 440 des Computerprogramms steht:

```
HL1 = 3.05*.001*(5733- 6.99 - MW-PA)
```

richtig ist jedoch

```
HL1 = 3.05 * .001 (5733-6.99 * MW-PA)
```

Mit dem korrigierten Code konnte eine Übereinstimmung mit den Testergebnissen erreicht werden. Diese Klassen werden in der [102] als Klassen I,II,III für Auslegung der Energieeffizient und Raumklima übernommen. Für den Standardfall wird die Klasse II angegeben. Die DIN EN 15251 stellt in der Bewertung auf operativen Temperaturen ab. Das auch in der DIN EN 15251 präsentierte adaptive Komfortmodell ist die Räume im untersuchten Gebäude nicht anwendbar da alle Räume aktiv gekühlt werden. Einschränkend dazu ist festzuhalten, dass gegebenenfalls die Büroräume mit Kühldecken ein Grenzfall zwischen statischem und adaptivem Komfortmodell darstellt.

### 11.3 Bekleidung

Die Bekleidung hat einen bedeuteten Einfluss auf den thermischen Komfort. Für die Bestimmung des PMV muss die Wärmedämmstärke der Bekleidung ausgedrückt als Bekleidungsisolation  $I_{cl}$  in Bekleidungseinheit clo °C/W entsprechend der zu erwartenden Bekleidung der Gebäudenutzer festgelegt werden. Die Tabelle C.1 in der DIN EN ISO 7730:2006 gibt hier Beispiele [99] .

Tabelle 11-2: Beispielhafte Bekleidungskombinationen und der dazugehörige Isolationswiderstand

typische Bekleidungskombinationen	$I_{cl}$ in clo
Unterhose, Hemd mit kurzen Ärmeln, leichte Hose, leichte Socken, Schuhe	0,5
Slip, Petticoat, Strümpfe, Kleid, Schuhe	0,7
Slip, Hemd, Hose, Pullover ( <i>Jacke</i> ), Socken, Schuhe	1,0

Diese Festlegung ist mit hoher Unsicherheit, bei gleichzeitig hohem Einfluss auf den ausgewiesenen Komfort, von besonderer Bedeutung. Für den Sommerfall können leichte Bekleidungen für den Winter warme Bekleidungen angenommen werden. Die in der Fachwelt etablierte Festlegung 0,5 clo im Sommer und 1,0 im Winter [99] [102] wird gemeinhin als ungenau aufgefasst [104] [105] [106].

In den letzten Jahren wurden verschiedene Arbeiten zur Vorhersage der Bekleidungsstärke veröffentlicht. Diese Studien zeigen, dass die Außentemperatur um 6:00 Uhr (morgens) einen bedeutenden Einfluss auf die Wahl der Bekleidung am Tag hat [106].

Die in [105] beschriebenen Modelle können zum Teil die Abhängigkeit der Bekleidung von Außentemperatur erklären. Es wird dargestellt, dass andere überlagernde physikalische und soziale Faktoren sehr bedeutsam sind. Das Geschlecht scheint kaum einen Einfluss zu haben. Untersuchungen auf Basis internationaler Datenerhebungen zeigen, dass für den Winterfall/Heizfall die  $I_{cl}=1,0$  clo als überschätzt angesehen werden muss [104]. So liegt der Median der Bekleidungsstärke für den Winterfall, aller in [104] eingeschlossenen Daten (aus USA, Australien, Kanada) bei  $I_{cl} = 0,69$  clo und für Daten aus Kanada bei 0,8 clo. Hinsichtlich der Bekleidungswahl sollten weitere Untersuchungen für Mitteleuropa durchgeführt werden.

Das in [104] gefundene Regressionsmodell weist erst unter einer Temperatur von  $\theta_e = -10^\circ\text{C}$  um 6:00 Uhr morgens, ein von  $I_{cl} = 0,8$  clo aus. Hinsichtlich der sommerlichen Bekleidung wird bei einer Bekleidungsstärke von ein  $I_{cl} = 0,4$  clo die untere Grenze gefunden [106].

Die Autoren in [105] schlagen ein außentemperaturabhängiges Modell zur Beschreibung der Bekleidungsstärke vor (Gl. 15). Dieses Modell unterscheidet sich von den tatsächlich gefundenen

Regressionsmodell dadurch, dass bereits ab -5 °C um 6:00 Uhr die hohe Bekleidungsstärke 1,0 clo angenommen wird.

$$\theta_{e,6:00} < -5^{\circ}\text{C} \text{ clo}=1$$

Gl. 15

$$\text{für } -5^{\circ}\text{C} \leq \theta_{e,6:00} < 5^{\circ}\text{C} \text{ clo} = 0,818 - 0,0364 * \theta_{e,6:00}$$

$$\text{für } 5^{\circ}\text{C} \leq \theta_{e,6:00} < 26^{\circ}\text{C} \text{ clo} = 10^{(-0,1635 - 0,0066 * \theta_{e,6:00})}$$

$$\theta_{e,6:00} \geq 26^{\circ}\text{C} \text{ clo} = 0,46$$

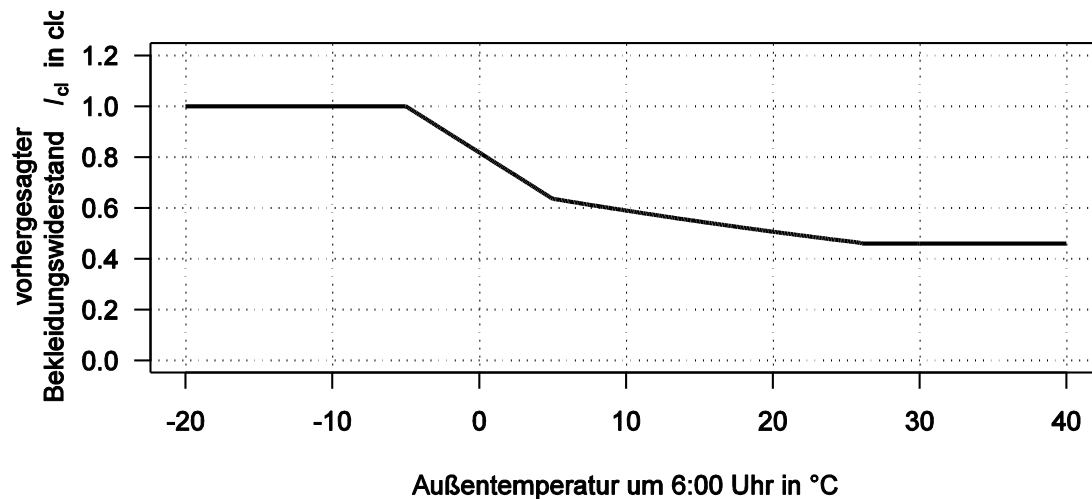


Abbildung 11-1: Modell zur Vorhersage der Bekleidung als Funktion der Außentemperatur um 6:00 Uhr aus [104]

Findet dieses Modell auf die gemessene Außentemperatur am Gebäudestandort von 2013 bis 2015 Anwendung, ergibt sich die nachfolgende Verteilung der Bekleidungsstärke. In der Abbildung sind monatsweise die tägliche Bekleidungsstärke als Boxplot dargestellt.

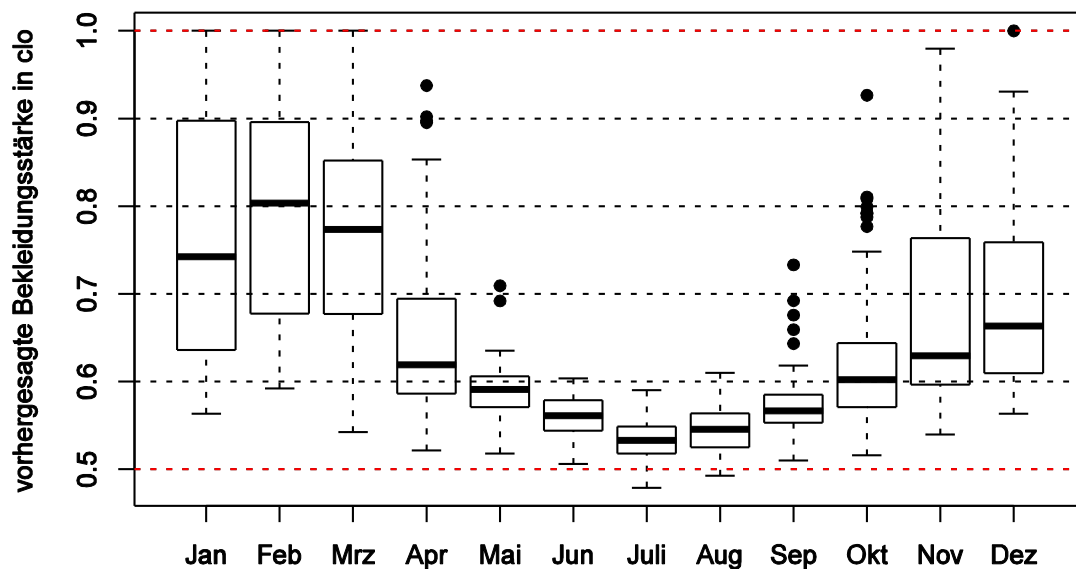


Abbildung 11-2: Boxplot der vorgegesagten täglichen Bekleidungsstärke als Funktion der Außentemperatur um 6:00 Uhr monatsweise von 2013 bis einschließlich 2015

Im Vergleich zwischen Sommer und Winter wird die hohe Spannweite im Winter deutlich. Bestätigt sich die hohe Varianz der Bekleidungsstärke im Winter, sind pauschale Annahmen zur Bekleidungsstärke, zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit aus Messdaten diskussionswürdig. Die niedrigere Bekleidungsstärke im Winter kann dahin gehend interpretiert werden, dass die Raumtemperatur in den meisten Fällen ausreichend hoch ist um auch bei geringeren Außentemperaturen Behaglichkeit der Nutzer zu erreichen oder dass die Nutzer bereit sind kühles Empfinden hinzunehmen. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass im Gegensatz zum Sommer, für den Winterfall eine höhere Gestaltungsmöglichkeit der Nutzer hinsichtlich der Bekleidungsstärke gegeben ist. Die Notwendigkeit weitere Untersuchungen zu den Wirkhintergründen auf die Wahl der Bekleidung und die daraus resultierenden Komfortansprüche sind unstrittig. Insbesondere für Mitteleuropa sind keine Erhebungen bekannt.

Im untersuchten Gebäude gibt keine Bekleidungsordnung bzw. Dress Code. Alle Nutzer können ihre Bekleidung frei wählen. Lediglich in den Sommermonaten kann davon ausgegangen werden, dass die männlichen Lehrenden einem informellen „Drees code“ folgen und mit Sakko auf Hemd, tendenziell eine höhere Bekleidungsstärke wählen. Die Bekleidungsstärke der Gebäudenutzer im Betrieb und während der Messungen wurde nicht beobachtet. In den Auswertungen der Messungen wird auf den Einfluss der Bekleidung eingegangen-

### 11.4 Aktivitätsgrad

Im gesamten Bereich des Gebäudes kann von sitzender leichter Tätigkeit ausgegangen werden. Lediglich für die Dozenten kann von einer erhöhten körperlicher Aktivität ausgegangen werden. Der Energieumsatz  $M$  wird in metabolischen Einheiten  $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$  ausgedrückt. Er kann als konstant angesehen werden und wird für Sommer und Winter mit  $\text{Met} = 1,2 \text{ met}$  für sitzend leichte Tätigkeit festgelegt.

### 11.5 Operative Raumtemperatur

Neben der Bewertung mittels PPD bzw. PMV findet in der Praxis die Raumtemperatur zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit breite Anwendung. In der Literatur wird die operative Temperatur der empfundene Temperatur oder auch der Raumtemperatur gleichgesetzt.

Die operative Temperatur kann entsprechend DIN EN ISO 7726:2004-4 ([100] Seite 59) erhoben werden. Üblich ist die Berechnung mit nachfolgender Gl. 16 wenn die Luftgeschwindigkeit  $v < 0,2 \text{ m/s}$  und die Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Strahlungstemperatur  $\bar{t}_r$  und Lufttemperatur  $t_a$  kleiner als 4 K ist

$$t_0 = \frac{t_a + \bar{t}_r}{2} \quad \text{Gl. 16}$$

Zusammen mit den Grundannahmen der DIN EN ISO 7730:2006-5 lässt sich für einen gegebenen Bereich des thermischen Komfort ein anzustrebendes Temperaturband ausweisen (vgl. [102]).

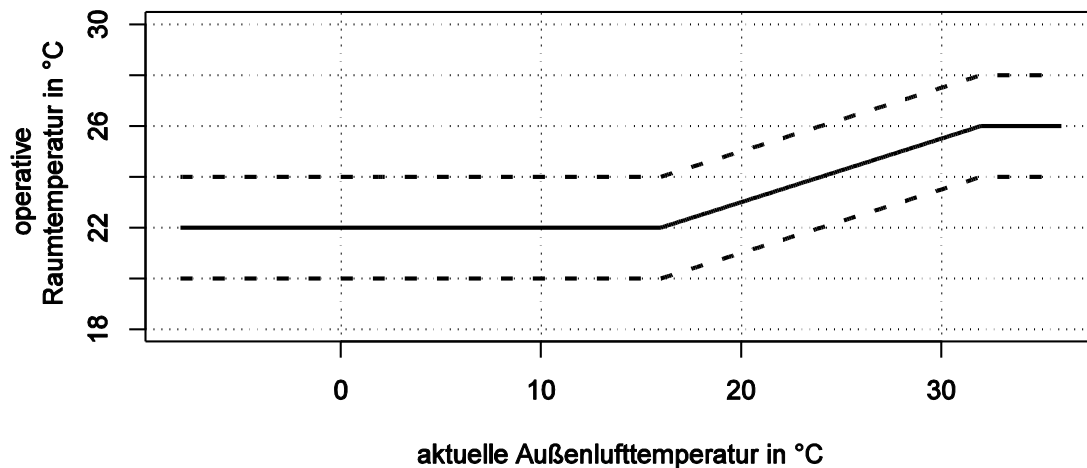


Abbildung 11-3: Änderung der zulässige operativen Temperatur durch saisonale Anpassung der Bekleidungsstärke Abbildung nach [102]

Die für die Berechnung der operativen Temperatur notwendige Strahlungstemperatur ist messtechnisch nur aufwendig zu bestimmen. In der Praxis hat sich die direkte Ableitung der operativen Temperatur aus der gemessenen der Globetemperatur mittels Globethermometer bewehrt [103].

## 11.6 Ergebnisse

Die Messungen begannen Zusammen mit der Inbetriebnahme des Gebäudes im Januar 2013 im damals noch nicht genutzten Gebäude. Die Durchführung der Messungen wurde von der teils fehlerhaften Regelung behindert, da einige Räume nicht beheizt werden konnten.

Die Messungen in den Büros und in den Räumen mit RLT-Anlagen wurden mittels mobiler Messtechnik für mehrere Stunden durchgeführt. Die Ergebnisse repräsentieren damit eine exemplarische Bewertung. Wenn die Räume während der Messungen nicht genutzt wurden, dann wurde diese in möglichst Betriebssituation versetzt.

### 11.6.1 Büro 1.E.14

Mit Hilfe von Thermographieaufnahmen konnte der Betrieb der Deckenheizung festgestellt bzw. bewertet werden. Die Temperatur der Decke betrug  $\theta_{S,Decke} \approx 30$  °C, die Wand Temperatur in etwa Raumlufttemperatur  $\theta_{S,Wand} \approx 21$  °C. Die Temperatur des Rahmen der VHF  $\theta_{S,Rahmen} \approx 15$  °C. Die Aufnahmen und eine detaillierte Erläuterung sind im Abschnitt 10.4 Seite 159 dargestellt.

Mittels Thermographiekamera wurde das Aufheizverhalten der Decken beobachtet. Kurz nach der herbeigeführten Änderung des Sollwertes über den aktuellen Temperaturwert öffnet das Raumventil und gibt die Durchströmung frei. Die Kapillarohrmatten werden durch das warme Wärmeträgerfluid durchströmt und erwärmen die Decke. In der Abbildung 11-4 ist die anfängliche Erwärmung der Kapillare gut zu erkennen. Bereits in weniger als 4 Minuten ist die Platte zur Hälfte erwärmt. Innerhalb von sieben Minuten hat die Decke die Betriebstemperatur erreicht.

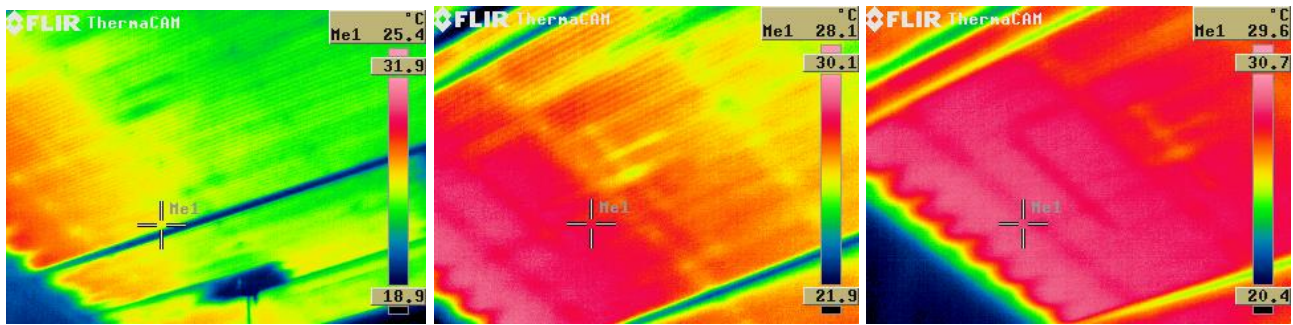


Abbildung 11-4: Zeitlicher Verlauf der Erwärmung einer Heizdecke am 7.2.2013 von links:  
um:19:04,19:06,19:09 Raum 1.E.14

Diese schnelle Änderung der Oberflächentemperatur ist vermutlich mit anderen Systemen wie der Fußbodenheizung oder einer BKT nicht erreichbar. Die Änderungsgeschwindigkeit der operativen Raumtemperatur konnte mit den zur Verfügung stehenden Messmittel, dem Globmeter, nicht sicher erfolgen, da diese nur für stationäre Raumzustände anwendbar ist. Es gilt die Empfehlung die Kugeln 20 Minuten vor der Messung im Raum anzupassen. Die mittels Thermographieaufnahme festgestellte Temperatur der Kugel betrug fünf Minuten nach dem Erreichen der Betriebstemperatur an der Oberseite noch  $\theta_{S,Kugel} \approx 20 \text{ °C}$ .

### 11.6.2 Computerpool Kühlfall (1.E.05)

Im Computerpool konnte eine Messung über mehrere Tage durchgeführt werden. Der Raum wurde in der Zeit wenig genutzt.

Am 28.08 war das Fenster den gesamten Tag geöffnet. Ebenso am Freitagmorgen. Die Kühldecke war mit Ausnahme des Zeitraums der Fensteröffnung in Betrieb.

Aus dieser Messung kann auch ein Vergleich von Messwert Raumlufttemperatur des Thermostaten und dem in der Raummitte über drei Höhen erfassten Temperaturwerten gezogen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die durch die GLT-gemessene Temperatur in der Nacht, nicht im gleichen Maße absinkt wie die Lufttemperatur in der Mitte des Raumes. Es kann spekuliert werden, dass durch die Montage auf der Wand, die warme Wand das Ergebnis beeinflusst. Der vertikale Temperaturunterschied zwischen Kopf- und Knöchelhöhe beträgt im Maximum annähernd 2 Kelvin. Die für den vertikalen Temperaturunterschied geltende Grenze der Komfortklasse A wird damit knapp überschritten.

In der Nacht sinkt die Raumlufttemperatur stark ab. Ein vertikaler Unterschied der Temperatur ist in der Nacht nicht feststellbar. Der Messwert des Thermostaten repräsentiert die Raumlufttemperatur im Kopfbereich mit guter Übereinstimmung. Der Unterschied liegt über der im Rahmen des Messfehlers durch die Messwertaufzeichnung in der GLT, mit einer Aufzeichnung als COV mit Grenzwert 0,5 Kelvin zu erwartenden Abweichung.

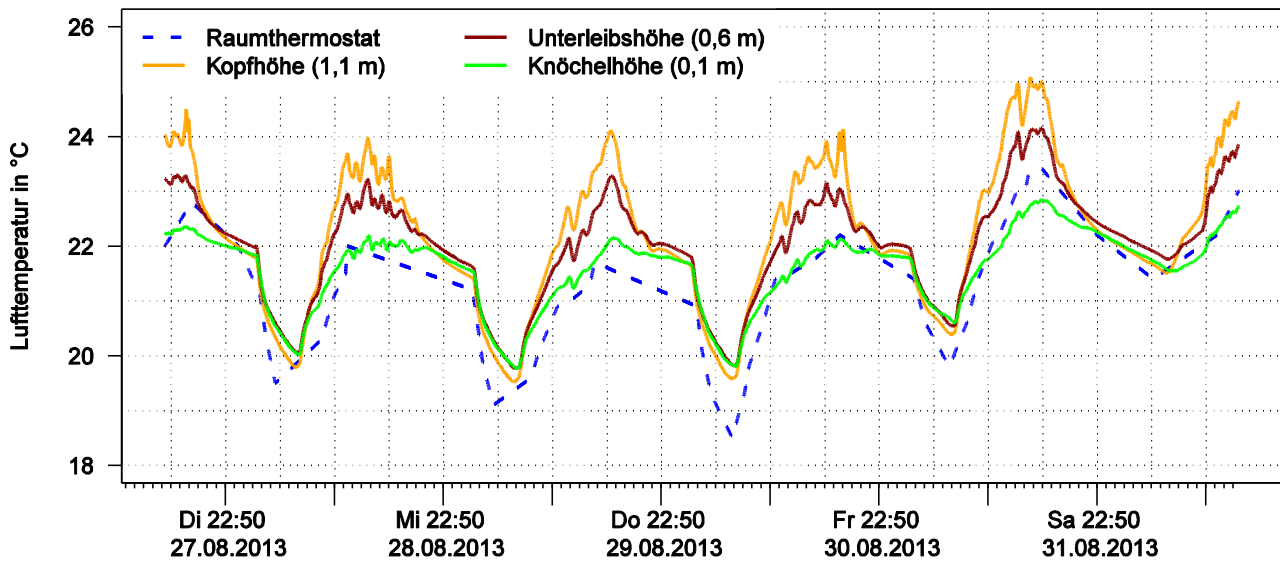


Abbildung 11-5: Lufttemperaturen gemessen am Behaglichkeitsmessstand und mittels Raumthermostaten im Kühlfall, Raum 1.E.05

Die gemessenen Lufttemperatur in der Mitte des Raumes zeigt, aus Sicht des Autors, eine genügend hohe Übereinstimmung um als Bewertungsmaßstab für den Komfort im Gebäude Anwendung zu finden.

Die nachfolgenden Abbildung 11-6 zeigt die gemessenen Globe- und Lufttemperaturen auf drei Ebenen.

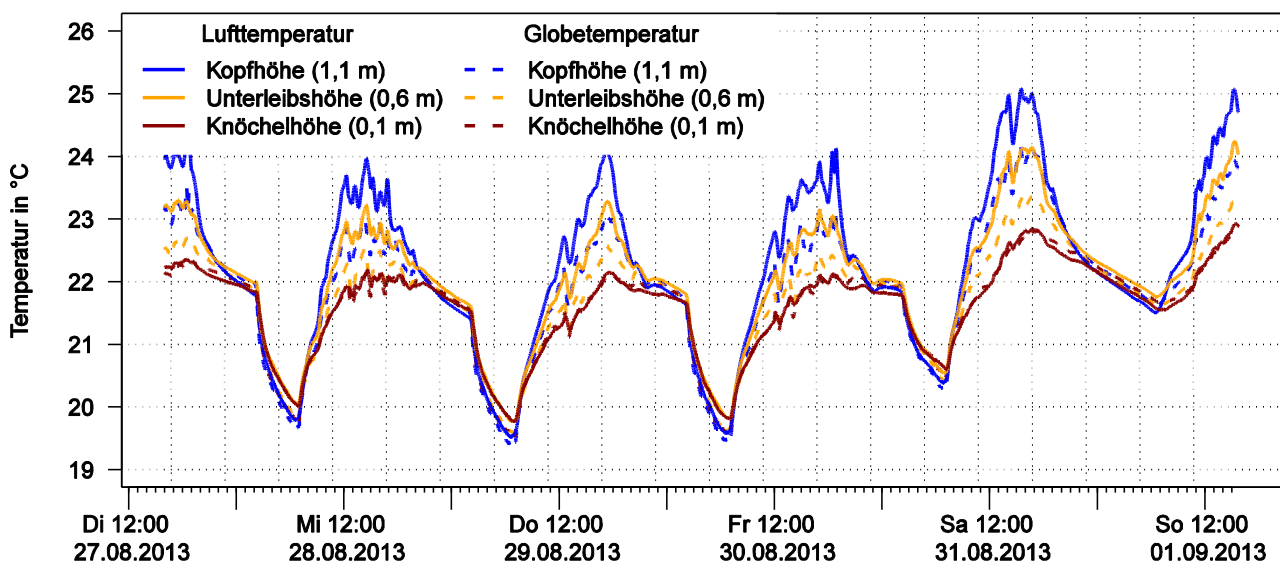


Abbildung 11-6: Verlauf der Luft- und Globetemperatur am Behaglichkeitsmessstand Raum 1.E.05

Im Tagesverlauf zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der Lufttemperatur und der Globetemperatur. Dies kann durch die kühle Decke erklärt werden. Auch an einem Sommertag werden teils sehr niedrige Temperaturen erreicht. Auffällig ist, dass die Raumtemperatur in der Nacht unter die Grenze der Behaglichkeit fällt.

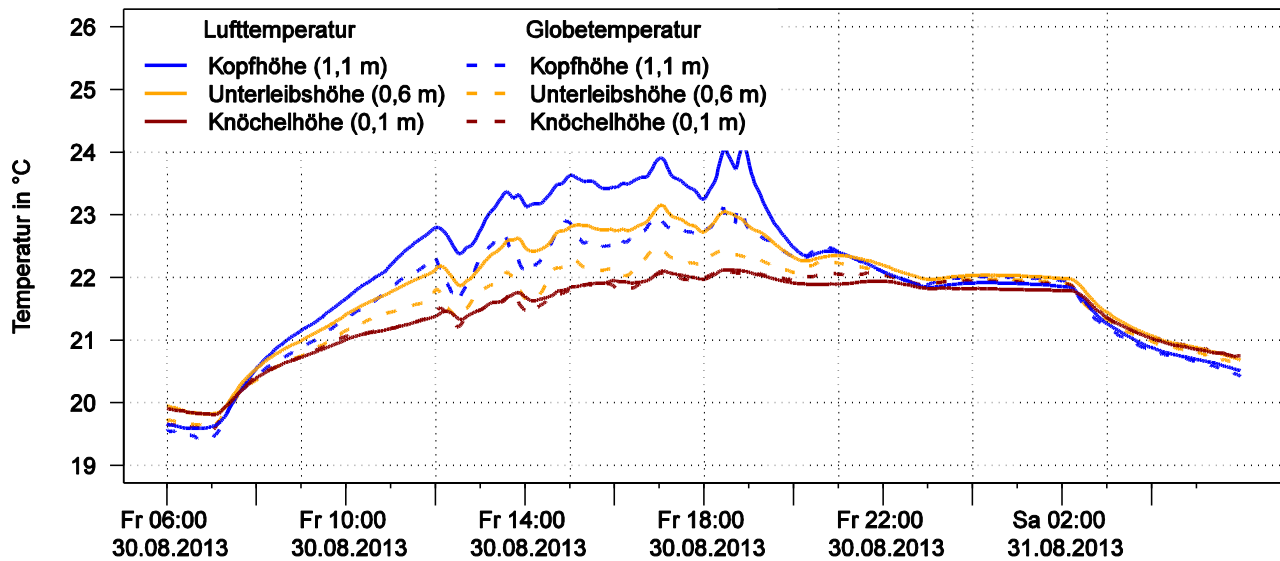


Abbildung 11-7: Verlauf der Luft- und Globetemperatur am Behaglichkeitsmessplatz für 24 Stunden im Raum 1.E.05

Wird die Globetemperatur der aktuellen Außentemperatur gegenübergestellt, zeigt sich in der gegebenen Komfortgrenzen nach DIN EN 15 251:2012-12 [102], dass im Kühlfall die untere Grenze teils unterschritten wird. Die erreichten operativen Temperaturen im Raum damit tendenziell niedrig sind. Die rot markierte Lufttemperatur liegt über der operativen Temperatur im vorgegeben Band.

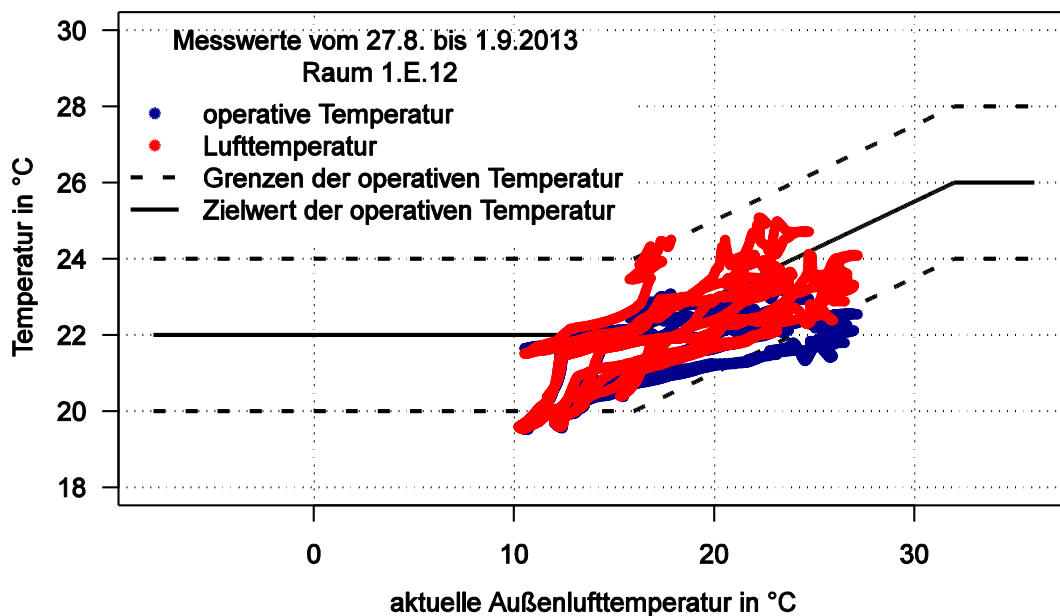


Abbildung 11-8: Mittlere Globe- und Lufttemperatur als Funktion der aktuellen Außenlufttemperatur

Aus der exemplarischen Messung im Sommer kann gefolgert werden, dass die Raumtemperaturen im Sommer niedrig sind. Die Lufttemperatur als Regelgröße genau im Band liegt, die operative Temperatur jedoch darunter. Gegebenenfalls kann der Sollwert der Lufttemperatur um ca. 1 Kelvin angehoben werden. Hiermit sind evtl.



### 11.6.3 Büro Kühlfall (1.E.12)

Für ein nach Osten orientiertes Büro im Verbinderbauwerk konnte für mehrere Tage der Behaglichkeitsmessstand betrieben werden. Die Luftgeschwindigkeit wurde auf 0,05 m/s festgelegt. Der Messplatz wurde an der Stelle des Bürostuhls aufgebaut. Der innere Blendschutz wurde geschlossen. Der außenliegende Sonnenschutz war während der Messung geöffnet. Der Raum wurde während der Messung nicht genutzt. Durch die direkte Einstrahlung am Vormittag heit....

Die Solltemperatur betrug 22 °C. Deutlich wird, dass die am Thermostat gemessene Temperatur teilweise deutlich über den am Behaglichkeitsmessstand gemessenen Temperaturen liegt.

Während des Tages kann bei Lasteintrag durch Sonneneinstrahlung eine vertikaler Temperaturunterschied von Knöchel- zu Kopfhöhe von bis zu 1,5 Kelvin. Die Anforderung der Klasse A nach [99] mit weniger als 2 Kelvin Differenz wird damit eingehalten.

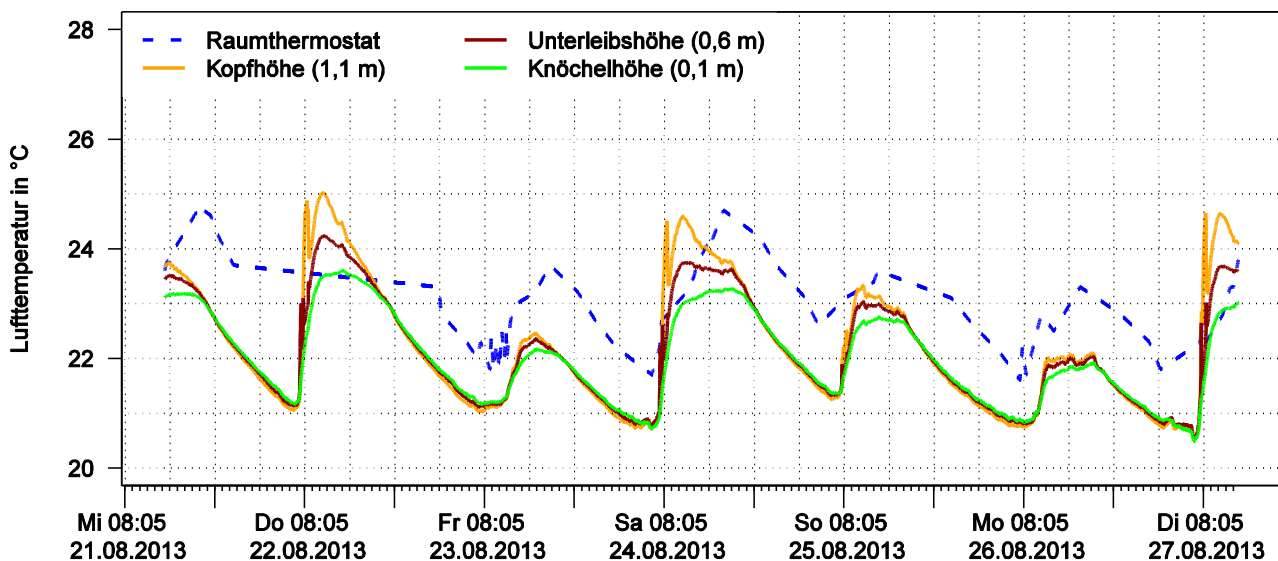


Abbildung 11-9: Raum 1.E.12

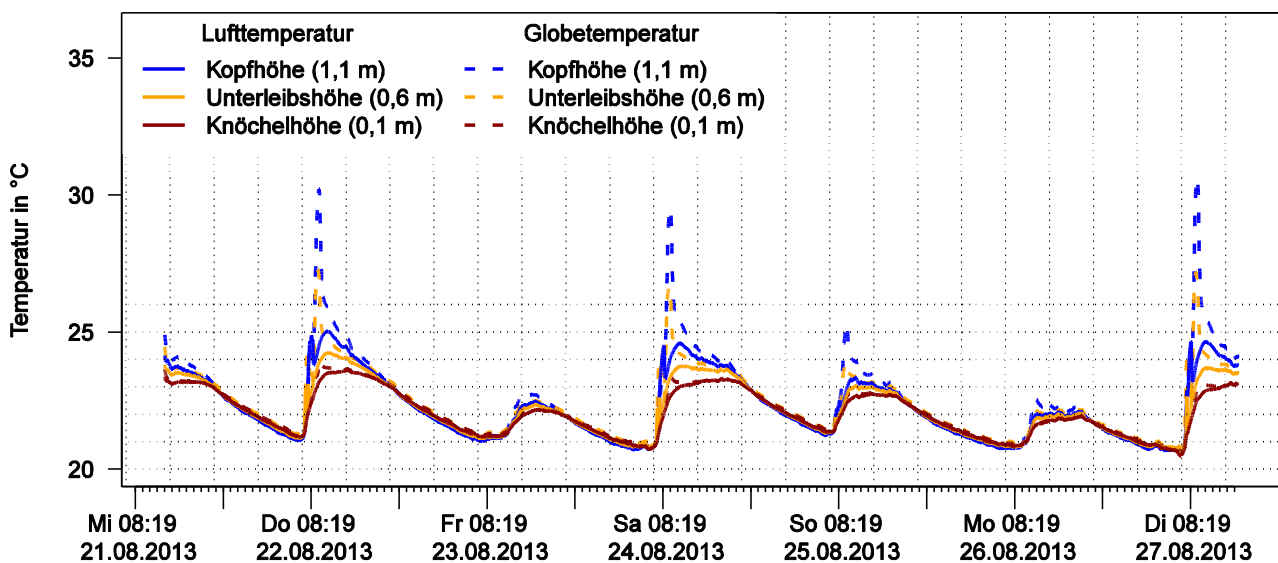


Abbildung 11-10: Raum 1.E.12

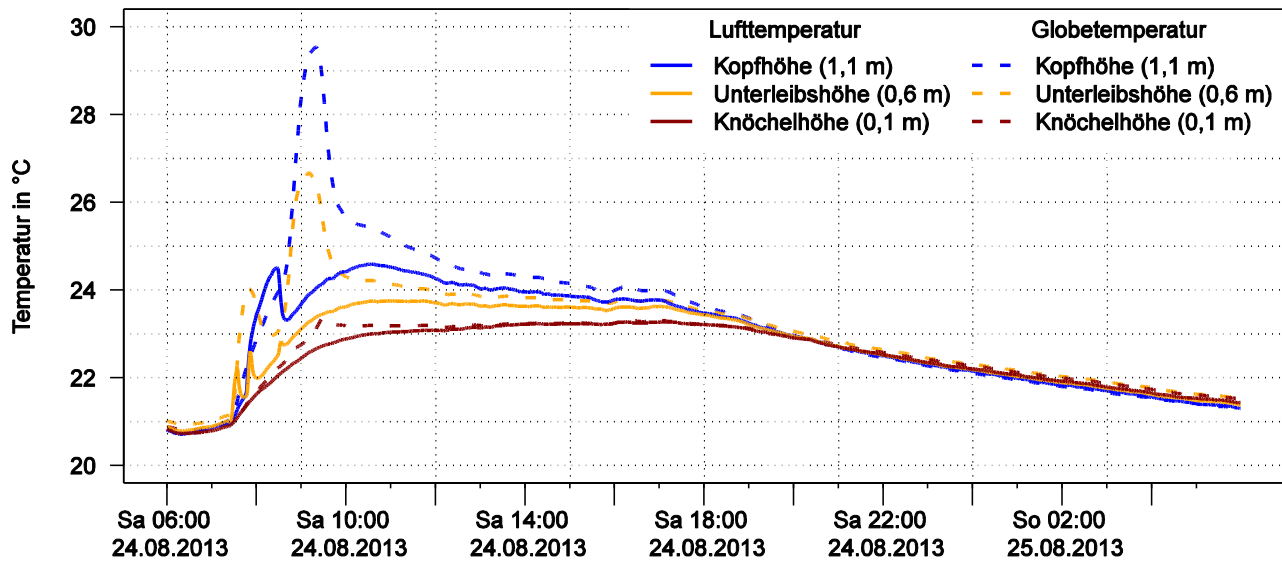


Abbildung 11-11: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen im Raum 1.E.12

In der Abbildung 11-11 ist der starke Anstieg der Globetemperatur durch die Sonneneinstrahlung dargestellt.

## 11.7 Auswertung Raumlufthtemperaturen im Gebäude

Im vorrangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, dass die mittels Thermostat erfasste Lufttemperatur gut mit Lufttemperatur in der Raummitte auf Kopfhöhe übereinstimmt. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass im Kühlfall die Lufttemperatur bei aktivierter Kühldecke deutlich über der maßgebenden Globetemperatur liegt.

Eine Ableitung der operativen Temperatur aus der Lufttemperatur erscheint nicht möglich. Dennoch ist der Autor der Auffassung, dass die aufgezeichneten Lufttemperaturen eine Bewertung der thermischen Behaglichkeit erlauben.

Die Bewertung der Raumtemperatur für die thermische Behaglichkeit kann auf Basis der mittleren Lufttemperaturen in den Räumen erfolgen. Die Messwerte sind von Zeiten der Bereitschaft und des Grundbetriebes zu trennen. Es ist zwischen Winter, Sommer und Neutralfall zu unterscheiden.

## 12 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2-1:	VEREINFACHTE SCHEMATISCHE DARSTELLUNG ENERGIEFLUSS DER WÄRMEVERSORGUNG .....	12
ABBILDUNG 2-2:	MONATSSUMMEN DES TRINKWASSERVERBRAUCHS .....	18
ABBILDUNG 2-3:	CARPETPLOT STUNDENWERTE DES TRINKWASSERVERBRAUCHS 2013 .....	18
ABBILDUNG 3-1:	LINKS: BLICK AUF DEN VERBINDER FERTIGGESTELLTER ROHBAU (APRIL 2012);RECHTS: BLICK AUF DEN ROHBAU MIT BEGINN FASSADENARBEITEN (APRIL 2012) .....	23
ABBILDUNG 4-1:	ANSICHT NORD [13] .....	25
ABBILDUNG 4-2:	OSTANSICHT [13] LINKS ALTBAU, IN DER MITTE VERBINDERBAUWERK, RECHTES NEUBAU .....	26
ABBILDUNG 4-3:	SÜDANSICHT [13].....	26
ABBILDUNG 4-4:	WESTANSICHT [13] .....	26
ABBILDUNG 4-5:	BLICK AUF DIE SÜDSEITE [14].....	26
ABBILDUNG 4-6:	LINKS: BLICK VON NORD-OST, RECHTS: BLICK AUF DAS VERBINDUNGSBAUWERK OSTSEITE.....	27
ABBILDUNG 4-7:	LINKS: BLICK VERBINDER WESTSEITE, RECHTS: BLICK AUF NORDSEITE .....	27
ABBILDUNG 4-8:	GRUNDRISSSE DER GESCHOSSE MIT RAUMNUTZUNG [15].....	28
ABBILDUNG 4-9:	LINKS: FERTIGTEILE WERDEN PER KRAN AN DEN VORBESTIMMTEN MONTAGEORT GEHOBBEN. ....	32
ABBILDUNG 4-10:	LINKS: VHF IM BAU BETONWAND SICHTBAR (AUFNAHME 6.3.2012), .....	33
ABBILDUNG 4-11:	LINKS: ANSCHLUSSDETAIL ÜBERGANG VHF ZU PERIMETERDÄMMUNG .....	33
ABBILDUNG 4-12:	THERMOGRAPHIEAUFNAHME DER FASSADE IM BAU MIT UND OHNE WÄRMEDÄMMUNG .....	34
ABBILDUNG 4-13:	THERMOGRAPHIEAUFNAHME DER FASSADE DURCHDRINGUNG DER DÄMMPLATTEN DER VHF MIT KONSOLEN, RECHTS: FOTO 34	
ABBILDUNG 4-14:	THERMOGRAPHIEAUFNAHME DER VHF MIT UND OHNE VORGEHÄNGTER PLATTE MIT TEMPERATURERHÖHUNG AUF DER TRAGSCHIENE DURCH STÖRSTELLE AN DER TRAGKONSOLE.....	34
ABBILDUNG 4-15:	BEMESSUNGSDIAGRAMM FÜR PUNKTUELLEN WÄRMEBRÜCKENVERLUSTKOEFFIZIENT [STO] .....	35
ABBILDUNG 4-16:	LINKS: URSPRÜNGLICHE INSTALLATION OHNE THERMISCHE TRENNUNG .....	36
ABBILDUNG 4-17:	SCHNITT HOLZ-GLAS-FASSADE MIT RAFFSTORES [21] .....	37
ABBILDUNG 4-18:	LINKS: SEITLICHE ANSICHT AUFNAHME FÜR RAFFSTORE IN BAU OHNE WÄRMEDÄMMUNG. RECHTS: DRAUFSICHT AUF AUFNAHME FÜR RAFFSTORE IN BAU MIT WÄRMEDÄMMUNG.....	37
ABBILDUNG 4-19:	LINKS: BLICK AUF DÄMMARBEITEN UNTER DER BODENPLATTE, RECHTS: DETAIL ERSTE LAGE DER VERLEGTE PERIMETERDÄMMUNG. ....	38
ABBILDUNG 4-20:	THERMOGRAPHIEAUFNAHME UND FOTO VON MANGELHAFTEN SCHWACHSTELLEN IM ANSCHLUSSBEREICH VON PERIMETERDÄMMUNG ZU VHF. ....	38
ABBILDUNG 4-21:	THERMOGRAPHIEAUFNAHME UND FOTO VON MANGELHAFTEN SCHWACHSTELLEN IM ANSCHLUSSBEREICH VON PERIMETERDÄMMUNG ZU VHF. ....	38
ABBILDUNG 4-22:	SCHWACHSTELLEN IM ANSCHLUSSBEREICH VON PERIMETERDÄMMUNG ZU VHF DURCH VERLEGEFEEHLER.....	39
ABBILDUNG 4-23:	LINKS: HOLZFASSADE NACH DEM EINBAU (AUßEN PLANUNGSLABOR EG UND OG).....	40
ABBILDUNG 4-24:	LINKS: HOLZFASSADE NACH DEM EINBAU (INNEN, KLEINER HÖRSAAL) RECHTS: HOLZFASSADE IM FERTIGEN ZUSTAND (INNEN, COMPUTERPOOL).....	40
ABBILDUNG 4-25:	LINKS: NAHAUFNAHME DES RAHMENVERBUNDES DER DREI-SCHEIBEN-VERGLASUNG MIT KONVENTIONELLEN RAHMEN (INNEN, KLEINER HÖRSAAL) RECHTS: HOLZFASSE IN BAU MIT ANSCHLUSS AN STAHLBETONWAND (MÄRZ 2011) .....	41
ABBILDUNG 4-26:	LINKS: EINBAU DER VERGLASUNG IM VERBINDER MITTELS KRAN (16.08.2011) .....	41
ABBILDUNG 4-27:	BLICK AUF EINGEBAUTEN VENTILATOR FÜR BLOWER-DOOR-TEST (AUFNAHME DATUM 5.7.2012).....	42
ABBILDUNG 4-28:	ABGEKLEBTE ABWASSERLEITUNG BEI FEHLENDE GERUCHSVERSCHLUSS ZUR VORBEREITUNG DER HAUSTECHNIK, FÜR BLOWER-DOOR-TEST (AUFNAHME DATUM 5.7.2012) .....	43
ABBILDUNG 4-29:	LECKAGEORTUNG MITTELS THERMOANEMOMETER AM TÜRLATT (AUFNAHME DATUM 5.7.2012).....	43

## 12 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 4-30:	MESSPROTOKOLL DER BLOWER-DOOR-MESSUNG AUS [27] .....	44
ABBILDUNG 4-31:	AUSSCHNITT AUS SCHNITT-DETAIL ANSCHLUSS HOLZ-FENSTER AN FASSADE [21] ARC-5-D-2612-1.....	47
ABBILDUNG 4-32:	VEREINFACHTE DARSTELLUNG DES SOCKELBEREICHS MIT STREIFENFUNDAMENT AUS DER WÄRMEBRÜCKENBERECHNUNG [33] .....	48
ABBILDUNG 4-33:	AUSSCHNITT AUS SCHNITT-DETAIL FASSADE VERBINDER AN GRUND [36] .....	49
ABBILDUNG 4-34:	VEREINFACHTE DARSTELLUNG DES SOCKELBEREICHS VERBINDERBAUWERKS MIT STREIFENFUNDAMENT AUS DER WÄRMEBRÜCKENBERECHNUNG [33].....	49
ABBILDUNG 4-35:	BLICK AUF DEN DURCHGANG LINKS: AUS OST, RECHTS: AUS WEST .....	51
ABBILDUNG 4-36:	FOTO EINES MUSTERS DER VIP-DÄMMUNG .....	51
ABBILDUNG 4-37:	BLICK AUF ANKER FÜR HALTEKONSTRUKTION DER VIP (AUFNAHME DATUM 03.05.2012).....	52
ABBILDUNG 4-38:	BLICK AUF VERSCHLOSSENE ABDECKUNG DER VIP (AUFNAHME DATUM: 29.05.2012) .....	52
ABBILDUNG 4-39:	FOTO EINES SCHNITTMUSTERS DER VERBAUTEN PLATTEN .....	54
ABBILDUNG 4-40:	LINKS: PATENTIERTER STECKVERBINDER MIT FLEXIBLEN SCHLAUCH; RECHTS: BLICK AUF DIE UNTERVERTEILUNG IN AKTIVIERTER HÖRSAALWAND VOR MONTAGE DER PLATTEN .....	54
ABBILDUNG 4-41:	UNTERKONSTRUKTION UND VERTEILUNG VOR MONTAGE DER KÜHLDECKEN .....	55
ABBILDUNG 4-42:	LINKS: SEITLICHER SCHNITT DER DECKENKONSTRUKTION, RECHTS: RÜCKSEITE EINE VORGEFERTIGTEN PLATTE.....	55
ABBILDUNG 4-43:	AKTIVIERTE WAND IM FERTIGEN ZUSTAND MIT AKUSTIKELEMENTEN IM OBEREN BEREICH .....	55
ABBILDUNG 5-1:	LAGEPLAN MIT MARKIERTEN REGENWASSERZISTERNEN AUSSCHNITT AUS [40].....	60
ABBILDUNG 5-2:	LINKS: OBERIRDISCHER ZUGANG ZU BEIDEN ZISTERNE, RECHTS: BLICK AUF DEN ZUGANG VON INNEN .....	60
ABBILDUNG 5-3:	SKIZZE GRUNDRISS DER REGENWASSERZISTERNE .....	61
ABBILDUNG 5-4:	PRINZIPISSKIZZE DER GEPLANTEN HYDRAULIK ZUR THERMISCHEN NUTZUNG DES REGENWASSERS .....	61
ABBILDUNG 5-5:	PRINZIPISSKIZZE DER GEBAUTEN HYDRAULIK ZUR THERMISCHEN NUTZUNG DES REGENWASSERS .....	62
ABBILDUNG 5-6:	LINKS: ROHREINFÜHRUNG AN DER DECKE DER ZISTERNE, LINKS: FREIER EIN- UND AUSLAUF FÜR REGENWASSER.....	62
ABBILDUNG 5-7:	LAGEÜBERSICHT ZUR BRUNNEN AUF DEM GELÄNDE DER FH ERFURT AUSSCHNITT AUS [40].....	63
ABBILDUNG 5-8:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES BRUNNENAUFBAU NACH [48] .....	65
ABBILDUNG 5-9:	LINKS: MOBILES BOHRGERÄT FÜR SAUGBRUNNEN; RECHTS: DETAIL DES BOHRERS.....	65
ABBILDUNG 5-10:	LINKS: BOHRGERÄT FÜR SAUGBRUNNEN NR.2; RECHTS: DETAIL DES BOHRER .....	66
ABBILDUNG 5-11:	LINKS: BRUNNENSTUBE MIT ROHRLEITUNG FÜR GRUNDWASSER UND KABEL ZUR ENERGIEVERSORGUNG PUMPE. RECHTS: BLICK IN DIE BRUNNENSTUBE MIT ROHLEITUNG UND Absperrventil .....	66
ABBILDUNG 5-12:	VEREINFACHTES SCHEMA RLT-ANLAGE „LABORE“ .....	69
ABBILDUNG 5-13:	SCHEMA RLT-ANLAGE „GROßER HÖRSAAL“ .....	69
ABBILDUNG 5-14:	SCHEMA RLT-ANLAGE „KLEINER HÖRSAAL“ .....	69
ABBILDUNG 5-15:	LINKS: ABLUFTDURCHLASS VOR INSTALLATION ABHANGDECKE, RECHTS ZULUFTDURCHLASS IM DRUCKBODEN .....	71
ABBILDUNG 5-16:	LINKS: TREPPEN DES „GROßEN HÖRSAALS“ MIT AUSSPARUNG FÜR ZULUFT (IN BAU) RECHTS: FESTE BESTUHLUNG OHNE VERBLENDUNG UND LEITDÜSEN.....	71
ABBILDUNG 5-17:	DRUCKBODEN VON UNTEN MIT AUSSPARUNG FÜR DIE ZULUFT .....	71
ABBILDUNG 5-18:	ISOMETRIE ANSICHT RAUM „KLEINER HÖRSAAL“ AUS [45] .....	72
ABBILDUNG 5-19:	LINKS: ANSICHT ABLUFTDURCHLASS „KLEINER HÖRSAAL“; RECHTS: BLICK AUF QUELLLUFTAUSLASS IM RAUM „KLEINER HÖRSAAL“ IM BAU .....	72
ABBILDUNG 5-20:	LINKS: ANSICHT ZULUFTAUSLASS IM BAU, RECHTS ANSCHLUSSKÄSTEN FÜR ZULUFTAUSLÄSSE VON UNTEN .....	73
ABBILDUNG 5-21:	LINKS: ANSICHT ZULUFTAUSLASS ROT MARKIERT UND SCHATTENFUGE ALS ABLUFTDURCHLASS GRÜN MARKIERT RECHTS: ZULUFTAUSLASS IM BAU .....	73
ABBILDUNG 5-22:	ISOMETRIE ANSICHT COMPUTER POOL AUS [45].....	74
ABBILDUNG 5-23:	REGELSCHEMA DER LUFTQUALITÄTSREGELUNG MITTELS ERHÖHUNG DES AUßENLUFTVOLUMENSTROMES ÜBER DREHZAHLERHÖHUNG VENTILATOR.....	76
ABBILDUNG 5-24:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KENNLINIEN ZUR RAUMLUFTTEMPERATURREGELUNG FÜR DEN HEIZFALL .....	76
ABBILDUNG 5-25:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KENNLINIEN ZUR RAUMLUFTTEMPERATURREGELUNG FÜR DEN KÜHLFALL .....	76

ABBILDUNG 5-26:	DARSTELLUNG DER GRAPHISCHEN PROGRAMMIER- UND VERKNÜPFUNGSEBENE EXCEL CARE .....	77
ABBILDUNG 5-27:	INFORMATION ZUR FUNKTIONSWEISE FENSTERKONTAKT UND RLT-ANLAGE .....	78
ABBILDUNG 6-1:	SCREEN-SHOT AUS DER VISUALISIERUNG DES GEBÄUDEMANAGMENT .....	83
ABBILDUNG 6-2:	STRUKTUR DER DATENINTEGRATION UND FUNKTIONEN ZUR ÜBERWACHUNG UND ANALYSE DES GEBÄUEBETRIEBS.....	86
ABBILDUNG 6-3 :	SCREENSHOT DER DATENSTRUKTUR EINER MS-ACCESS ROHDATENBANK .....	88
ABBILDUNG 6-4:	SCREENSHOT ROHDATEN MIT FEHLERHAFTEN WERT ZEITSTEMPEL.....	89
ABBILDUNG 6-5:	BATCH-DATEI.....	91
ABBILDUNG 6-6:	VERLAUF DER KUMULIERTEN ZÄHLERWERTE EINER PUMPEN VOR UND NACH MESSWERTKORREKTUR IM VERGLEICH ZU ELEKTROENERGIEZÄHLER .....	94
ABBILDUNG 6-7:	SCREENSHOT DER ROH-DATEN IN MS-ACCESS MIT NICHT PLAUSIBLEN ZÄHLERVERLAUF .....	95
ABBILDUNG 6-8:	EXEMPLARISCHER VERLAUF NICHT ÄQUIDISTANTE ROHMESSDATEN UND ÄQUIDISTANTE DATENREIHE FÜR BESTIMMUNG DES MITTELWERTES .....	98
ABBILDUNG 6-9	VERLAUF DER MESSDATEN DER SOLARSTRAHLUNG, OBEN ROHDATEN, MITTE STUNDENMITTEL DER AUFBEREITETEN DATEN, UNTER VERGLEICHSMESSUNG AUS KMF .....	99
ABBILDUNG 6-10:	STUNDEN-WERTE.....	101
ABBILDUNG 6-11:	MINUTEN-WERTE .....	101
ABBILDUNG 6-12:	AGGREGIERTE MINUTEN-WERTE .....	102
ABBILDUNG 6-13:	AGGREGIERTE STUNDENMITTELWERTE.....	102
ABBILDUNG 7-1:	3D DARSTELLUNG DES GEBÄUDES BLICKRICHTUNG NORD-WEST MIT POSITION WETTERSTATION AUF DEM DACH [60] .....	106
ABBILDUNG 7-2:	WETTERSTATION MIT BESCHRIFTUNG DER MESSGERÄTE .....	107
ABBILDUNG 7-3:	GEÖFFNETER SCHALTSCHRANK DER WETTERSTATION AUF DEM DACH .....	108
ABBILDUNG 7-4:	SCHATTENRING PYRANOMETER . .....	109
ABBILDUNG 7-5:	WETTERSTATION TEILWEISE IM SCHATTEN, AUFNAHME VON 13.12.2013 CA. 11:00 UHR .....	111
ABBILDUNG 7-6:	RECHTS: SCHNEEBEDECKTES SCHATTENRINGPYRANOMETER LINKS: ZUGANG ÜBER TERRASSE ZUR WETTERSTATION AUF DEM DACH .....	112
ABBILDUNG 7-7:	BLICK AUF DIE HYDRAULISCHE VERTEILUNG IN EINER ZWISCHENWAND MIT WMZ .....	113
ABBILDUNG 7-8:	EINGebaute ELEKTROENERGIEZÄHLER IN EINEM SCHALTSCHRANK DER UNTERVERTEILUNG MSR.....	114
ABBILDUNG 7-9:	REFERENZMESSUNG MITTELS MOBILEN MESSGERÄT .....	115
ABBILDUNG 9-1:	VISUALISIERUNG DES GEBÄUDEMODELLES IN TAS AUS [66].....	118
ABBILDUNG 9-2:	ENERGYPLUS MODELL *-IDF VISUALISIERUNG MIT OPENSTUDIO [71] FÜR SKETCHUP [72]. .....	119
ABBILDUNG 9-3:	HISTOGRAMM DES ENERGIEBEDARFS BEI UNSICHEREN EINGANGSPARAMETER IN DAS GEBÄUDEMODELL [75]. .....	120
ABBILDUNG 9-4:	EG TAGESLICHTQUOTIENT UND BELEUCHTUNGSSTÄRKE BEI BEDECKTEM HIMMEL (HIER OHNE „GROßER HÖRSAAL“)...	123
ABBILDUNG 9-5:	OG TAGESLICHTQUOTIENT UND BELEUCHTUNGSSTÄRKE IM RAUM BEI BEDECKTEM HIMMEL .....	124
ABBILDUNG 9-6:	GROßER HÖRSAAL TAGESLICHTQUOTIENT UND BELEUCHTUNGSSTÄRKE IM RAUM BEI BEDECKTEM HIMMEL .....	124
ABBILDUNG 9-7:	EXEMPLARISCHE ERGEBNISSE „ALTER DER LUFT (AGE OF AIR)“ AUS CFD-SIMULATION FÜR DEN HEIZFALL AUS [45]...	126
ABBILDUNG 9-8:	EXEMPLARISCHE ERGEBNISSE ZUR LUFTGESCHWINDIGKEIT AUS CFD-SIMULATION FÜR DEN HEIZFALL AUS [45] .....	127
ABBILDUNG 9-9:	EXEMPLARISCHE ERGEBNISSE PMV DER CFD-SIMULATION FÜR HEIZFALL AUS [45] .....	127
ABBILDUNG 10-1:	VERLAUF DER AUßENLUFTTEMPERATUR ZU EINER LÄNGEREN SOMMERPERIODE IM JAHR 2013 .....	130
ABBILDUNG 10-2:	ZEITLICHER VERLAUF DER BERECHNETEN EXTRATERRESTRISCHEN STRAHLUNG UND DER GEMESSENEN GLOBALEN SOLARSTRAHLUNG AUF EINE HORIZONTALE FLÄCHE.....	132
ABBILDUNG 10-3:	STUNDENMITTEL DER DIFFUSEN EINSTRÄHLUNG IN W/M <sup>2</sup> , VERGLEICH ZWISCHEN MODELL UND MESSWERT HGL .....	133
ABBILDUNG 10-4:	EXEMPLARISCHER VERLAUF DER SOLARSTRAHLUNG AN EINEM SOMMERTAG AUF EINE HORIZONTALE FLÄCHE MIT GEMESSENER DIFFUSER UND GLOBALER EINSTRÄHLUNG.....	134
ABBILDUNG 10-5:	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN BELEUCHTUNGSSTÄRKE AUßEN UND GLOBALER SOLARSTRAHLUNG FÜR MESSDATEN (OBEN LINKS TEILS NICHT KORREKT) UND DATEN AUS VERSCHIEDENEN TRY. ....	135

## 12 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 10-6: VERLAUF DER NICHT KORRIGIERTEN MESSDATEN DER BELEUCHTUNGSSTÄRKE UND AUFBEREITETE MODELLWERTE SOWIE GLOBALE SOLARSTRAHLUNG (RECHTE ACHSE).....	136
ABBILDUNG 10-7: ABSTAND ZWISCHEN DWD-STATION UND HLG BETRÄGT CA. 10 KM LUFTLINIE.....	137
ABBILDUNG 10-8: VERGLEICH DER TAGESSUMMEN DER HORIZONTALEN GLOBALEN SOLARSTRAHLUNG ZWISCHEN WETTERSTATION AUF DEM DACH DES HLG UND DEM KLIMAMESSFELD (KMF) IN UNMITTELBARER NÄHE ZUM GEBÄUDE. ....	139
ABBILDUNG 10-9: DIFFERENZEN [RESIDUEN] DER TAGESUMME DER HORIZONTALEN GLOBALEN SOLARSTRAHLUNG ZWISCHEN WETTERSTATION AUF DEM DACH DES HLG UND DEM KLIMAMESSFELD (KMF) IN UNMITTELBARER NÄHE ZUM GEBÄUDE. ....	140
ABBILDUNG 10-10: VERTEILUNG DES ENDENERGIEVERBRAUCHS PRO TAG VON 2013 BIS 2015 .....	148
ABBILDUNG 10-11: ENDENERGIEVERBRAUCH HEIZEN PRO TAG ALS FUNKTION DER MITTLEREN TAGES-AUßENTEMPERATUR, NUR FÜR BETRIESMODUS HEIZEN .....	149
ABBILDUNG 10-12: TAGESNUTZWÄRMEVERBRAUCH ERFASST AN HEIZKREISEN DER STATISCHEN HEIZFLÄCHEN ALS FUNKTION DER MITTLEREN TAGESAUßENTEMPERATUR VON 2013 BIS 2015. ....	150
ABBILDUNG 10-13: SPEZIFISCHER TAGESNUTZWÄRMEVERBRAUCH ERFASST AN HEIZKREISEN DER STATISCHEN HEIZFLÄCHEN ALS FUNKTION DER MITTLEREN TAGESAUßENTEMPERATUR VON 2013 BIS 2015. AUSWERTUNG NUR FÜR BETRIEBSMODUS „HEIZEN“, NUR FÜR ZÄHLER AKTIV, ROTE LINE: LINEAR MODEL OHNE WERTPAARE MIT VERBRAUCH $Q_{H,B,DAY} = 0$ , SCHWARZE LINIE: LINEAR MODEL ALLE WERTPAARE.....	151
ABBILDUNG 10-14: NUTZWÄRMEVERBRAUCH 2013 UND 2014 MIT UND OHNE WETTERBEREINIGUNG (*ERST AB MAI 2013 ALLE ZÄHLER FUNKTIONSFÄHIG) .....	153
ABBILDUNG 10-15: MONATLICHER HILFSENERGIEVERBRAUCH WÄHREND BETRIEBSMODUS HEIZEN IM JAHR 2013 .....	156
ABBILDUNG 10-16: MONATLICHER HILFSENERGIEVERBRAUCH WÄHREND BETRIEBSMODUS HEIZEN IM JAHR 2014 .....	157
ABBILDUNG 10-17: MONATLICHER HILFSENERGIEVERBRAUCH WÄHREND BETRIEBSMODUS HEIZEN IM JAHR 2015 .....	157
ABBILDUNG 10-18: MONATLICHER HILFSENERGIEVERBRAUCH WÄHREND BETRIEBSMODUS HEIZEN FÜR DIE JAHRE 2013, 2014 UND 2015 .....	158
ABBILDUNG 10-19: MONATLICHER HILFSENERGIEVERBRAUCH FÜR KÜHLEN IM JAHR 2013 .....	159
ABBILDUNG 10-20: MONATLICHER HILFSENERGIEVERBRAUCH FÜR KÜHLEN IM JAHR 2014 .....	159
ABBILDUNG 10-21: ZEITLICHER VERLAUF DER ERWÄRMUNG EINER HEIZDECKE AM 7.2.2013 VON LINKS: UM:19:04,19:06,19:09 RAUM 1.E.14 .....	160
ABBILDUNG 10-22: HYDRAULISCHE EINBINDUNG DES SPEICHERS VEREINFACHTES SCHEMA .....	161
ABBILDUNG 10-23: SPEICHER KURZ NACH DER ANLIEFERUNG.....	161
ABBILDUNG 10-24: TYPISCHER ZYKLISCHER TEMPERATURVERLAUF IM SPEICHER .....	162
ABBILDUNG 10-25: LINKS: SPEICHER IM HEIZUNGSRAUM DIREKT NEBEN DER FERNWÄRMEÜBERGABE, RECHTS WÄRMESTROMMESSPLATTE AUF SPEICHER .....	163
ABBILDUNG 10-26: ZEITLICHER VERLAUF DER THERMISCHEN LEISTUNG DER DEFEKTEN ADSORPTIONSWÄRMEPUMPE IM FRÜHJAHR 2013. ....	165
ABBILDUNG 10-27: KENNLINIENFELD DER ADSORPTIONSWÄRMEPUMPE SORTECH TYP: ACS 15, FÜR VORLAUFTEMPERATUR $\theta_{MT} \approx 33..35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ AUS [92] .....	166
ABBILDUNG 10-28: TÄGLICHE ARBEITSAHL IM ZEITLICHEN VERLAUF .....	168
ABBILDUNG 10-29: TÄGLICHE ARBEITSAHL ALS FUNKTION DER TÄGLICHEN NUTZWÄRME ADSORPTIONSWÄRMEPUMPE .....	168
ABBILDUNG 10-30: ABSOLUTER ELEKTROENERGIEVERBRAUCH DER RLT-ANLAGEN FÜR DIE JAHRE 2013 UND 2014.....	171
ABBILDUNG 10-31: SPEZIFISCHER ELEKTROENERGIEVERBRAUCH DER RLT-ANLAGEN (BEZOGEN AUF DIE FLÄCHE DER VERSORGTE RÄUME) FÜR DIE JAHRE 2013 UND 2014 .....	172
ABBILDUNG 10-32: SPEZIFISCHER ELEKTROENERGIEVERBRAUCH DER RLT-ANLAGEN (BEZOGEN AUF DIE FLÄCHE DER VERSORGTE RÄUME) IM JAHR 2013, 2014, 2015.....	173
ABBILDUNG 10-33: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG RLT-ANLAGE KLEINER HÖRSAAL FÜR 2013.....	174
ABBILDUNG 10-34: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG RLT-ANLAGE KLEINER HÖRSAAL FÜR 2014 .....	174
ABBILDUNG 10-35: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG RLT-ANLAGE KLEINER HÖRSAAL FÜR 2015 .....	175
ABBILDUNG 10-36: CARPET-PLOT DES STEUERSIGNALS VENTILATOR KLEINER HÖRSAAL FÜR 2015 .....	175

ABBILDUNG 10-37: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE RLT-ANLAGE „LABORE“ FÜR 2013 .....	176
ABBILDUNG 10-38: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE RLT-ANLAGE „LABORE“ FÜR 2014 .....	176
ABBILDUNG 10-39: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE RLT-ANLAGE „LABORE“ FÜR 2015 .....	177
ABBILDUNG 10-40: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE RLT-ANLAGE „GROßER HÖRSAAL“ FÜR 2013 .....	177
ABBILDUNG 10-41: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE RLT-ANLAGE „GROßER HÖRSAAL“ FÜR 2014 .....	178
ABBILDUNG 10-42: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE RLT-ANLAGE „GROßER HÖRSAAL“ FÜR 2015 .....	178
ABBILDUNG 10-43: CARPET-PLOT DES STEUERSIGNALS VENTILATOR RLT-ANLAGE „GROßER HÖRSAAL“ FÜR 2013 .....	179
ABBILDUNG 10-44: SCHEMA DER ZENTRALEN RLT-GERÄTE MIT POSITION DER TEMPERATURMESSSTELLEN.....	179
ABBILDUNG 10-45: LINKS: BLICK AUF DIE WRG-EINHEIT RLT-LABOR; MITTE: BLICK AUF DEN ROTOR; RECHTS LUFTTEMPERATURSENSOR NACH WRG IM RLT-GERÄT .....	180
ABBILDUNG 10-46: VERTEILUNGSFUNKTIONEN DER BERECHNETEN TEMPERATURÄNDERUNGSGRAD FÜR RLT_ ANLAGEN BEI STEUERSIGNAL WRG-ROTOR > 0 % UND FÜR $H_t > 0$ (HEIZFALL). .....	182
ABBILDUNG 10-47: FREIGABESIGNAL NACHTAUSKÜHLUNG FÜR RLT-ANLAGE GROßER HÖRSAAL FÜR 2013.....	183
ABBILDUNG 10-48: PRÄSENZMELDER FÜR RAUM GROßER HÖRSAAL FÜR 2013.....	184
ABBILDUNG 10-49: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE RLT-ANLAGE GROßER HÖRSAAL FÜR 2013 .....	184
ABBILDUNG 10-50: PRÄSENZMELDER FÜR RAUM GROßER HÖRSAAL FÜR MAI BIS JULI 2013 .....	185
ABBILDUNG 10-51: ZÄHLERSTRUKTUR ZUR ERFASSUNG DES ENERGIEAUFWANDS DER KÜNSTLICHEN BELEUCHTUNG .....	186
ABBILDUNG 10-52: LINKS: BLICK IN DAS FOYER IM EG, RECHTS: BLICK IN FOYER AUS UG AUF LEUCHTBÄNDER.....	189
ABBILDUNG 10-53: BLICK AUF DAS FOYER VON AUßEN, BELEUCHTUNG EINGESCHALTET (AUFNAHME AM 16. SEPTEMBER 2013).....	190
ABBILDUNG 10-54: GEGENÜBERSTELLUNG DES MONATLICHEN VERLAUFS DES ELEKTROENERGIEVERBRAUCHS DER KÜNSTLICHEN BELEUCHTUNG VERKEHRSFLÄCHEN .....	190
ABBILDUNG 10-55: VERLAUF DES MONATLICHEN ELEKTROENERGIEVERBRAUCHS DER KÜNSTLICHEN BELEUCHTUNG VERKEHRSFLÄCHEN ....	191
ABBILDUNG 10-56: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DER VERKEHRSFLÄCHEN FÜR DIE JAHRE 2013 UND 2014 .....	191
ABBILDUNG 10-57: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DER VERKEHRSFLÄCHEN VON OKTOBER 2013 BIS AUGUST 2014 .....	192
ABBILDUNG 10-58: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DER VERKEHRSFLÄCHEN VON NOVEMBER 2014 BIS NOVEMBER 2015 OHNE ERKENNBARE FEHLFUNKTIONEN.....	192
ABBILDUNG 10-59: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DER VERKEHRSFLÄCHEN IM ERDGESCHOSS VON 2013 BIS 2014.....	193
ABBILDUNG 10-60: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DER VERKEHRSFLÄCHEN IM ERDGESCHOSS IM JAHR 2015 .....	193
ABBILDUNG 10-61: ÜBERSICHT ZUR LAGE DER UNTERRICHTSRÄUME IM GEBÄUDE.....	195
ABBILDUNG 10-62: BLICK IN DEN RAUM „GROßER HÖRSAAL“.....	196
ABBILDUNG 10-63: ABBILDUNG DER HÄNGELEUCHTE IM RAUM PLANUNGSRAUM EG IDENTISCH ZU SEMINARRAUM OG .....	196
ABBILDUNG 10-64: VERLAUF DES MONATLICHEN ELEKTROENERGIEVERBRAUCH FÜR KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG RAUM „GROßER HÖRSAAL“ (2015 BIS AUGUST).....	197
ABBILDUNG 10-65: VERLAUF DES MONATLICHEN ELEKTROENERGIEVERBRAUCH FÜR KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DREI UNTERRICHTSRÄUME IM ERDGESCHOSS (2015 BIS AUGUST).....	197
ABBILDUNG 10-66: VERLAUF DES MONATLICHEN ELEKTROENERGIEVERBRAUCH FÜR KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG FÜR EIN UNTERRICHTSRÄUME IM OBERGESCHOSS (2015 BIS AUGUST) .....	198
ABBILDUNG 10-67: GEGENÜBERSTELLUNG DES SPEZIFISCHEN MONATLICHEN ELEKTROENERGIEVERBRAUCHS FÜR KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DER UNTERRICHTSRÄUME, GROßER HÖRSAAL, RÄUME IM ERD- UND OBERGESCHOSS.....	198
ABBILDUNG 10-68: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DER UNTERRICHTSRÄUME IM ERDGESCHOSS VON 2013 BIS 2014.....	200
ABBILDUNG 10-69: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DER UNTERRICHTSRÄUME IM ERDGESCHOSS JANUAR 2014 BIS ENDE FEBRUAR 2014.....	200

## 12 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 10-70: BÜRO MIT PENDELLEUCHTEN [[14]] .....	201
ABBILDUNG 10-71: GRUNDRISS E UND OG MIT ZUORDNUNG ZÄHLER ZU FLÄCHEN .....	202
ABBILDUNG 10-72: GEGENÜBERSTELLUNG MONATLICHER ELEKTROENERGIEVERBRAUCH FÜR KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG BÜROS .....	203
ABBILDUNG 10-73: GEGENÜBERSTELLUNG SPEZIFISCHER MONATLICHER ELEKTROENERGIEVERBRAUCH FÜR KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG BÜROS IM OBER- UND ERDGESCHOSS .....	203
ABBILDUNG 10-77: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DER BÜRORÄUME IM OBERGESCHOSS IM JAHR 2014 .....	205
ABBILDUNG 10-78: CARPET-PLOT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG FÜR DIE KÜNSTLICHE BELEUCHTUNG DER BÜRORÄUME IM OBERGESCHOSS JANUAR 2014 BIS ENDE FEBRUAR 2014.....	205
ABBILDUNG 10-79: ZÄHLERSTRUKTUR ZUR ERFASSUNG DES ENERGIEAUFWANDS DER ARBEITSMITTEL.....	206
ABBILDUNG 10-80: CARPET-PLOT 2013 TRINKWASSERVERBRAUCH .....	207
ABBILDUNG 10-81: 2014 TRINKWASSERVERBRAUCH KALT AUSZUG .....	207
ABBILDUNG 10-82: 2015 TRINKWASSERVERBRAUCH KALT AUSZUG .....	208
ABBILDUNG 10-83: 2015 AUSZUG TRINKWASSERVERBRAUCH KALT AUSZUG .....	208
ABBILDUNG 11-1: MODELL ZUR VORHERSAGE DER BEKLEIDUNG ALS FUNKTION DER AUßENTEMPERATUR UM 6:00 UHR AUS [104] .....	211
ABBILDUNG 11-2: BOXPLOT DER VORGEHESAGTEN TÄGLICHEN BEKLEIDUNGSSTÄRKE ALS FUNKTION DER AUßENTEMPERATUR UM 6:00 UHR MONATSWEISE VON 2013 BIS EINSCHLIEßLICH 2015.....	211
ABBILDUNG 11-3: ÄNDERUNG DER ZULÄSSIGE OPERATIVEN TEMPERATUR DURCH SAISONALE ANPASSUNG DER BEKLEIDUNGSSTÄRKE ABBILDUNG NACH [102].....	213
ABBILDUNG 11-4: ZEITLICHER VERLAUF DER ERWÄRMUNG EINER HEIZDECKE AM 7.2.2013 VON LINKS: UM:19:04,19:06,19:09 RAUM 1.E.14 .....	214
ABBILDUNG 11-5: LUFTTEMPERATUREN GEMESSEN AM BEHAGLICHKEITSMESSTAND UND MITTELS RAUMTHERMOSTATEN IM KÜHLFALL, RAUM 1.E.05 .....	215
ABBILDUNG 11-6: VERLAUF DER LUFT- UND GLOBETEMPERATUR AM BEHAGLICHKEITSMESSTAND RAUM 1.E.05 .....	215
ABBILDUNG 11-7: VERLAUF DER LUFT- UND GLOBETEMPERATUR AM BEHAGLICHKEITSMESSPLATZ FÜR 24 STUNDEN IM RAUM 1.E.05..	216
ABBILDUNG 11-8: MITTLERE GLOBE- UND LUFTTEMPERATUR ALS FUNKTION DER AKTUELLEN AUßENLUFTTEMPERATUR .....	216
ABBILDUNG 11-9: RAUM 1.E.12 .....	217
ABBILDUNG 11-10: RAUM 1.E.12 .....	217
ABBILDUNG 11-11: ZEITLICHER VERLAUF DER TEMPERATUREN IM RAUM 1.E.12 .....	218



## 13 Literaturverzeichnis und Referenzen

- [1] DIN 277-2:2005-02, Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau, Teil 2: Gliederung der NettoGrundfläche (Nutzflächen, Technische Funktionsflächen und Verkehrsflächen), DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, 2005.
- [2] DIN V 18599-10:2011-12, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011
- [3] STADTWERKE ERFURT ENERGIE GMBH, Bescheinigung über die energetische Bewertung der Fernwärme nach FW 309-1 2010.
- [4] DIN V 18599-5:2007-02, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen, Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [5] DIN V 18599-10:2007-02, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [6] FREISTAAT THÜRINGEN LANDESAMT FÜR BAU UND VERKEHR, Erläuterungsbericht zur HU-Bau 28.11.2008, 2008.
- [7] Ausschreibungsanzeiger Thüringen 2010 Nr. 9.
- [8] Ausschreibungsanzeiger Thüringen 2010 Nr. 14.
- [9] Ausschreibungsanzeiger Thüringen 2010 Nr. 23.
- [10] FREISTAAT THÜRINGEN: Landeshaushaltsplan 2013/2014 Einzelplan 18 Staatliche Hochbaumaßnahmen.
- [11] FREISTAAT THÜRINGEN: Landeshaushaltsplan 2008/2009 Einzelplan 18 Staatliche Hochbaumaßnahmen.
- [12] THÜRINGER LANDSAMT FÜR STATISTIK: Preisindizes für Bauwerke in Thüringen Februar 2014. 2014.
- [13] GERBER ARCHITEKTEN, Ansichten zur HU-Bau, 2008.
- [14] NORWIG TMBLV, Foto alle Bildrechte bei Herrn Jürgen Norwig TMBLV 2012.

- [15] GERBER ARCHITEKTEN, Grundrisse zur AFU-Bau-Planung 2009.
- [16] ING.- BÜRO DR. KRÄMER, Nachweis des energiesparenden Wärmeschutzes [HU-BAu] - förmlicher Nachweis - 2008.
- [17] ING.- BÜRO DR. KRÄMER, Nachweis des energiesparenden Wärmeschutzes [Ausführungsplanung] - förmlicher Nachweis - 2011.
- [18] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), 24. Juli 2007
- [19] TOBIAS WERNER, Anforderungen thermische Hülle Neubau Leipziger str. FH Erfurt 2008.
- [20] DIN 18516-1:2010-06, Außenwandbekleidungen, hinterlüftet, Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze, Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [21] GERBER ARCHITEKTEN, Brandschutzfassade (Festverglasung), 2010.
- [22] Glass Performance Calculator, GUARDIAN EUROPE S.A. ,  
<https://www.guardian.com/commercial/ToolsandResources/EvaluationTools/GlassAnalytics/index.htm>. 2015.
- [23] SCHWENGBER •FENSTER- UND FASSADENBAU • BURKERSDORF, Aufstellung der Wärmedurchgangskoeffizienten der Fassaden - und Türsysteme und Bauanschlüsse, 2011.
- [24] DIN EN 13947:2007-07, Wärmetechnisches Verhalten von Vorhangfassaden, Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten, Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [25] DIN EN 12207:2000-6, Fenster und Türen Luftdurchlässigkeit Klassifizierung DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
- [26] DIN EN 12152:2002, Vorhangfassaden Luftdichtheit Leistungsanforderung und Klassifizierung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag.
- [27] BAUTHERMOGRAFIE & LUFTDICHTHEITSPRÜFUNG LUTZ WEIDNER, Zertifikat und Prüfbericht über die Luftdichtheitsmessung, 2012.
- [28] DIN 4108-7:2001-08, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele, DIN Deutsches Institut für Normung eV, 2001.
- [29] WOLFGANG FEIST: Passivhaus Projektierungs Paket 2007. PHPP 2007 ; Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser. Passivhaus-Inst.: Darmstadt, 2007.

- [30] MATRIN FORSTNER, Systembeschreibung zur Gesamtlösung des haustechnischen und konstruktiven Gebäudesystems, 2008.
- [31] FREISTAAT THÜRINGEN LANDESAMT FÜR BAU UND VERKEHR, Leistungsverzeichnis Neubau Hörsaal und Laborgebäude Gewerk Fassade, 2010.
- [32] GERBER ARCHITEKTEN, schriftliche Mitteilung 2011.
- [33] TOBIAS KLIMMT: *U-Wert und Wärmebrückenbestimmung am Neubau Leipziger Straße 77*. Fachhochschule Erfurt Fachbereich Gebäude- und Energietechnik, 2012
- [34] VISIONWORLD GMBH, Psi-Therm 2D, psi Therm GmbH, 2011.
- [35] DIN EN ISO 10211-1, Wärmebrücken im Hochbau Wärmeströme und Oberflächentemperaturen Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [36] GERBER ARCHITEKTEN, Fassade Verbinder V-Schnitt 2010.
- [37] DIN EN 12831:2003-08, Heizungsanlagen in Gebäuden Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast Deutsche Fassung EN 12831:2003, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [38] DIN EN 12831 BEIBLATT 1:2008-7, Heizungssystem in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast -Nationaler Anhang, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 2008.
- [39] HKL INGENIEURGESELLSCHAFT MBH, Heizlastberechnung nach EN 12831 Neubau Hörsaal- und Laborgebäude an der FH Erfurt, 2009, p. 78.
- [40] FREISTAAT THÜRINGEN LANDESAMT FÜR BAU UND VERKEHR, Lageplan Liegenschaft Standort Leipziger Straße 77, 2010.
- [41] MARCO SCHMIDT: Modellbildung und Entwurf von Regelungsstrategien zur Nutzung von Umweltenergiequellen in einer Simulationsumgebung. Fachhochschule Erfurt, 2011
- [42] GRUNDFOS SE, Produktdatenblatt Grundfos Unterwasserpumpen SP A, SP, 2011.
- [43] DIPL.-GEOLOGE THOMAS KRAUSE, Hydrogeologische Dokumentation der Brunnenbohrungen 2011.
- [44] DAVID FEIGE: Vergleich von EDV-Kühlungsvarianten mit und ohne Abwärmenutzung im Rahmen eines EnOB-Forschungsprojektes für den Neubau eines Hochschulgebäudes. Fachhochschule Erfurt, 2010
- [45] ALEXANDER KOCH: Anwendungsmöglichkeiten eines CFD-Simulationstools am Beispiel Große Hallen und Räume eines Lehrgebäudes. Fachhochschule Erfurt, 2012

- [46] VDI 3814 BLATT 6, Gebäudeautomation, Grafische Darstellung von Steuerungsaufgaben, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth-Verlag, 2008.
- [47] SØREN ØSTERGAARD JENSEN: Characterization and optimized control by means of multiparameter controllers. In: (2010).
- [48] SUSANNE KOMHARD: *Model-Based Approach for Performance Monitoring of Commercial Buildings*. Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2008
- [49] DIRK JACOB: Gebäudebetriebsoptimierung. Verbesserung von Optimierungsmethoden und Optimierung unter unsicheren Randbedingungen. Fraunhofer Verl., 2012
- [50] ANDREAS PLANK: Grafiken und Statistik in R. 2010.
- [51] EnOB-Datenbank Gebäudemonitoring im Detail  
[http://enob.ise.fraunhofer.de/website/enob/EnOB-Datenbank/FH\\_Erfurt.html](http://enob.ise.fraunhofer.de/website/enob/EnOB-Datenbank/FH_Erfurt.html).
- [52] DIN 277-1:2005-02, Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau, Teil 1: Begriffe, Ermittlungsgrundlagen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, 2005.
- [53] DIN V 18599-5:2011-12, Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen, Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [54] ACHIM ZEILEIS, GABOR GROTHENDIECK: zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series. In: 2005 14 (2005), S. 27.
- [55] DIN 4710:2003, Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, 2003.
- [56] DIN V 4108-6:2003-06, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, DIN Deutsches Institut für Normung eV, 2003.
- [57] CLIMATE & ENVIRONMENT CONSULTING POTSDAM GMBH, DEUTSCHEN WETTERDIENST (DWD): Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
2014.
- [58] EnergyPlus Weather Converter, U.S. Department of Energy, <https://energyplus.net/>. - Aktualisierungsdatum: V7.1.0.010.2011.

- [59] MARKUS KOTTEK, et al.: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. In: *Meteorologische Zeitschrift* 15 (2006), S. 259-263.
- [60] GOOGLE EARTH 7.1.5.1557, in: I. Landsat (Ed.), 2015.
- [61] GERBER ARCHITEKTEN, Schnitt AA zur AFU-Bau-Planung 2009.
- [62] ADOLF THIES GMBH & CO. KG, Angebot CO2-Sensor.
- [63] THERMOKON SENSORTECHNIK GMBH, Produktdatenblatt CO2-Sensor Typ: WRF04 CO2 / LK CO2, 2011.
- [64] DOREEN E. KALZ: Heating and cooling concepts employing environmental energy and thermo-active building systems for low-energy buildings. System analysis and optimization. Fraunhofer ISE, 2010
- [65] TAS (Thermal Analysis Software) Environmental Design Solutions Limited, edsl.net Version 9.0.9e.
- [66] TOBIAS WERNER, Thermische Gebäudesimulation des FH Neubaus Leipziger Straße (unveröffentlicht), 2008.
- [67] WETTERDATEN: TRY Daten für Erfurt unveröffentlicht. 2003.
- [68] THOMAS HEYDENBLUTH: Simulationsbasierte Energiebedarfsberechnung eines innovativen Hochschulgebäudes (Bachelor-Thesis). Fachhochschule Erfurt, 2011
- [69] DesignBuilder, DesignBuilder Software Ltd, [www.designbuilder.co.uk/](http://www.designbuilder.co.uk/). V.3.0.0.105.
- [70] EnergyPlus Simulation Software, U.S. Department of Energy, <https://energyplus.net/>. 2011.
- [71] OpenStudio SketchUp Plug-in NREL National Renewable Energy Laboratory <https://www.openstudio.net>. Version: 1.6.0.
- [72] SketchUp, Trimble Navigation Limited, <http://www.sketchup.com/de>. Version: 12.1.106.
- [73] SEBASTIAN BURHENNE: Monte Carlo based uncertainty and sensitivity analysis for building performance simulation. Shaker, Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung, 2013
- [74] I.A. MACDONALD: *Quantifying the effects of uncertainty in building simulation*. University of Strathclyde, Department of Mechanical Engineering, Doctor. 2002
- [75] DAVID FEIGE: Unsicherheitsanalyse der thermischen Simulation für den Neubau eines Hochschulgebäudes im Rahmen eines EnOB-Forschungsprojektes. Masterarbeit. 2012

- [76] VDI 2078:2015, Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation), Verein Deutscher Ingenieure, Beuth-Verlag, 2015.
- [77] JOHN A. DUFFIE, WILLIAM A. BECKMAN: Solar engineering of thermal processes. Wiley: New York [u.a.], 1991.
- [78] ASHRAE: International Weather for Energy Calculations (IWECC Weather Files) Users Manual and CD-ROM. Atlanta, 2001.
- [79] DIN 5034-2:1985-2, Tageslicht in Innenräumen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 1985.
- [80] RICHARD PEREZ, et al.: Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. In: *Solar Energy* 44 (1990), S. 271-289.
- [81] Messdaten der Außentemperatur DWD Station Flughafen Erfurt-Weimar, Deutschen Wetterdienst (DWD), [ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations\\_germany/climate/hourly/air\\_temperature/recent/](ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/hourly/air_temperature/recent/). - Aktualisierungsdatum: 2015-01-04.
- [82] ASHRAE, ASHRAE Fundamentals Handbook. An instrument of service prepared for the profession, in: R. American Society of Heating, E. Air Conditioning (Eds.), ASHRAE, Atlanta, Ga., 2013.
- [83] Agrarmeteorologische Daten für Thüringen, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) [http://www.tll.de/wetter/wet\\_idx.htm](http://www.tll.de/wetter/wet_idx.htm). - Aktualisierungsdatum: 2015-03-20.
- [84] KLAUS HEILEMANN, Klimamessfeld FH Erfurt in: K. Heilemann (Ed.), Messdaten für 2014 und 2015.
- [85] VDI 3807 BLATT 1:2013, Verbrauchskennwerte für Gebäude Blatt 1 Grundlagen, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth-Verlag, 2013.
- [86] VDI 3807 BLATT 1:1994, Verbrauchskennwerte für Gebäude Blatt 1 Grundlagen, zurückgezogen 2007, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth-Verlag, 1994.
- [87] VDI 4710 BLATT 2:2007, Meteorologische Daten in der technischen Gebäudeausrüstung Gradtage, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth-Verlag, 2007.
- [88] VDI 2067 BLATT 2:1993, Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen - Raumheizung zurückgezogen 2002, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth-Verlag, 1993.
- [89] DIN V 18599-BEIBLATT 1:2010-01, Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Beiblatt 1: Bedarfs-/Verbrauchsabgleich, Beuth Verlag GmbH, 2011.

- [90] KLAUS BLÜMEL, Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland, Forschungsbericht / Bundesministerium für Forschung und Technologie : Technolog. Forschung u. Entwicklung, Nichtnukleare Energietechnik ; 86-051, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, Karlsruhe, 1986, p. 168 S.
- [91] ANTON MAAS, STEPHAN SCHLITZBERGER: DIN V 18599 für Wohngebäude - verbesserte Bewertungsansätze und Überprüfung der Anwendungsmöglichkeit auf Plusenergiehäuser, Stuttgart, 2014
- [92] SORTeCH AG, SorTech Adsorptionskältemaschine Planungsanleitung Wärmepumpenmodus, 2009.
- [93] Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG, Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung 2002
- [94] VDI 4660 BLATT 2 2003:2, Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energieumwandlung, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth-Verlag, 2003.
- [95] AGFW FW 309 TEIL 1 2014:5, Energetische Bewertung von Fernwärme Bestimmung der spezifischen Primärenergiefaktoren für Fernwärmeversorgungssysteme, AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., 2014.
- [96] DIN V 18599-1:2011-12, Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger, Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [97] DIN V 18599-7:2011-12, Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau, Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [98] DIN EN 308:1997-06, Wärmeaustauscher, Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft- und Luft/Abgas- Wärmerückgewinnungsanlage, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, 1997.
- [99] 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, Beuth Verlag GmbH, 2006.
- [100] DIN EN ISO 7726:2002-04, Umgebungsklima Instrumente zur Messung physikalischer Größen, Beuth Verlag GmbH, 2002.

- [101] ISO 7730:2005(E), Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, Beuth Verlag GmbH, 2005.
- [102] DIN EN 15251:2012-12, Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik, Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [103] B. GLÜCK: Ein Vorschlag zur verbesserten Darstellung und Messung der operativen Raumtemperatur. In: *GI - Gesundheits Ingenieur* 127 (2006).
- [104] STEFANO SCHIAVON, KWANG HO LEE, Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures, 2012.
- [105] KWANG LEE, STEFANO SCHIAVON: Influence of Three Dynamic Predictive Clothing Insulation Models on Building Energy Use, HVAC Sizing and Thermal Comfort. In: *Energies* 7 (2014), S. 1917.
- [106] MICHELE DE CARLI, et al.: People's clothing behaviour according to external weather and indoor environment. In: *Building and Environment* 42 (2007), S. 3965-3973.
- [107] FREISTAAT THÜRINGEN: Richtlinien für die Durchführung von Bauaufgaben des Freistaats Thüringen.
- [108] VDI 6015 2003, BUS-Systeme in der Gebäudeinstallation Anwendungsbeispiele, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth-Verlag, 2013.
- [109] DIN EN ISO 16484-2:2004-10, Systeme der Gebäudeautomation (GA) Teil 2: Hardware (ISO 164842:2004), DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, 2004.
- [110] JÜRGEN CHRISTOFFER, et al.: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY. Selbstverl. des Deutschen Wetterdienstes: Offenbach a. Main, 2004.



## 14 Abkürzungen, Symbole und Indices

### 14.1 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung	Quelle
AFU	Ausführungsunterlage-Bau (AFU-Bau)	
AWP	Adsorptionswärmepumpe	
AG	Auftraggeber	
AN	Auftragnehmer	
BKT	Betonkernaktivierung	
BUS	Kommunikationsmedium und -methode zwischen zwei oder mehreren Einrichtungen mit Schnittstellen für die Datenübertragung	[108], [109]
CET	engl. für Central Europe Time, gleichbedeutend (MEZ)	
CEST	engl. für Central Europe Summer Time, gleichbedeutend (MEZS)	
COS	Change of state	[109]
COV	Change of Value	[109]
CFD	Computational Fluid Dynamics, Strömungssimulation	
DDC	Direct Digital Control	[109]
DF	daylight factor, gleichbedeutend für Tageslichtquotient	
DN	Nennweite Rohrleitung	
DIN	DIN Deutsches Institut für Normung e. V.	
DWD	Deutscher Wetterdienst	
EnEV	Energieeinsparverordnung	
EVU	Energieversorgungsunternehmen	
Fak. LGF	Fakultät Landschaftsarchitektur- Gartenbau und Forst	
FW	Fernwärme	
G		
HK	Heizkreis	
HLG	Hörsaal- und Laborgebäude in Erfurt	
HU-Bau	Haushaltsunterlage-Bau	
ISP	Informationsschwerpunkt in der Gebäudeautomation	
J		
KK	Kühlkreislauf	
KMF	Wetterstation Klimamessfeld der FH Erfurt	
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	
KLZ	Kühllastzone nach VDI 2078	
MEZ	mitteleuropäische Zeit (gleichbedeutend CET)	
MEZS	mitteleuropäische Sommerzeit (gleichbedeutend CEST)	
NF	Nutzfläche	[52]
NGF	Netto-Grundfläche	[52]
NHU-Bau	Nachtragshaushaltsunterlage-Bau	
OG	Obergeschoss	
OK	Oberkante (z.B. OK-Dach Oberkante Dach)	

PE	Primärenergie	
RLT	raumluftechnische Anlage	
RWA	Rauch- und Wärmeabzug	
S		
TAS	Thermal Analysis Software	
TF	technische Funktionsfläche	[52]
TGA	Technische Gebäudeausrüstung	
TRY	Testreferenzjahre	[110]
UG	Untergeschoss	
UTC	koordinierte Weltzeit Coordinated Universal Time	
VAV	variable Volumenstromregler	
VHF	Vorgehängte hinterlüftete Fassade	
VL	Vorlauf	
WLG	Wärmeleitgruppe	
WMO	World Meteorological Organization	
XPS	Extrudierter Polystyrol Hartschaum	
Y		
Z		

## 14.2 Symbole

### 14.2.1 Lateinische Symbole

A	Fläche	Einheit
c	spezifische Wärmekapazität	kWh/kgK
d	Dicke	m
E	Strahlungsenergie	Wh/m <sup>2</sup>
F		
f	Faktor	
G	Gradtage	K d
g	g-Wert, Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	-
$H_T$	Transmissionswärmeverlust	W/K
$H_{T'}$	spezifische, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust	W/m <sup>2</sup> K
I	Strahlungsleistung	W/m <sup>2</sup>
$I_{cl}$	thermischer Isolationswert	clo oder m <sup>2</sup> K/W
M	Energieumsatz	Met, W/m <sup>2</sup>
n	Luftwechsel, Luftwechselrate	h <sup>-1</sup>
Q	Energie für Konditionierung, Wärmeenergie	kWh
$\dot{Q}$	Thermische Leistung,	kW
q	flächenspezifischer Energie für Konditionierung	kWh/m <sup>2</sup>
R		
S		
U	Wärmedurchgangskoeffizient auch U-Wert	W/m <sup>2</sup> K
t	Temperatur	°C
$\bar{t}$	mittlerer Temperatur	
V	Volumen	m <sup>3</sup>
W	Hilfsenergie, elektrische Energie	kWh

### 14.2.2 Griechische Symbole

$\theta$	Temperatur in Celsius	°C
$\bar{\theta}$	mittlere Temperatur	°C
$\Psi$	längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m K)
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W/mK

### 14.3 Indices

a	Jahr
b	Nutzenergiebedarf im Gebäude
c	
cw	Vorhangfassade (curtain walling)
day	täglich
diff	diffuse Solarstrahlung horizontal
dir	direkte Solarstrahlung horizontal
e	extern
FW	Fernwärme
glob	globale Solarstrahlung horizontal
h	Heizen
hydr	hydraulisch
nth	monatlich
p	Primärenergie
v	RLT-Luftsystem (ventilation)
v	Beleuchtungsstärke
vc	RLT-Luftsystem kalt (ventilation coling)
verdr	Verdrängungsmix
vh	RLT-Luftsystem warm (ventilation heating)
VL	Vorlauf
d	Verteilung

## 14.4 Beispiele verwendete Notationen

$\theta_{VL,FW}$	Vorlauftemperatur der Fernwärme/ Nahwärme	°C
$\bar{\theta}_{24h,AU}$	Mittlere Tagesaußentemperatur 24h	
$\theta_i$	Rauminnentemperatur	
$E_v$	Beleuchtungsstärke Lux	lx lm/m²
$G_{20/15}$	Gradtage einer Periode oder TRY auf Basis Raumtemperatur 20 °C und Heizgrenze 15 °C	
$G_{20/15}$	Gradtage des TRY 5 auf Basis Raumtemperatur 20 °C und Heizgrenze 15 °C	
$G_m$	Gradtage einer langjährige Beobachtung	
$f_p$	Primärenergie Faktor	
$f_{p,FW}$	Primärenergiefaktor der Fernwärme	
$f_{p,verdr}$	Primärenergiefaktor der Verdrängungsmix	
$q_{h,b}$	spezifische Nutzenergie für Heizen	kWh/m²a
$V_e$	Gebäudevolumen extern	m³
$I_{diff}$	Strahlungsleistung der diffusen Solarstrahlung horizontal	
$I_{glob}$	Strahlungsleistung der globalen Solarstrahlung horizontal	
$k_T$	Clearness index zur Berechnung der Diffusstrahlung	
$W$	Hilfsenergie, hydraulischer Energiebedarf	kWh/mth
$W_v$	Elektroenergie für RLT	
$\theta_e$	Außenlufttemperatur	°C
$t_0$	Operative Raumtemperatur	°C
$t_a$	Raumlufthtemperatur	°C
$\bar{t}_r$	mittlerer Strahlungstemperatur	°C
$U_{cw}$	Wärmedurchgangskoeffizient der Vorhangfassade	
$\Delta U_{WB}$	Wärmebrückenzuschlag	W/m²K
$W_{h,d,hydr}$	hydraulische Energiebedarf von Heizungsnetzen	

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Noch festzulegen	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht		
3. Titel Energieoptimiertes Bauen: Neubau FH Erfurt, Grüner Campus – Vorbereitung und Durchführung des Intensivmonitorings für den Neubau der FH Erfurt – Schlussbericht Gesamtprojekt			
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Weber, Klaus		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.09.2015	
		6. Veröffentlichungsdatum 31.03.2016	
		7. Form der Publikation Bericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fachhochschule Erfurt Altonaer Str. 25 99085 Erfurt		9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
		10. Förderkennzeichen FKZ 03274310	
		11. Seitenzahl 236	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn		13. Literaturangaben 110	
		14. Tabellen 87	
		15. Abbildungen 196	
16. Zusätzliche Angaben			
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)			
18. Kurzfassung Das Vorhaben sollte die Anwendung innovativer Energieversorgung für ein Hochschulgebäude demonstrieren. Das Energiekonzept des Gebäudes zeichnet sich durch verschiedene innovative Ansätze aus, die einen besonders energieeffizienten Gebäudebetrieb erlauben sollen. Unter Nutzung von Fernwärme als Antrieb einer Adsorptionswärmepumpe gelingt die kombinierte Nutzung einer Regenwasserzisterne als regeneratives Wärme- und Kältereservoir und die Abwärmenutzung der zentralen EDV-Technik. Das gesteckte Ziel – ein Primärenergieverbrauch von unter 50 kWh/(m <sup>2</sup> ·a) – wurde nicht erreicht. Der Gebäudebetrieb wird weiter optimiert.			
19. Schlagwörter Energieeffizienz, Bürogebäude, Hörsaalgebäude, Laborgebäude, Monitoring			
20. Verlag Noch festzulegen		21. Preis Noch festzulegen	

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) final report	
3. title Energy-optimised Construction: A New Building on FH Erfurt's Green Campus – Arranging and Performing the Intensive Monitoring of a New Building at FH Erfurt – Completed Project 's Final Report		
4. author(s) (family name, first name(s)) Weber, Klaus	5. end of project 31.09.2015	
	6. publication date 31.03.2016	
	7. form of publication report	
8. performing organization(s) (name, address) Fachhochschule Erfurt – University of Applied Sciences Altonaer Str. 25 99085 Erfurt Germany	9. originator's report no.	
	10. reference no. FKZ 03274310	
	11. no. of pages 236	
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 110	
	14. no. of tables 87	
	15. no. of figures 196	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract The project was to demonstrate the application of a university building's innovative energy supply. The building's energy concept is characterised by several innovative approaches that aim for a notably energy-efficient building operation. Using district heating to power an adsorption heat pump allows for combining a rainwater reservoir as regenerative heating and cooling storage with utilising waste-heat recovery from the central electronic data processing equipment. The target – a primary-energy consumption of less than 50 kWh/(m <sup>2</sup> ·a) – could not be met, and optimising the building's operation will be continued.		
19. keywords energy-efficiency, office building, lecture building, laboratory building, monitoring		
20. publisher to be determined	21. price to be determined	