

Häring, Georg; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried

Working Paper

Messtechnische Analyse der Grundwasserwärmepumpenanlage in einem Büro- und Produktionsgebäude

Arbeitsberichte - Working Papers, No. 21

Provided in Cooperation with:

Technische Hochschule Ingolstadt (THI)

Suggested Citation: Häring, Georg; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2011) : Messtechnische Analyse der Grundwasserwärmepumpenanlage in einem Büro- und Produktionsgebäude, Arbeitsberichte - Working Papers, No. 21, Hochschule Ingolstadt - University of Applied Sciences, Ingolstadt,
<https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:573-373>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/202573>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

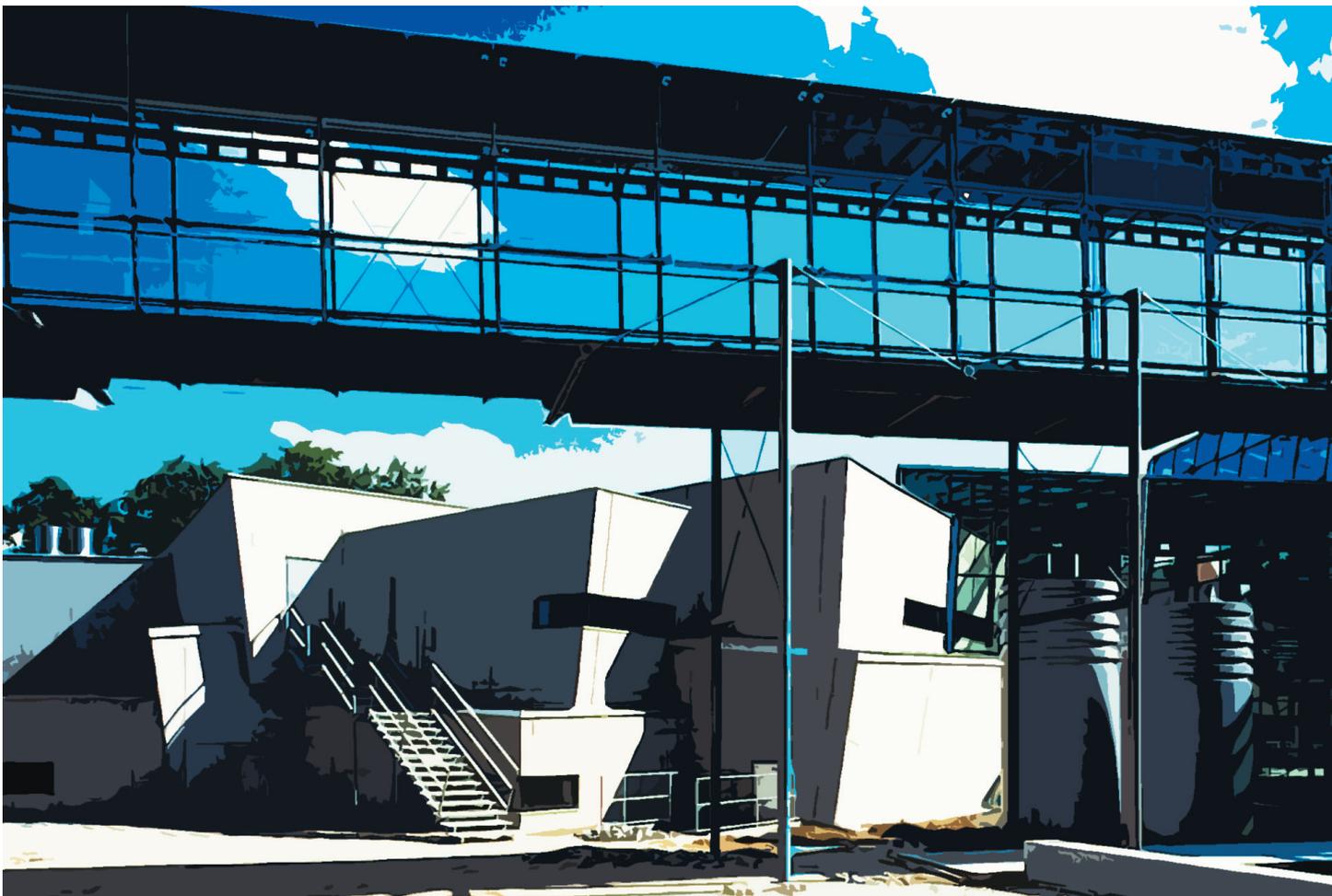


**Messtechnische Analyse der
Grundwasserwärmepumpenanlage
in einem Büro- und
Produktionsgebäude**

Working Papers

Arbeitsberichte

Georg Häring, Christoph Trinkl, Wilfried Zörner



Messtechnische Analyse der Grundwasserwärmepumpenanlage in einem Büro- und Produktionsgebäude

Georg Häring, Christoph Trinkl, Wilfried Zörner

Abstract

In einer messtechnischen Untersuchung wurde vom *KOMPETENZFELD ERNEUERBARE ENERGIEN* die Leistungsfähigkeit eines grundwassergespeisten Heiz- und Kühlsystems mit Wärmepumpen in einem Büro- und Produktionsgebäude analysiert und bewertet. Dazu wurde eine umfangreiche energetische Bilanzierung von Gebäudetechnik und Gebäude vorgenommen. Innerhalb des mehrjährigen Untersuchungszeitraumes konnten umfangreiche Erkenntnisse über die Effizienz und Arbeitsweise der Heiz- und Kühlanlage gewonnen werden. Dabei wurden eine Reihe von Problemstellungen im realen Anlagenbetrieb identifiziert sowie das Gesamtsystem auf Basis der Messergebnisse optimiert. Um die praxisrelevanten Forschungsergebnisse in zukünftigen innovativen Gebäudetechnikkonzepten einfließen zu lassen wurden konkrete Handlungsempfehlungen für die Planungs-, die Inbetriebnahme- und Einregulierungsphase sowie für die Betriebsführung abgeleitet.

Arbeitsberichte
Working Papers

Heft Nr. 21 aus der Reihe
„Arbeitsberichte – Working Papers“
ISSN 1612-6483
Ingolstadt, im November 2011

Messtechnische Analyse der Grundwasserwärmepumpenanlage in einem Büro- und Produktionsgebäude

Georg Häring, Christoph Trinkl, Wilfried Zörner¹

KOMPETENZFELD ERNEUERBARE ENERGIEN der Hochschule Ingolstadt

Tel: 0841-9348 641, e-Mail: haering@haw-ingolstadt.de

Esplanade 10, D-85049 Ingolstadt

Summary

In order to demonstrate the potential of technical building equipment based on renewable energies in daily industrial operation as well as to generate planning information, the *CENTRE OF EXCELLENCE FOR RENEWABLE ENERGY RESEARCH* at *Ingolstadt University of Applied Sciences* (Germany) monitored an innovative multifunctional building. Thermal energy for heating of the building is provided by two groundwater-coupled heat pumps. They feed the thermo-active structure of the building as well as the surface heating installations. Cooling is also driven by groundwater. In this case, the heat is also dissipated by the building's thermo-active structure and surface heating installations. A very special feature of this building is its heating/cooling façade that combines the glazing function with heating and cooling through its piping-like structure.

During the monitoring, all energy flows in the building itself, the weather data, as well as the room conditions in selected sections of the building, were measured. Considering the different climatic conditions, the performance of the heat pumps and the installed heating/cooling systems, especially the effect of the active façade were evaluated. The function of the installed heating systems, especially the active façade, was demonstrated and the performance of the system could be improved significantly. However, a number of drawbacks with regard to operation and controls had to be overcome and recommendations for action were made.

¹ Dipl.-Ing. (FH) Georg Häring ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am *KOMPETENZFELD ERNEUERBARE ENERGIEN* und arbeitet dort an der Entwicklung und Optimierung von Energiesystemen und Biogasanlagen. Dr. Christoph Trinkl beschäftigt sich mit Regenerativen Energiesystemen mit dem Schwerpunkt solarthermische Anlagen und leitet das *KOMPETENZFELD ERNEUERBARE ENERGIEN*. Prof. Dr.-Ing. Wilfried Zörner leitete das vorliegende Forschungsvorhaben. Er beschäftigt sich im Rahmen der Angewandten Forschung mit Solar- und Biogastechnik und vertritt in der *Fakultät Maschinenbau* die Lehrgebiete Entwicklung und Konstruktion, Solartechnik sowie Erneuerbare Energien.

Inhaltsverzeichnis

Summary	1
Inhaltsverzeichnis	2
1. Ausgangslage und Projektziele	3
2. Gebäude und Anlagentechnik	5
3. Monitoring	7
4. Analyse der thermischen Behaglichkeit im Gebäude	7
4.1. Behaglichkeit im Heizbetrieb	8
4.2. Behaglichkeit im Kühlbetrieb	10
5. Analyse der Wärmebilanz des Gebäudes	12
5.1. Wärmebilanz im Heizbetrieb	13
5.2. Wärmebilanz im Kühlbetrieb	14
6. Analyse der Endenergiebilanz des Gebäudes	15
7. Analyse der wasserdurchströmten Heiz- und Kühlfassade	16
7.1. Durchströmung und Regelung	17
7.2. Einfluss auf die Behaglichkeit	18
Analyse der	19
8. Wärmepumpenanlage	19
8.1. Arbeitszahlen	20
8.2. Wärmequellenanlage und Grundwassertemperatur	21
8.3. Regelung der Wärmepumpenanlage und Optimierung	24
8.4. Einfluss von Regelungseinstellungen auf die Energieeffizienz	27
8.5. Abschätzung der CO ₂ -Einsparung durch Einsatz der Wärmepumpen	31
9. Schlussfolgerungen	34
10. Handlungsempfehlungen	35
Quellenverzeichnis	38

1. Ausgangslage und Projektziele

Der Lebensstandard steigt in Deutschland und allen Industrienationen weltweit. Besonders rasant ist diese Entwicklung in den Ländern, die einen schnellen konjunkturellen Aufschwung verspüren wie beispielsweise China. Die Erhaltung dieses Lebensstandards geht meist mit erhöhtem Energieeinsatz einher. Diese Entwicklung ist unter Betrachtung des Gesichtspunktes, dass ein Großteil dieses Energieverbrauchs mit fossilen, also nicht erneuerbaren Quellen gedeckt wird, problematisch. Zudem werden auch noch hochwertige Rohstoffe wie Erdöl in diesem Zuge unwiderruflich vernichtet. Als ebenso bedenklich ist die Tatsache einzustufen, dass diese Energieerzeugung mit einem nennenswerten Ausstoß von CO₂ einhergeht. Eine zentrale Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimakälte für Gebäude, wofür in Deutschland etwa 35 % der Endenergie eingesetzt werden [BMWi2011]. Neben den Wohngebäuden liegt dabei in gewerblich-industriellen Anwendungen, etwa in Bürogebäuden, ein enormes Potenzial. Im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen beträgt beispielsweise der Anteil der Raumwärme, Warmwasser und Klimakälte sogar mehr als 57 % des Endenergieverbrauchs [BMWi2011].

In der Vergangenheit zeichneten sich Bürogebäude meist durch eine einfache, zweckorientierte Bauweise aus. Die Regelung des Raumklimas erfolgte im Allgemeinen nur durch Fensterlüftung, weitergehende Anforderungen an die Klimatisierung waren nicht vorhanden. Energieverbrauch beziehungsweise Energiekosten spielten eine eher unterordnete Rolle. Die Situation moderner Bürogebäude stellt sich dagegen grundlegend anders dar:

- deutlich höhere Ansprüche an Gestaltung bzw. Architektur (für repräsentative Zwecke),
- hoch-flexible Nutzungsmöglichkeit und höchste Flächeneffizienz,
- steigende äußere Lasten durch architektur-orientierte Gebäudehüllen (d.h. hohe Verglasungsanteile),
- steigende innere Lasten durch die ständige Zunahme von Bürotechnik,
- steigende Komfortansprüche (Behaglichkeit am Arbeitsplatz), auch durch den Gesetzgeber bedingt.

Um diesen Bedingungen beziehungsweise Ansprüchen gerecht werden zu können, ist eine immer umfangreichere technische Gebäudeausrüstung für Heizung, Lüftung, Klimatisierung und Beleuchtung erforderlich, die sich auch in immer größeren Energieverbrauchskennwerten widerspiegelt. So sind Primärenergiekennwerte von über 500 kWh/m²a nicht selten anzutreffen

[Voss2005]. Die Zielwerte moderner, energie-effizienter Bürogebäude liegen hingegen in einer Größenordnung von 100 kWh/m²a [Wagner2005]. Derartige Werte sind nur durch eine entsprechende Architektur und baukonstruktive Ausführung in Kombination mit einer Gebäudetechnik auf der Basis Erneuerbarer Energien zu erreichen [Zörner2005, Zörner2005a].

Vor diesem Hintergrund wurde das Büro- und Produktionsgebäude der Firma *alki-TECHNIK* (Abbildung 1) geplant, das innovative, regenerative Gebäudetechnik in einer ungewöhnlichen Kombination vereint: Energieerzeugung mittels Grundwasserwärmepumpen, Energieübertragung hauptsächlich über Betonkernaktivierung unterstützt durch Wandflächen und Fassadenheizung bzw. -kühlung mit Einzelraumsteuerung sowie Stromerzeugung durch Photovoltaik (PV) am sowie auf dem Gebäude.

Im vorliegenden Projekt wurde in erster Linie das Ziel verfolgt, die Heiz-/Kühl-Anlage des Gebäudes messtechnisch zu erfassen und zu bewerten. Ein besonderer Schwerpunkt wurde dabei auf die grundwasserspeiste Wärmepumpenanlage, das hydraulische Gesamtsystem sowie das Zusammenspiel verschiedener Heiz- und Kühltechnologien im realen



Abbildung 1: Westfassade des alki-TECHNIK-Gebäudes [Zörner2006]

Betrieb in größeren, gewerblich genutzten Gebäuden gelegt. Die gesammelten Daten und Informationen sollten dabei als Grundlage für weitere Planungen und Umsetzungen derartiger Anlagen dienen und damit eventuell bestehende Unsicherheiten beseitigen helfen. So sollte einerseits die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Heiz-/Kühl-Anlagentechnologie potenziellen Interessenten demonstriert werden, andererseits mit den beteiligten Projektpartnern weitere Erkenntnisse im Umgang mit dieser neuen Technologie im praktischen Einsatz gesammelt werden, die wiederum zur Fehlervermeidung bei zukünftigen, vergleichbaren Vorhaben beitragen.

Das Projekt wurde auf wissenschaftlicher Seite vom *KOMPETENZFELD ERNEUERBARE ENERGIEN* der *Hochschule Ingolstadt* durchgeführt. Die Projektbearbeitung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem planenden *Ingenieurbüro FREY-DONABAUER-WICH*, Gaimersheim, sowie der

ausführenden *Georg Bergsteiner GmbH*, Manching. Unterstützt wurde das gesamte Vorhaben von der *alki-TECHNIK GmbH*, Ingolstadt, als Eigentümer und Betreiber des Gebäudes unter anderem mit Zurverfügungstellung der Messtechnik im Gebäude. Das *Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit* unterstützte die wissenschaftliche Begleitung des Vorhabens.

2. Gebäude und Anlagentechnik

Das *alki-TECHNIK*-Büro- und Produktionsgebäude in Ingolstadt wurde Mitte 2005 bezogen. Das Erdgeschoss (EG) des Gebäudes wird für Fertigungszwecke und die darüber liegenden drei Stockwerke als Büroflächen genutzt. Das oberste Geschoss (OG) dient wiederum Wohnzwecken. Das Gebäude hat eine Bruttogrundrissfläche von 3.700 m² (vgl. [Häring2010]).

Die Wärmepumpen-Anlage besteht aus 2 Wärmepumpen mit einer elektrischen Anschlussleistung von 16 kW_{el} und 8 kW_{el}. In Summe ist damit eine Heizleistung von etwa 108 kW_{th} verfügbar. Die Wärmepumpen werden mit Grundwasser aus einem 7 m tiefen Grundwasserbrunnen gespeist und liefern die Wärme an die Betonkernaktivierung (Grundlast) des Gebäudes sowie an die Wandheizung (Spitzenlasten) in den Bürobereichen. Die Wärmepumpenanlage ist mit 3 Wärmespeichern (2 x 1.500 l, 1 x 500 l) verbunden. Kühlung erfolgt unter direkter Nutzung des Grundwassers (Abbildung 2; [Zörner2005]).

An zwei Bereichen der Gebäude-Fassade (Südseite, Produktionshalle auf der Westseite) sowie auf dem Dach sind Photovoltaik-Module mit einer Gesamtleistung von 32 kW_p angebracht.

Ein besonderes Element ist die in der Südwestseite des Gebäudes integrierte, von der Fa. *Josef Gartner GmbH & Co. KG* hergestellte Heiz- /Kühlfassade (sog. Gartner-Fassade), die die Verglasungsfunktion mit der Heiz- und Kühlfunktion durch ihre rohrleitungsartige Struktur verbindet (vgl. [Zörner2006]). Die Hohlprofile der Struktur und die Verglasung stellen die Heiz- /Kühlflächen dar, womit die Fassade zum aktiven Heiz-/Kühlelement wird. Der Wärmeträger (Wasser) durchströmt die vertikalen und horizontalen Träger. Der Wärmetransport erfolgt durch Strahlung, Konvektion (ca. 40 %) und insbesondere im Fall der Kühlung auch durch Absorption der Sonneneinstrahlung [Waldmann2001, Gartner2005]. Das System soll die Auswirkungen extremer Außentemperaturen in den unmittelbar betroffenen Bereichen nahe dem Fenster kompensieren, dazu soll die Heiz- /Kühlfassade auch einen positiven Effekt auf die Behaglichkeit der Nutzer und eine verbesserte Raumausnutzung ermöglichen. Insbesondere die Nutzung des Grundwassers soll einen wirtschaftlichen und umweltschonenden Betrieb im Sommer erlauben.

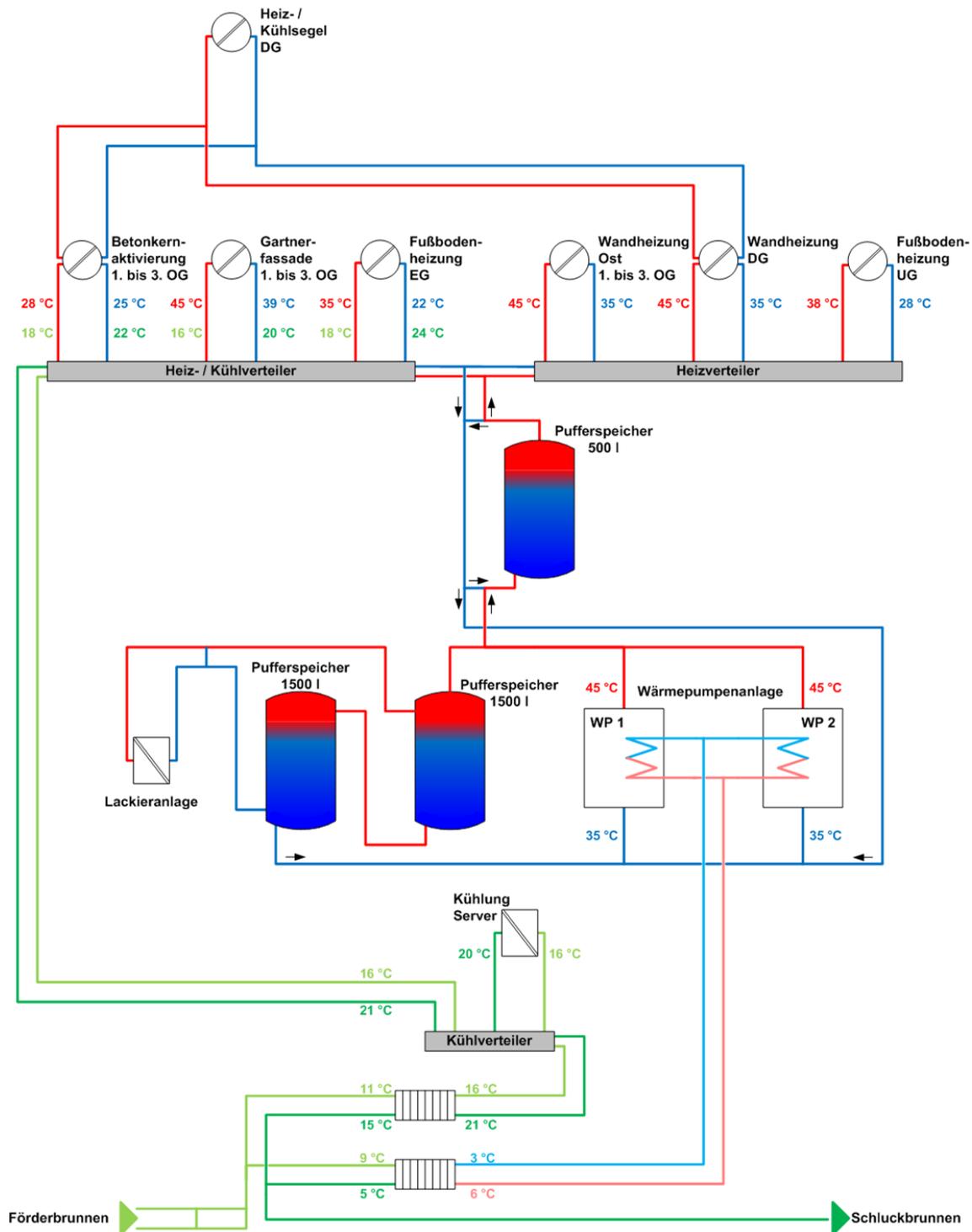


Abbildung 2: Heizungsschema mit Auslegungsbedingungen (nach [Bergsteiner2005])

3. Monitoring

Um die Leistungsfähigkeit der im untersuchten Gebäude installierten Heiz-/Kühl-Anlagentechnik zu beschreiben und weitere Erkenntnisse der verwendeten Technologien im praktischen Einsatz zu sammeln, wurden im Gebäude insgesamt 76 Messtellen verbaut. Zwischen September 2005 und Juni 2009 wurden im Rahmen des Monitorings alle im Gebäude abgegebenen und aufgenommenen Wärme- und Strommengen aufgezeichnet.

Zur Analyse der Leistungsfähigkeit der Wärmepumpenanlage wurden die dem Grundwasser entzogene Wärmemenge, die erzeugte Wärmemenge sowie die dafür aufgewendete elektrische Energie aufgezeichnet. Darüber hinaus wurden die Wärmeströme aller Heizsysteme untersucht. Weiter wurden, um den Einfluss der unterschiedlichen Heizsysteme auf die Behaglichkeit zu analysieren, an vier verschiedenen Positionen im 1. Obergeschoss des Gebäudes die Raumtemperatur sowie die Raumlufftfeuchte aufgezeichnet. Alle notwendigen Wetterdaten wurden von einer Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes geliefert. Eine umfassende Beschreibung der eingesetzten Messtechnik, Auswertemethodik und Messzeiträume wird in [Häring2010] gegeben.

4. Analyse der thermischen Behaglichkeit im Gebäude

Bei der Optimierung des Raumklimas an Arbeitsplätzen in Büroräumen spielt die thermische Behaglichkeit eine zentrale Rolle. Von den zahlreichen Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit werden sechs Einflüsse als primär und dominierend eingestuft. Neben Kleidung und Tätigkeitsgrad sind dies die physikalisch definierten, messbaren Faktoren Lufttemperatur, Luftfeuchte, Temperatur der Umschließungsflächen sowie die Luftgeschwindigkeit [Voss2005].

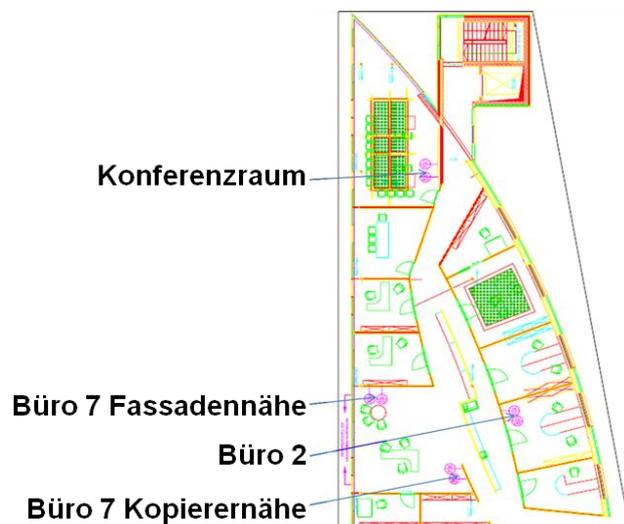


Abbildung 3: Messstellenplan für Raumtemperatur und -feuchte im 1.OG [Bergsteiner2005]

Um im untersuchten Gebäude die Behaglichkeit in den Räumlichkeiten bewerten zu können, wurden die Raumluffttemperatur und -feuchte an vier Messstellen (angeordnet gemäß Abbildung 3) sowie die Temperatur des Betonkerns im 1.OG erfasst.

Im Folgenden wird die Behaglichkeit in den vermessenen Räumen jeweils für den Heiz- und Kühlbetrieb dargestellt. Exemplarisch werden hierfür einige Wintermonate und ein Sommermonat betrachtet. Der Vergleich zwischen den beiden Messstellen in Büro 7 veranschaulicht den Einfluss der Gartner-Fassade auf die Behaglichkeit in Fassadennähe. Bei der Darstellung der Behaglichkeit in sogenannten Behaglichkeitsfeldern sind die Feuchtwerte als Stundenmittelwerte über den zugehörigen Temperaturmittelwerten aufgetragen (Abszisse: Raumtemperatur in °C, Ordinate: relative Luftfeuchtigkeit in %). Jeweils gekennzeichnet ist in den Diagrammen der Bereich der thermischen Behaglichkeit in Abhängigkeit der beiden gemessenen physikalischen Werte sowie die jeweiligen als unbehaglich empfundenen Bereiche.

4.1. Behaglichkeit im Heizbetrieb

Um die klimatischen Raumbedingungen und die Behaglichkeit in den vermessenen Räumen während des Heizbetriebes darzustellen, werden im Folgenden exemplarisch die Monate Februar 2007, Januar 2008 und Januar 2009 betrachtet. Wie aus Tabelle 1 zu entnehmen, ist der Januar 2009 mit einer Durchschnittstemperatur von -3,3 °C unterdurchschnittlich kalt, wohingegen die beiden anderen betrachteten Wintermonate als überdurchschnittlich warm anzusehen sind.

Tabelle 1: Klimatische Außenbedingungen in den betrachteten Wintermonaten

	Außentemperatur [°C]			Außenluftfeuchte [%]		
	Minimum	Maximum	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Durchschnitt
Jan. 2009	-15,4	7,6	-3,3	50,5	100	88,4
Jan. 2008	-4,9	12,8	2,8	31,7	100	84,7
Feb. 2007	-2,2	14,0	5,1	49,9	100	84,3

Die Auswertung der Raumtemperatur- und Feuchtwerte in den untersuchten Räumen (vgl. Tabelle 2) ergibt allgemein sehr zufriedenstellende Behaglichkeiten. An der Messstelle „Büro 2“ können in jedem betrachteten Monat 100 % der gemessenen Feuchtwerte als „behaglich“ bzw. „noch behaglich“ bezeichnet werden. Für die Messstelle „Büro 7 Fassadennähe“ ergibt sich ebenfalls ein hoher Grad an Behaglichkeit. Wie in Abbildung 4 dargestellt liegen hier zwischen 96,4 % und 98,7 % der Messwerte in den Feldern „behaglich“ bzw. „noch behaglich“. Aufgrund der Nähe zur Fassade werden bei hoher Sonneneinstrahlung kurzzeitig hohe Temperaturen bis über 30 °C erreicht. An Messstelle „Büro 7 Kopiererernähe“ ergeben die Auswertungen ebenfalls eine hohe Behaglichkeit. Nahezu alle Messwerte liegen in den Bereichen „behaglich“ bzw. „noch behaglich“. Auch im „Konferenzraum“ werden hohe Werte für die Behaglichkeit erreicht. Hier liegen 91,6...98,2 % der

Messwerte im Bereich „behaglich“ bzw. „noch behaglich“. Die dort auftretenden, auffällig hohen Temperaturschwankungen lassen sich auf dessen geringe Nutzung und die anteilmäßig große Fassadenfläche zurückführen.

Tabelle 2: Behaglichkeit im Heizbetrieb

	Behaglichkeitsfeld [%]				Temperatur Betonkern [°C]	Raumtemperatur [°C]
	behaglich	noch behaglich	unbehaglich			
			warm	kalt		
Büro 2						
Jan. 2009	99,7	0,3	0	0	21,8	22,4
Jan. 2008	91,8	8,2	0	0	20,6	22,2
Feb. 2007	99,8	0,2	0	0	22,0	23,7
Büro 7 Fassadennähe						
Jan. 2009	93,8	3,0	3,2	0	23,2	23,0
Jan. 2008	92,4	7,1	0,5	0,8	21,6	22,4
Feb. 2007	91,6	4,8	3,6	0	22,89	23,8
Büro 7 Kopierernähe						
Jan. 2009	98,9	1,1	0	0	23,4	22,7
Jan. 2008	91,4	8,6	0	0	21,7	22,1
Feb. 2007	98,3	0,7	1,0	0	22,8	23,5
Konferenzraum						
Jan. 2009	94,1	4,1	1,6	0,2	23,1	22,4
Jan. 2008	87,2	9,7	0,8	2,3	21,4	22,0
Feb. 2007	89,4	2,2	8,4	0	23,0	23,6

Zusammenfassend stellen die im 1.OG eingesetzten Heizsysteme im Heizbetrieb einen hohen Grad an Behaglichkeit, selbst bei sehr kalten Außenbedingungen (z.B. Januar 2009), sicher. Die Auswertung der Behaglichkeit im Heizbetrieb zeigt aber auch, dass die Raumtemperatur im Allgemeinen, ohne die Behaglichkeit deutlich zu verschlechtern, durchaus noch um etwa 1...3 °C abgesenkt werden kann. Dies führt wiederum, falls eine konsequente Heizregelstrategie im Zusammenspiel der einzelnen Wärmeverteilsysteme realisiert werden kann, zu einem optimierten Wärmepumpenbetrieb.

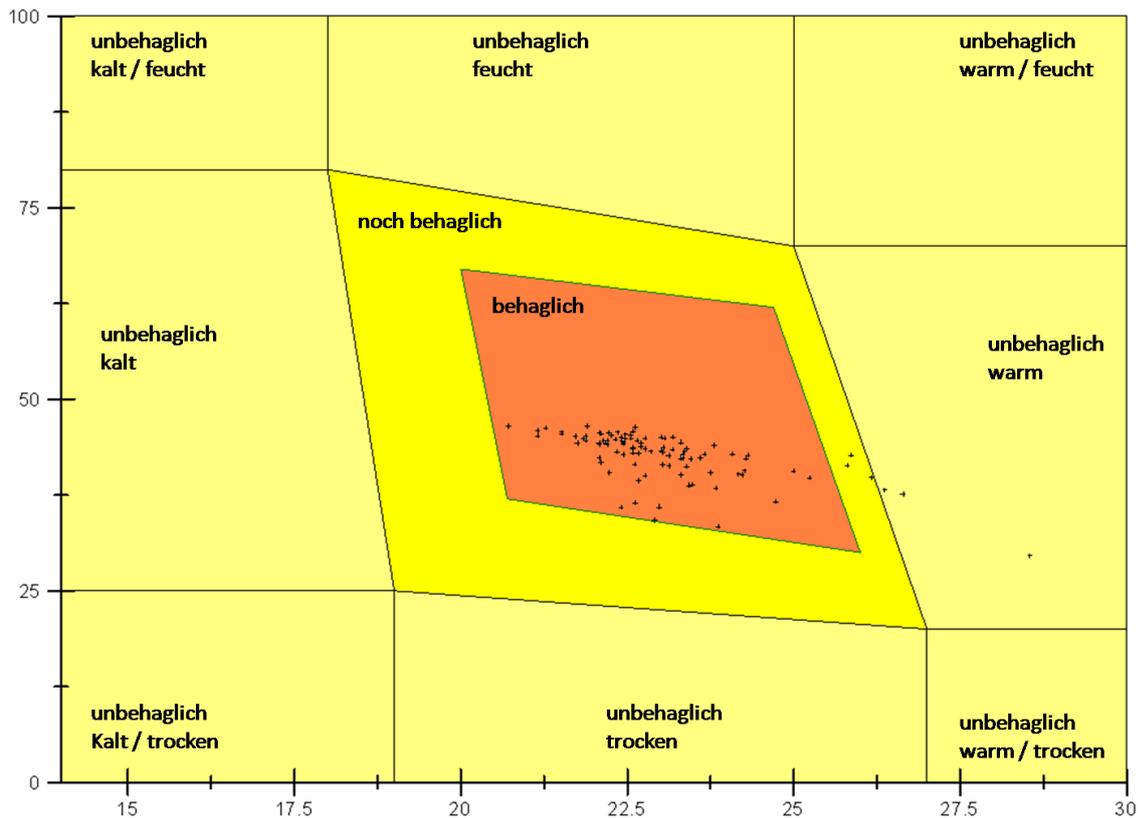


Abbildung 4: Behaglichkeitsfeld Büro 7 Fassadennähe (Januar 2009)

4.2. Behaglichkeit im Kühlbetrieb

Analog dem Heizbetrieb werden im Folgenden die klimatischen Raumbedingungen und die Behaglichkeit in den vermessenen Räumen während des Kühlbetriebes dargestellt. Dazu wird auf die gut vergleichbaren Monate Mai 2009, Juni 2007 und Juni 2006 zurückgegriffen. Die klimatischen Außenbedingungen während dieser Zeiträume sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Monate Juni 2007 und Juni 2006 sind typische Sommermonate, während der Monat Mai 2009 als warmer Übergangsmontat anzusehen ist.

Tabelle 3: Klimatische Außenbedingungen während der betrachteten Sommermonate

	Außentemperatur [°C]			Außenluftfeuchtigkeit [%]		
	Minimum	Maximum	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Durchschnitt
Mai 2009	1,8	31,6	15,5	21,9	99,9	71,4
Juni 2007	10,9	28,3	16,5	31,0	99,2	76,4
Juni 2006	4,0	33,0	18,6	15,1	100	66,2

Die Auswertung der Behaglichkeit in den untersuchten Räumen ergibt, beispielsweise in den Monaten Juni 2006 und Juni 2007, eine allgemein zufriedenstellende Behaglichkeit (Tabelle 4). An der Westseite des Gebäudes ist aufgrund starker Sonneneinstrahlung in den Nachmittagsstunden eine Tendenz zu „unbehaglich warm“ festzustellen.

Tabelle 4: Behaglichkeit im Kühlbetrieb

	Behaglichkeitsfeld [%]				Temperatur Betonkern [°C]	Raumtemperatur [°C]
	behaglich	noch behaglich	unbehaglich			
			warm	kalt		
Büro 2						
Mai 2009	66,1	16,4	17,5	0	22,01	25,1
Juni 2007	53,4	46,6	0	0	19,2	22,9
Juni 2006	69,3	30,1	0,6	0	19,3	23,3
Büro 7 Fassadennähe						
Mai 2009	45,7	15,7	38,6	0	23,6	26,1
Juni 2007	60,5	12,1	27,4	0	20,7	23,8
Juni 2006	53,3	24,6	21,8	0,1	21,4	24,7
Büro 7 Kopierernähe						
Mai 2009	57,8	13,4	28,8	0	22,5	25,4
Juni 2007	59,8	29,8	10,4	0	19,5	23,1
Juni 2006	58,7	33,1	8,2	0	20,0	24,1
Konferenzraum						
Mai 2009	52,6	11,3	36,1	0	23,2	25,6
Juni 2007	51,4	21,3	27,2	0,1	21,0	23,8
Juni 2006	58,1	28,3	13,6	0	21,7	25,5

Außergewöhnlich unbehagliche Raumlufzustände sind im Mai 2009 zu konstatieren. Auffällig dabei ist, dass sogar im ansonsten als behaglich zu bezeichnenden Referenzraum auf der Ostseite des Gebäudes 17,5 % der Messwerte als „unbehaglich warm“ bezeichnet werden müssen. Dies ist darauf zurück zu führen, dass bis zum 25. Mai 2009, trotz Außentemperaturbedingungen mit zeitweise über 30 °C kein regulärer Kühlbetrieb erfolgte.

In „Büro 2“ befinden sich in den exemplarisch betrachteten Monaten die Messwerte zu 99,4 bzw. 100 % in den Bereichen „behaglich“ bzw. „noch behaglich“. Die Auswertung der Messstelle „Büro 7 Fassadennähe“ (Abbildung 5) ergibt, dass dort ca. 20...30 % der Messwerte als „unbehaglich warm“ anzusehen sind. Dagegen werden an der Messstelle „Büro 7 Kopierernähe“ nur 10,4 % bzw. 8,2 % der Werte als „unbehaglich warm“ eingestuft und somit verhältnismäßig hohe Behaglichkeit erreicht. An der Messstelle „Konferenzraum“ müssen 27,2 % bzw. 13,6 % der Messwerte als „unbehaglich warm“ eingestuft werden.

Die zur Kühlung eingesetzten Systeme stellen während des Kühlbetriebes auf der Ostseite des Gebäudes eine zufriedenstellende Behaglichkeit sicher. Auf der Westseite, vor allem in Fassadennähe, werden offenbar aufgrund der Sonneneinstrahlung durch die Fassade oft unbehaglich hohe Temperaturen

erreicht. Hier kann eine verbesserte Abstimmung der Gebäudeklimatisierung mit der Jalousiesteuerung die Behaglichkeit in den Räumen noch erheblich verbessern.

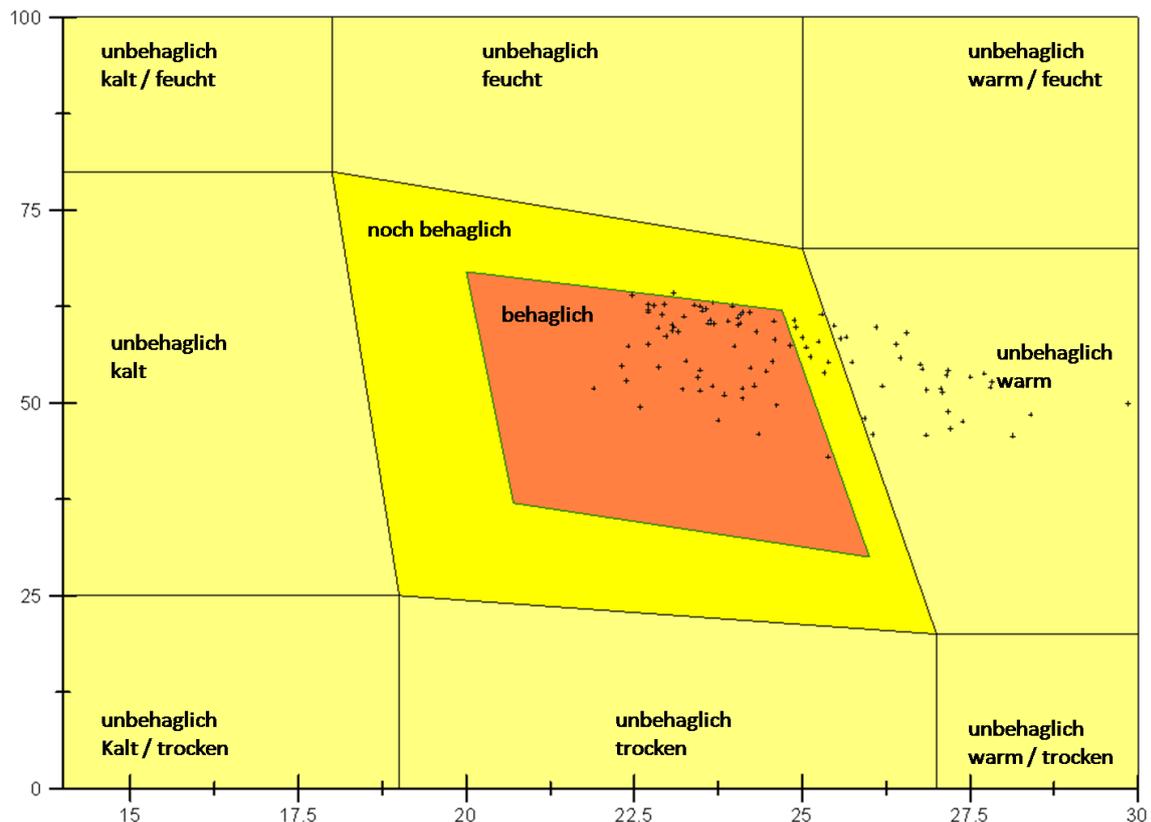


Abbildung 5: Behaglichkeitsfeld Büro 7 Fassadennähe (Juni 2007)

Im Vergleich zum Heizbetrieb fällt beim Kühlbetrieb eine allgemein höhere Luftfeuchtigkeit auf. Dies ist durch im Sommer allgemein höhere Außenluftfeuchtigkeit zu erklären sowie durch die Tatsache, dass es sich beim untersuchten System nicht um eine luftgeführte Klimatisierungseinrichtung handelt, d.h. latente Wärmelasten können konzeptbedingt nicht aus dem Raum abgeführt und die Luftfeuchtigkeit im Raum kann nicht eingestellt werden. Weiter ist festzustellen, dass die Raumlufftfeuchte im Sommer an der Ostseite und im Winter an der Westseite des Gebäudes am höchsten ist. Durch hohe oder niedrige Luftfeuchtigkeit treten jedoch weder beim Kühl- noch beim Heizbetrieb nennenswerte Beeinträchtigungen in der Behaglichkeit auf.

5. Analyse der Wärmebilanz des Gebäudes

Die Wärmebilanz dient der Ermittlung der den einzelnen Verbrauchern zur Verfügung gestellten Wärme- und Kältemengen. Durch die Aufschlüsselung des Wärme- bzw. Kälteverbrauchs des Gebäudes nach Heiz- bzw. Kühlsystemen wird ersichtlich in welchen Systemen Wärme- bzw. Kältemengen zu- oder abgeführt werden. Im Folgenden werden die Wärmebilanzen für Vergleichswo-

chen (siehe Tabelle 5) für den typischen Heiz- bzw. Kühlfall für verschiedene Jahre dargestellt.

Tabelle 5: Ausgewählte Vergleichswochen

	Vergleichswochen		Durchschnitts-	
			-außentemperatur [°C]	-globalstrahlung Gartner-Fassade [W/m²]
Heizbetrieb	2006	KW 10	-0,27	91
	2008	KW 7	-0,42	93
	2009	KW 7	-0,39	64
Kühlbetrieb	2006	KW 33	18,02	154
	2007	KW 34	19,06	137
	2009	KW 22	18,30	166

5.1. Wärmebilanz im Heizbetrieb

Während des Heizbetriebes wird die bereitgestellte Wärme im gesamten Gebäude wie in Abbildung 6 dargestellt verteilt. Neben den Anteilen der einzelnen Verbraucher am Gesamtverbrauch in [%] ist in den Diagrammen deren abgegebene Wärmemenge in [kWh] angegeben.

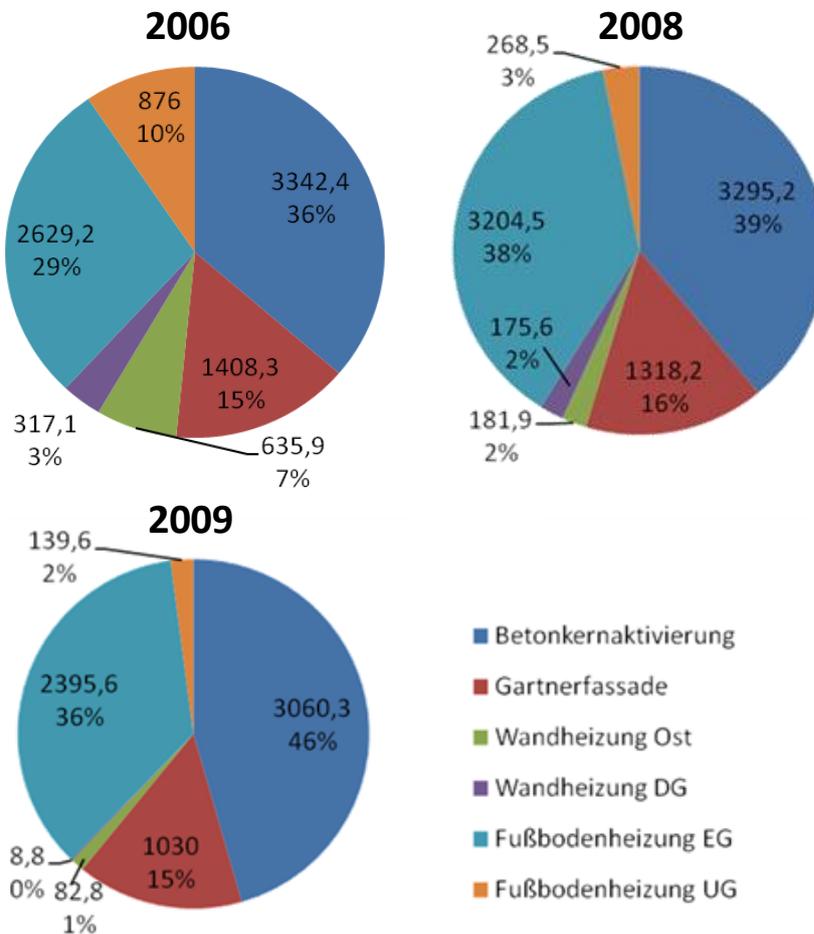


Abbildung 6: Wärmebilanz im Heizbetrieb (in [kWh]; gesamtes Gebäude)

Wie zu erkennen ist, wird von der Betonkernaktivierung und der Fußbodenheizung im EG am meisten Wärme an das Gebäude abgegeben. Während des Heizbetriebes werden in den Vergleichswochen Wärmemengen zwischen 200...280 kWh von der Kühlung des Serverraumes abgeführt.

Es bleibt festzuhalten, dass in der Vergleichswoche 2009 ein deutlich stärkerer Anteil der Heizlast von der Betonkernaktivierung übernommen wird. Dies ist als positiv zu bewerten, da die Betonkernaktivierung hinsichtlich ihrer Vorlauftemperatur für die Wärmepumpe aus Sicht eines energieeffizienten Betriebs vorteilhaft ist. Offensichtlich konnten hier durch Veränderungen in der Gebäuderegulierungsstrategie Verbesserungen hinsichtlich des Gesamtsystems herbeigeführt werden.

5.2. Wärmebilanz im Kühlbetrieb

Im Kühlbetrieb ist die Betonkernaktivierung das System, das den größten Teil der Wärme aus dem Gebäude abführt (vgl. Abbildung 7). Zusätzlich wird die Gartner-Fassade intensiv als Kühleinrichtung genutzt.

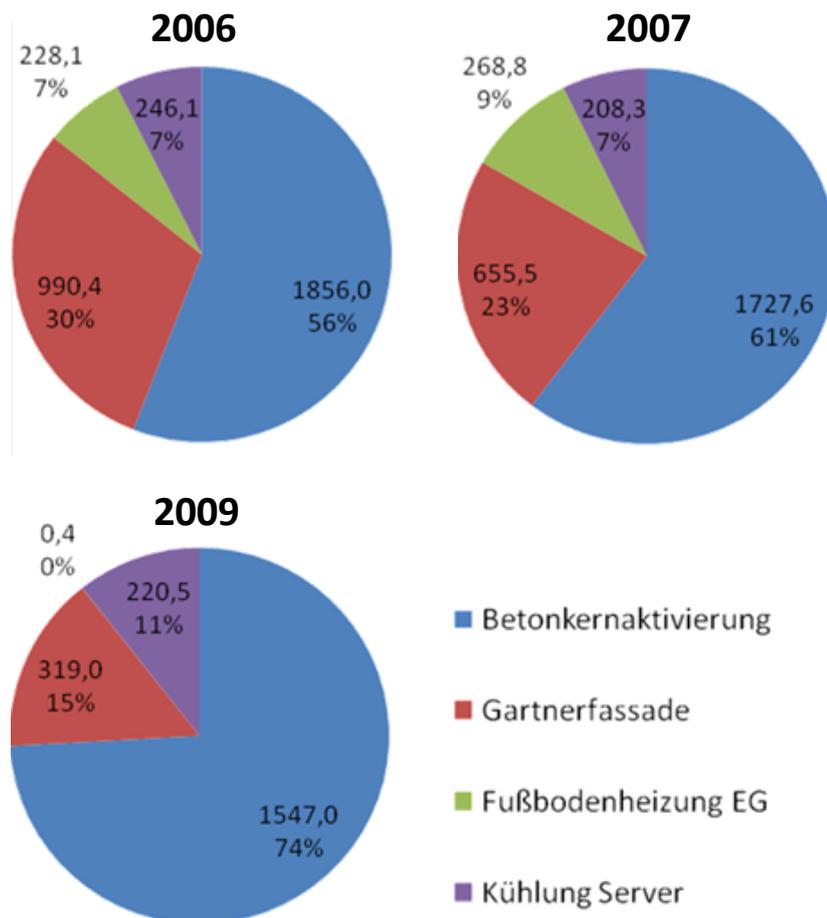


Abbildung 7: Wärmebilanz im Kühlbetrieb (in [kWh]; gesamtes Gebäude)

Aus der Gegenüberstellung der Vergleichswochen ist ersichtlich, dass zwischen der von der Gartner-Fassade abgeführten Wärmemenge und der auf die Gartner-Fassade einwirkenden Globalstrahlung (vgl. Tabelle 5) kein Zusammenhang erkennbar ist. Auffällig ist hierbei wiederum, dass im Jahr 2009 der Anteil der Betonkernaktivierung im Vergleich zur Gartner-Fassade deutlich ansteigt.

6. Analyse der Endenergiebilanz des Gebäudes

Im Folgenden werden für ausgewählte Monate die Energieverbräuche der beiden Wärmepumpen (E_{WP1} und E_{WP2}) und der für die Verteilung der Wärmeenergie notwendigen Pumpen E_P den Energiegewinnen durch die Photovoltaikanlage an der Westseite des Gebäudes E_{PV_West} gegenübergestellt. In Abbildung 8 sind die von den beiden Wärmepumpen und den zusätzlichen Pumpen aufgenommene elektrische Energie im Vergleich zur Energieerzeugung der Photovoltaikanlagen dargestellt. Die Energieerzeugung ist dabei als negativer Verbrauch aufgetragen.

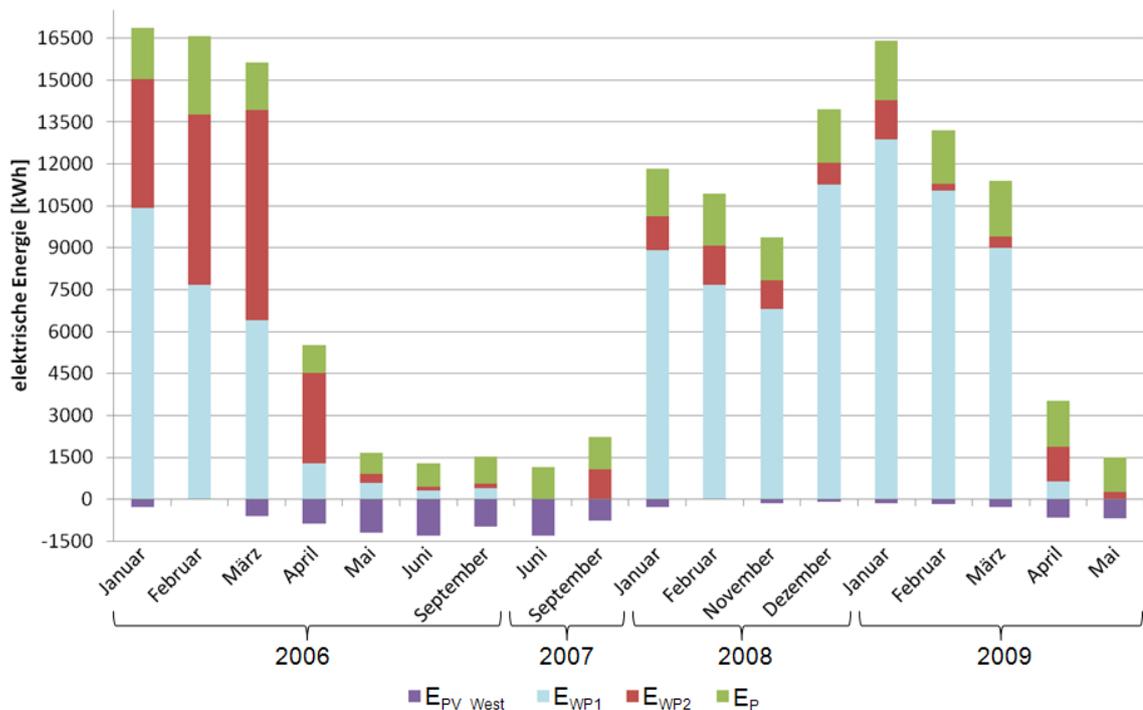


Abbildung 8: Endenergiebilanz des Gebäudes

In der Auswertung der Endenergiebilanz sind Änderungen an der Gebäuderegulierung u.a. durch den Gebäudebetreiber gut erkennbar, die ausführlich in Abschnitt 8.4 beschrieben werden. Anfang 2006 wird von beiden Wärmepumpen etwa die gleiche Menge Strom aufgenommen, was darauf hindeutet, dass die vorgesehene Kaskadenschaltung der beiden Aggregate mit Vorrang für Wärmepumpe 2 als das Gerät kleinerer Leistung in diesem Zeitraum nicht

funktioniert. Durch die Anpassung der Heizkurven im Mai 2007 wird die Hauptlast dann vorübergehend, wie geplant, von der Wärmepumpe 2 (WP2, September 2007) getragen, bis im November 2007 die Heizkurve seitens des Betreibers wieder verändert wurde. Folglich wird in 2008 und 2009 die Hauptlast noch deutlicher von Wärmepumpe 1 (WP1) getragen (vgl. Abschnitt 8.4).

Lediglich in den Monaten Juni 2006 und Juni 2007 wird von der Photovoltaikanlage mehr Energie erzeugt als das Gebäude benötigt. Von einer Erzeugung elektrischer Energie durch das Gebäude in ausreichendem Umfang für den Betrieb der Wärme- und Heizungspumpen sowie einer damit ausgeglichenen Energiebilanz kann daher bei weitem nicht ausgegangen werden. Der im Vorfeld, während der Konzeptionierungsphase von Architekt und Energieberater formulierte Leitgedanke bei der Entwicklung des Energiekonzepts, nachdem die ‚Erde unter dem Gebäude Heiz- und Kühlenergie liefert und die Sonne mittels Photovoltaik die erforderliche Antriebsenergie für die Wärmepumpen generiert‘ (vgl. u.a. [Bachschi2005; Handel2006; Prop2008]) und das Gebäude somit rein rechnerisch über den Jahresverlauf ohne fossile Energieträger versorgt wird, kann damit leider nicht bestätigt werden.

Neben der Tatsache, dass das Stromnetz zwar gedanklich gegebenenfalls als Speicher genutzt werden kann, dies aber rein physikalisch nicht möglich ist, differieren die Größenordnungen von Energieverbrauch und Energieerzeugung beachtlich, sodass die ursprüngliche Zielstellung oder alternativ die einzelnen Systemdimensionierungen hinterfragt werden müssen. Eine weitere allgemeine, organisatorische Problemstellung ergibt sich sicherlich aus der Frage, inwieweit auf Basis des Erneuerbare-Energien-Gesetzes ‚verkaufte‘, aus erneuerbaren Quellen erzeugte elektrische Energie zur weiteren, theoretischen Verrechnung von Stromverbräuchen im Gebäude nochmals herangezogen werden kann.

Das umgesetzte Gebäudetechnikkonzept kann somit zum Zeitpunkt des Projektabschlusses zwar als innovativ, aber nur eingeschränkt als regenerativ bezeichnet werden.

7. Analyse der wasserdurchströmten Heiz- und Kühlfassade

Die Aufstellung der Wärmebilanz im 1.OG und der Bezug auf die jeweilige beheizte bzw. beheizte bzw. beheizte Bruttogeschossfläche für den Heizfall zeigt, dass die Wandheizung an der Ostseite des Gebäudes in der Lage ist mehr Wärme im Verhältnis zur Bezugsfläche einzutragen als die wasserdurchströmte Gartner-Fassade. Im Kühlfall ist die Gartner-Fassade allerdings sehr wohl in der Lage,

einen nennenswerten Beitrag zur Kühlung des Gebäudes zu leisten [Häring2010].

7.1. Durchströmung und Regelung

Über die Positionen der Temperatursensoren, die in Abbildung 9 in der Übersicht dargestellt sind, und den gemessenen Temperaturwerten ist ein Rückschluss auf das Durchflussverhalten durch die Fassadenprofile möglich.

Die Auswertung in Abbildung 10 zeigt für den Heizfall beispielhaft den Verlauf der Temperaturen, die mit den an der Gartner-Fassade angebrachten

Messaufnehmern ermittelt wurden.

Desweiteren sind in

diesem Diagramm zum besseren Verständnis die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Stranges der Gartner-Fassade zum 1.OG, die Raumtemperatur an der Messstelle „Büro 7 Fassadennähe“, die auf die Gartner-Fassade wirkende Globalstrahlung, die Wärmeleistung des Stranges der Gartner-Fassade zum 1.OG sowie die Außentemperatur dargestellt.

Wird die Gartner-Fassade durchströmt und gibt dabei Wärme ab, wird die höchste Temperatur, wie erwartet, im oberen horizontalen Strang (Oben-Mitte) der Heizfassade gemessen. Die Temperaturen in den unteren vertikalen Strängen (Unten-Links, Unten-Rechts) sind höher als die Temperatur im darüber liegenden horizontalen Strang (Unten-Mitte). Aus den Messwerten ist ersichtlich, dass die Gartner-Fassade von links oben nach rechts unten durchströmt wird.

Auffällig ist an den dargestellten Messdaten, dass am 15.02. die Gartner-Fassade erst bei verhältnismäßig hoher Raumtemperatur von annähernd 30 °C abschaltet. Hier erfolgte offensichtlich ein Nutzereingriff über die Einzelraumregelung. Des Weiteren ist die Vorlauftemperatur mit 32 °C bzw. ab dem 16.02. mit 34 °C bei -4 °C bzw. später 0 °C Außentemperatur als hoch einzustufen. Nicht nachvollziehbar ist die Erhöhung der Vorlauftemperatur mit steigender Außentemperatur, was dem Verlauf der Heizkurve typischerweise widerspricht.

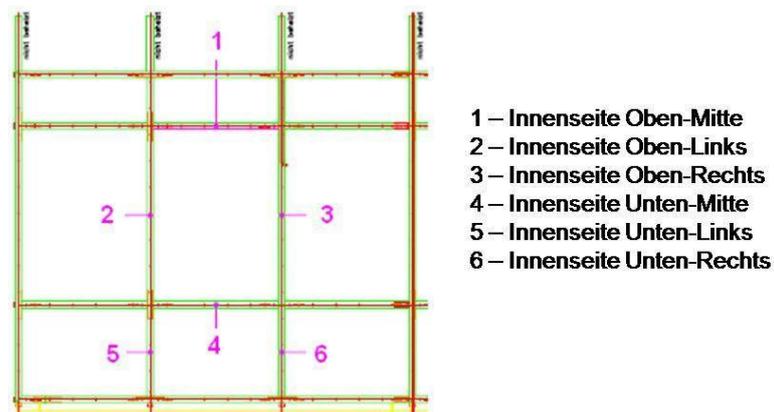


Abbildung 9: Positionen der Messstellen an der Gartnerfassade (nach [Bergsteiner2005])

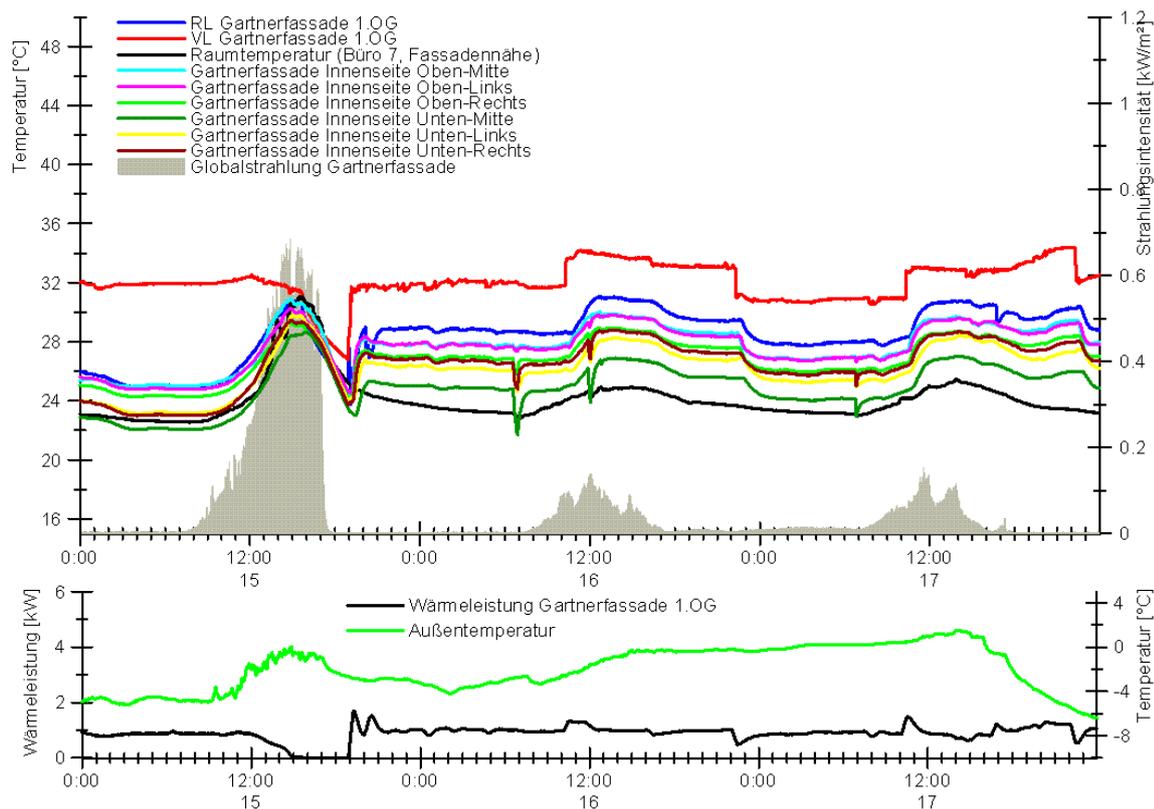


Abbildung 10: Temperaturen an der Heiz-/Kühl-Fassade (Februar 2009)

Die Fassade wird überdies durchgehend, auch nachts, betrieben. Dies ist konträr zur eigentlichen Auslegung der aktiven Fassade als schnellregelndes Zusatzsystem zur trägen Betonkernaktivierung. Das führt zwangsläufig dazu, dass die Wärmepumpen auch dauerhaft ein Temperaturniveau von mindestens 32...34 °C für eine verhältnismäßig geringe Leistung von $<2 \text{ kW}_{\text{th}}$ zur Verfügung stellen müssen. Die Vorlauftemperatur der Betonkernaktivierung müsste demgegenüber systembedingt aber deutlich niedriger sein, sodass von den Wärmepumpen zunächst hohe Heiztemperaturen bei geringer Effizienz erzeugt werden müssen, die anschließend für die Betonkernaktivierung wieder auf ein niedriges Temperaturniveau gemischt werden. Damit bestätigt sich auch hier die fehlende Abstimmung der einzelnen Heizsysteme zueinander (vgl. Abschnitt 8.3 und 8.4) und eine noch ausstehende Umsetzung einer Gesamtregelungsstrategie für das Gebäude.

7.2. Einfluss auf die Behaglichkeit

Wie bei der Auswertung der Behaglichkeit in Abschnitt 4 dargestellt, sind die Raumzustände im Büro 7 sowohl in Fassadennähe als auch in einiger Entfernung zur Fassade (Kopierernähe) während des Heizbetriebs als sehr angenehm zu bezeichnen. Ein Hang zu kühleren Raumlufttemperaturen in Fassadennähe ist nicht festzustellen. Damit kann davon ausgegangen werden,

dass die Gartner-Fassade im Heizfall zu einem gleichmäßigen Raumluftklima beitragen kann, zumindest bezogen auf die Raumlufttemperatur.

Die Auswertung der Behaglichkeit während des Kühlbetriebs zeigt jedoch, dass die Gartner-Fassade den Wärmeeintrag durch die Sonneneinstrahlung nicht kompensieren kann. Inwiefern die Gartner-Fassade das Raumklima im Kühlfall positiv beeinflusst, kann nur ein Vergleich mit einer undurchströmten Fassade bei gleichen Bedingungen zeigen. Jedoch sorgt die Gartner-Fassade augenscheinlich, im Zusammenspiel mit der Betonkernaktivierung, dafür, dass die Differenz der Raumtemperatur in Fassadennähe und der Raumtemperatur in Kopierernähe, bei steigender Außentemperatur, nicht zunimmt (Abbildung 11).

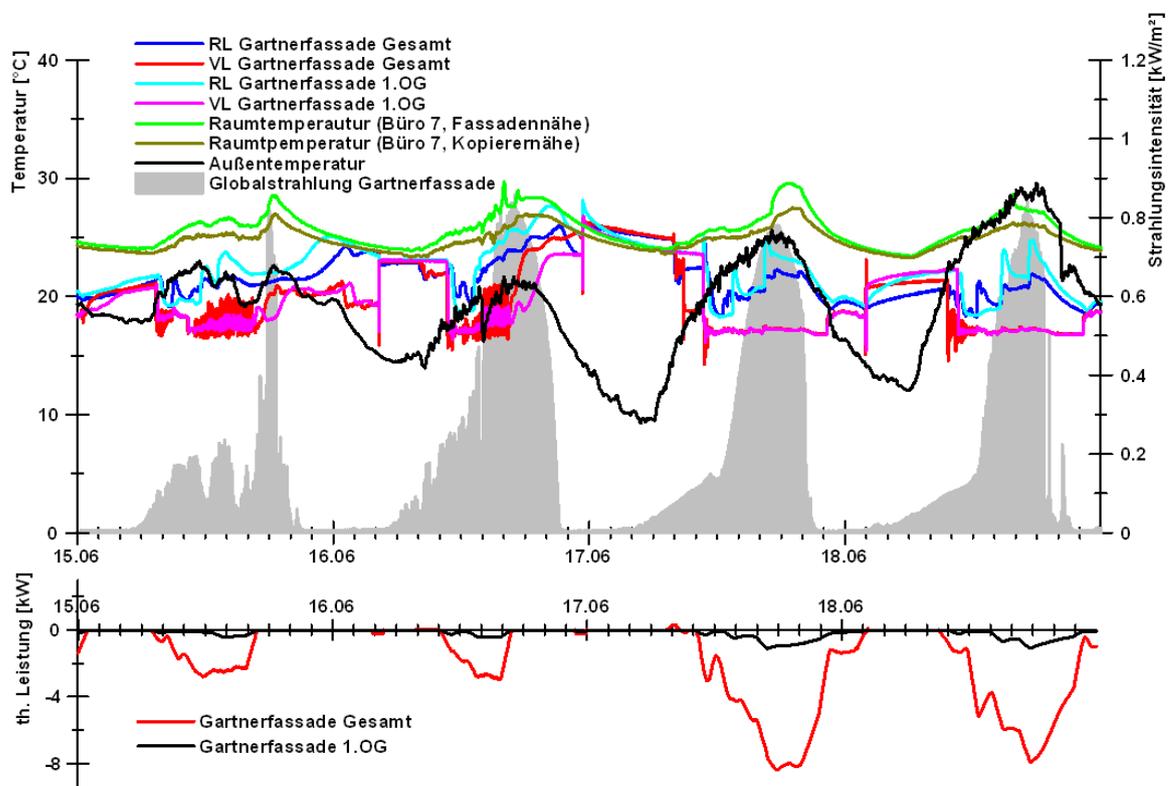


Abbildung 11: Gartner-Fassade im Kühlbetrieb (Juni 2009)

8. Analyse der Wärmepumpenanlage

Die zur Beheizung des Gebäudes benötigte Wärmeenergie wird von der in Abschnitt 2 beschriebenen Wärmepumpenanlage bereitgestellt. Um die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpenanlage zu bewerten, werden die Arbeitszahlen der Wärmepumpenanlage, die Wärmequelle, die Regelung sowie durchgeführte Optimierungsmaßnahmen analysiert.

8.1. Arbeitszahlen

Die Arbeitszahl der Wärmepumpenanlage (Verhältnis der vom Kondensator der Wärmepumpen abgegebenen Heizleistung zur aufgenommenen elektrischen Leistung der Wärmepumpen) ist abhängig von der Temperatur der Wärmequelle und der Vorlauftemperatur des Senkenkreises. Während die Temperatur der Wärmequelle nicht oder nur schwierig zu beeinflussen ist, hängt die Vorlauftemperatur des Senkenkreises in erster Linie von seiner Rücklauftemperatur ab, die außentemperaturabhängig über die Wärmepumpen-Heizkurven eingestellt wird.

Für die Wärmepumpenanlage des *alki-TECHNIK*-Gebäudes ergeben sich die in Abbildung 12 dargestellten, monatlichen Arbeitszahlen. Die Arbeitszahlen beziehen sich dabei auf die gesamte Wärmepumpenanlage. Die Energieverbräuche der Pumpen auf der Quellenseite der Wärmepumpen sind in dieser Arbeit nicht mit in der Berechnung der Arbeitszahlen berücksichtigt. Um den Zusammenhang zwischen Arbeitszahl und der Temperatur der Wärmequelle aufzuzeigen, wird zusätzlich die monatliche, durchschnittliche Grundwassertemperatur dargestellt. Es werden in diesem Zusammenhang ausschließlich tatsächliche Heizmonate ausgewertet.

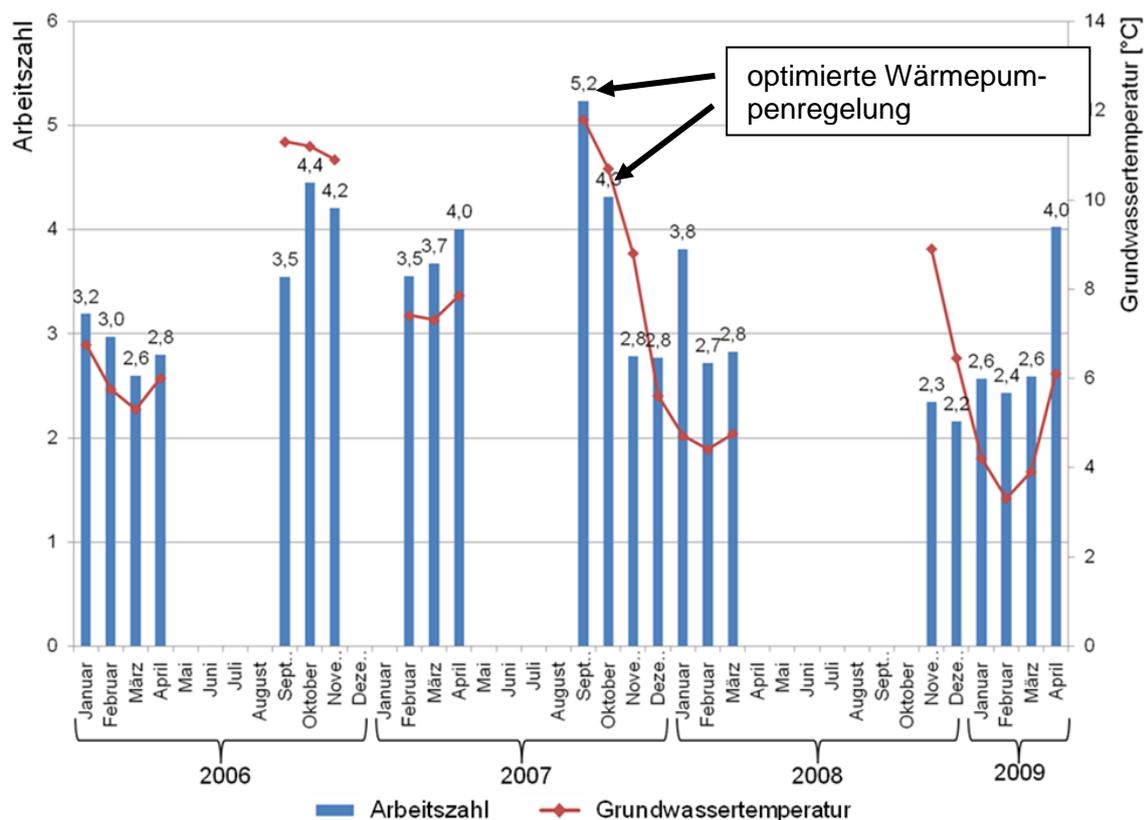


Abbildung 12: Arbeitszahlen der Wärmepumpenanlage in monatlicher Auflösung

Über den Aufzeichnungszeitraum ergeben sich monatliche Arbeitszahlen zwischen 2,2 und 5,2. Nach [FIZ2001] kann die Jahresarbeitszahl von Grundwasser-Wärmepumpen bei bis zu 4,5 liegen. Aus den dargestellten Werten ist bereits erkennbar, dass diese Arbeitszahlen mit der Wärmepumpenanlage des untersuchten Gebäudes offensichtlich, selbst unter Berücksichtigung, dass hier die gesamte Anlage mit Peripherie betrachtet wird, auch annähernd nicht erreicht werden können. Die Ursachen können in folgenden Punkten vermutet werden:

- Die Grundwassertemperatur als entscheidender Parameter der Wärmequelle liegt mit bis zu 3 °C deutlich unter dem erwarteten Auslegungsniveau von minimal 9 °C.
- Die Regelung der beiden Wärmepumpen mit je zwei Verdichterstufen in kaskadenförmiger Zuschaltung ist energetisch nicht optimiert.
- Die Vorlauftemperaturen für einzelne Heizkreise sind mit bis zu 50 °C unverhältnismäßig hoch, und führen zu Wärmepumpenvorlauftemperaturen von bis zu 60 °C.

Diese Aspekte und entsprechende Optimierungsansätze werden im Folgenden näher untersucht.

8.2. Wärmequellenanlage und Grundwassertemperatur

Einen entscheidenden Einfluss auf die Effizienz einer Wärmepumpenanlage hat das Temperaturniveau ihrer Wärmequelle. Die im *alki-TECHNIK*-Gebäude installierten Wärmepumpen nutzen die Wärme des Grundwassers. Um die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpenanlage zu analysieren ist daher eine Betrachtung der Wärmebereitstellung durch den Grundwasserbrunnen erforderlich. Die Brunnentemperaturen werden, mittels Anlegtemperaturfühler, die im Heizungsraum kurz vor dem Wärmetauscher „Brunnen - Quellenseite Wärmepumpen“ angebracht sind, aufgezeichnet. In Abbildung 13 ist der Verlauf der Fördertemperatur des Grundwassers von Januar 2006 bis einschließlich Juni 2009 dargestellt.

Die höchste aufgezeichnete Grundwassertemperatur (Eintritt aus Entnahmebrunnen) beträgt während des Kühlbetriebs 12,5 °C und wurde Ende August 2007 gemessen. Die niedrigste Grundwassertemperatur während des Heizbetriebs liegt Ende Februar 2009 bei ca. 3 °C. Auch in den Wintern 2006 und 2008 sind mit 5 °C bzw. 4 °C sehr niedrige Grundwassertemperaturen festzustellen. Im Winter 2007 sinkt die Temperatur lediglich auf 7 °C ab.

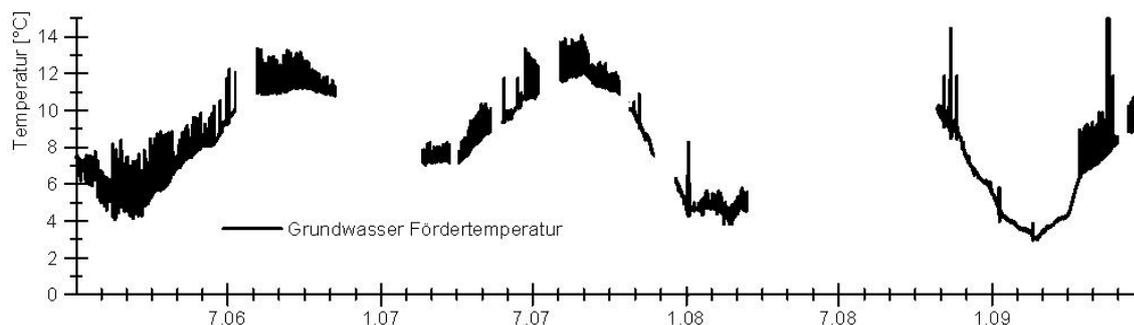


Abbildung 13: Verlauf der Grundwassertemperatur

Wärmepumpen-Hersteller und Anlagenplaner gehen im Allgemeinen von minimalen Grundwassertemperaturen für den Betrieb einer Grundwasser-Wärmepumpe aus, die zwischen 8 °C [Ochsner2005] und 7 °C [Dimplex2009, alphainno2005, STIEBEL2002] in einer Tiefe von mindestens 8 m liegen. Auch das im untersuchten Gebäude installierte System ist auf eine Brunnenwasser-eintrittstemperatur von 9 °C für den Heizbetrieb ausgelegt [Bergsteiner2009]. Mit zuletzt 3 °C im Februar 2009 ist die Grundwasserfördertemperatur damit deutlich unter der Auslegungstemperatur. Die niedrigste Schluckbrunnenwassertemperatur wurde mit knapp über 0,8 °C ebenfalls Ende Februar beim gleichzeitigen Betrieb beider Wärmepumpen gemessen. Sinkt die Grundwasserfördertemperatur weiter ab, besteht die Gefahr, dass der Wärmetauscher „Brunnen – Quellenseite Wärmepumpen“ gefriert, dadurch nachhaltig beschädigt wird und somit kein Heizungsbetrieb mehr möglich ist. Des Weiteren ist zu erwarten, dass die Wärmepumpen bei Erreichen einer Temperatur von +3 °C in die Sicherheitsabschaltung gehen, anschließend Takten und das Gebäude entsprechend auskühlt.

Für den Betrieb der eingesetzten Wärmepumpenaggregate stellen die geringen Grundwassertemperaturen jedoch prinzipiell kein Problem dar, da die verbauten Sole-Wärmepumpen auf eine minimale Temperatur der Wärmequelle von -5 °C ausgelegt sind und mit Frostschutz im Primärkreis betrieben werden. Durch die geringen winterlichen Grundwassertemperaturen am Standort des Gebäudes können die bei Grundwasserwärmepumpen üblichen, hohen Leistungszahlen unter diesen Bedingungen jedoch nicht erreicht werden. Damit stellt sich die Frage nach den Ursachen der unterwartet geringen Grundwassertemperaturen.

In diesem Zusammenhang wurden relevante Grundwassertemperaturganglinien ausgewertet, die im Stadtbereich Ingolstadt von den *Ingolstädter Kommunalbetrieben AöR* aufgezeichnet werden. Die beiden dem untersuchten Gebäude am nächsten gelegenen Messstellen liegen in den Ingolstädter Stadtteilen Kothau und Unsernherrn, jeweils in ca. 1 km Entfernung (Abbildung 14). Diese

Grundwassertemperaturen werden mit direkt ins Grundwasser eingehängten Temperaturfühlern 5...6 m unter der Erdoberfläche gemessen.

Die Grundwassertemperatur hängt maßgeblich von geogenen Faktoren wie dem Flurabstand (Abstand des Grundwasserspiegels zur Erdoberfläche), der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine, der Grundwasserneubildung und von anthropogenen Faktoren ab [Henning1995]. Je geringer der Flurabstand ist, desto mehr wird das Grundwasser von der Außentemperatur beeinflusst. Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, liegt der Flurabstand der Messstelle Kothau bei 3...4 m und der der Messstelle Unsernherrn bei 2...3 m, was eine durchgehende Differenz der Grundwassertemperaturen an den beiden Messstellen von etwa 2..3 °C erklärt.

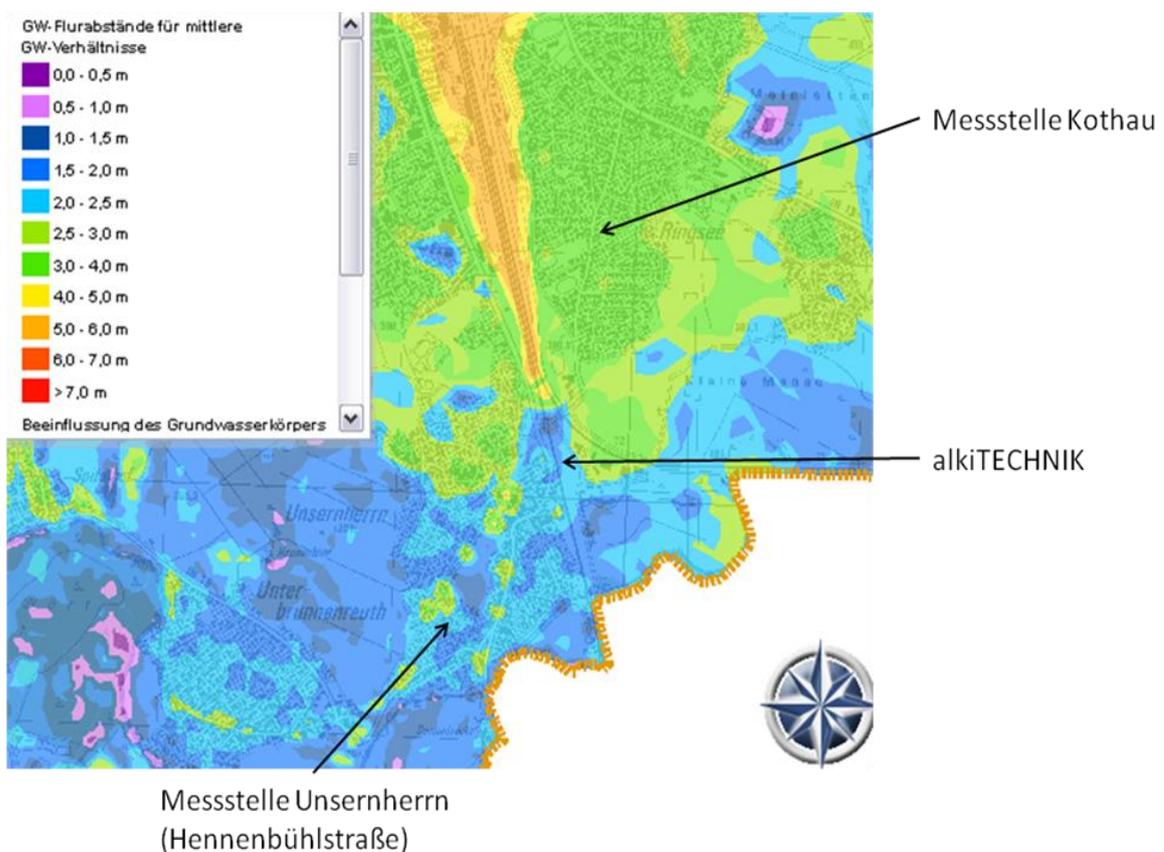


Abbildung 14: Höhe der Flurabstände mit Lage der Messstellen [IN-KB2009]

Wie die Messstelle Unsernherrn, liegt auch das *alki-TECHNIK*-Gebäude in der Sandrachniederung. Am Standort des *alki-TECHNIK*-Gebäudes liegt der Flurabstand nach Abbildung 14 zwischen 1,5...2,5 m. Demnach sollte sich die Grundwassertemperatur ähnlich der an der Messstelle Unsernherrn verhalten.

Im Jahr 2006 deckt sich der im *alki-TECHNIK*-Gebäude gemessene Temperaturgang mit dem an der Messstelle Unsernherrn. So liegt bei beiden Messungen die Fördertemperatur zum Beispiel Ende April bis Anfang Mai 2006 bei 7 °C und Anfang September 2006 bei 11 °C. Somit ist die am Wärmetauscher „Brun-

nen – Quellenseite Wärmepumpen“ gemessene, niedrige Grundwasserförder-
temperatur plausibel und lässt sich auf den geringen Flurabstand am Standort
des Gebäudes zurückführen.

8.3. Regelung der Wärmepumpenanlage und Optimierung

Um einen energetisch optimierten Betrieb der Wärmepumpen sicherzustellen,
wurden die Regelung der beiden Wärmepumpen im Projektverlauf eingehend
analysiert und die Heizkurven der beiden Geräte hinsichtlich energieeffizientem
Betrieb angepasst.

Die Wärmepumpen werden mit Hilfe der Heizkurve für die Rücklauf-
Solltemperaturen (T_{soll}) angesteuert. Diese Kennlinie ist über die Eingabe von
Solltemperaturen bei $+20\text{ °C}$ und -20 °C Außentemperatur (T_a) definiert
[Dimplex2004]. Die Heizkurve der beiden Wärmepumpen wurde bei der
Inbetriebnahme deckungsgleich mit einem Hystereseband von $\pm 3\text{ K}$ (Abbildung
15) eingestellt, basierend auf den in Tabelle 6 aufgeführten Eckpunkten, die
unverändert der Werkseinstellung entsprechen.

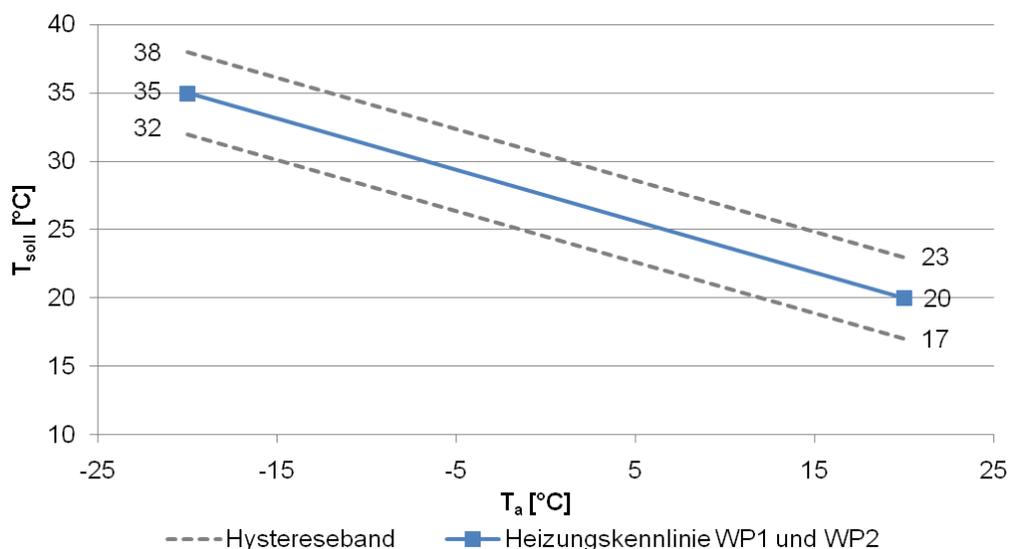


Abbildung 15: Heizkurve beider Wärmepumpen bei Ersteinstellung (Ausgangszustand)

Tabelle 6: Eckpunkte der Heizkurve beider Wärmepumpen bei Inbetriebnahme

Außentemperatur T_a	Rücklauf-Solltemperatur T_{soll}	Hystereseband
-20 °C	35 °C	$\pm 3\text{ K}$
20 °C	20 °C	

Durch die deckungsgleiche Einstellung der Wärmepumpen ist ein wünschens-
wertes kaskadenförmiges Schalten der beiden Aggregate mit je zwei
Verdichterstufen nicht möglich. Geplant und vom Hersteller empfohlen war ein
Zuschalten der einzelnen Wärmepumpen mit ihren jeweiligen Verdichterstufen,
beginnend beim kleineren Aggregat (Wärmepumpe 2, WP 2). Wie in Abbildung

16 dargestellt, schalten die beiden Wärmepumpen bei der gezeigten Regelungseinstellung gleichzeitig mit der ersten Verdichterstufe zu. Da beide Geräte bei gleichzeitigem Betrieb in vielen Fällen eine zu hohe Heizleistung erbringen, schalten beide Wärmepumpen nach kurzer Zeit wieder ab, solange bis die Rücklauftemperatur erneut die Solltemperatur unter Berücksichtigung der Hysterese unterschreitet. Folge ist ein ständiges Takten der beiden Wärmepumpen.

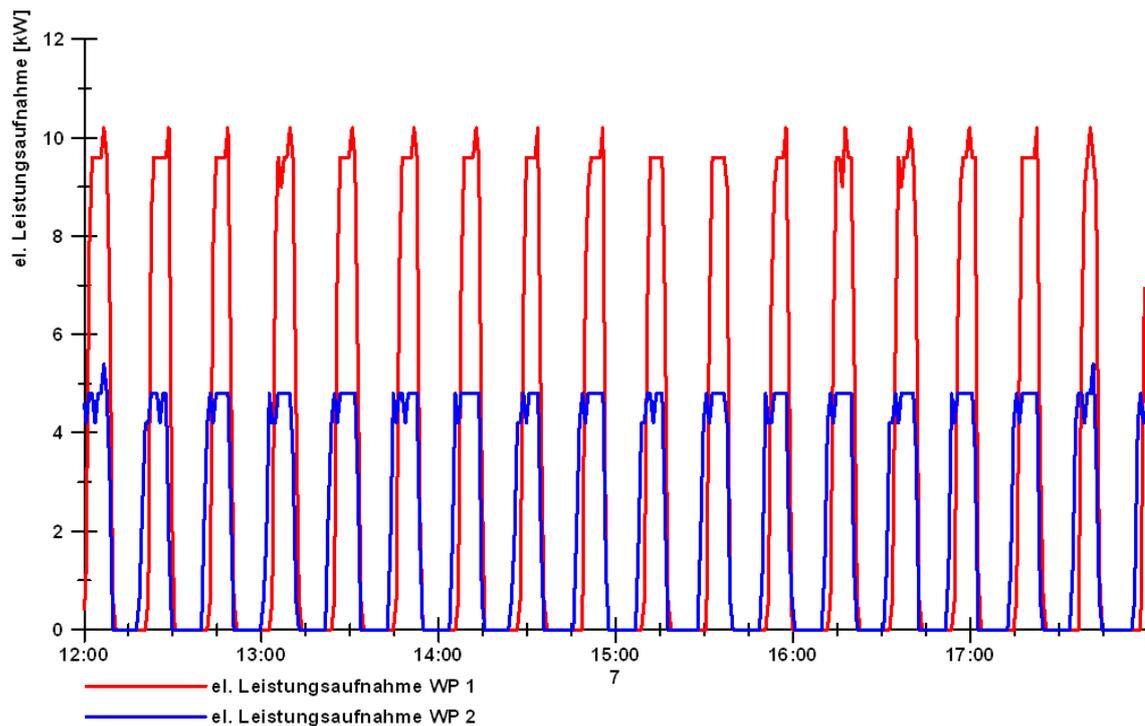


Abbildung 16: Beispiel für Takten der beiden Wärmepumpen

Dieses Verhalten ist aufgrund der Anfahrverluste der Wärmepumpen energetisch als nicht sinnvoll zu bewerten, die Schaltung der Wärmepumpen-Verdichterstufen sollte daher nacheinander, in entsprechenden Stufen erfolgen. Dieses kaskadenförmige Zuschalten kann nur mit abgestimmter, optimaler Einstellung der Heizkurve für beide Geräte erfolgen.

Aufgrund des beschriebenen, energetisch nur bedingt effizienten Betriebs der beiden Wärmepumpen, wurde eine Neueinstellung der Heizkurven vorgenommen. Die Heizkurven wurden aufeinander abgestimmt wie in [Tabelle 7](#) und [Abbildung 17](#) dargestellt.

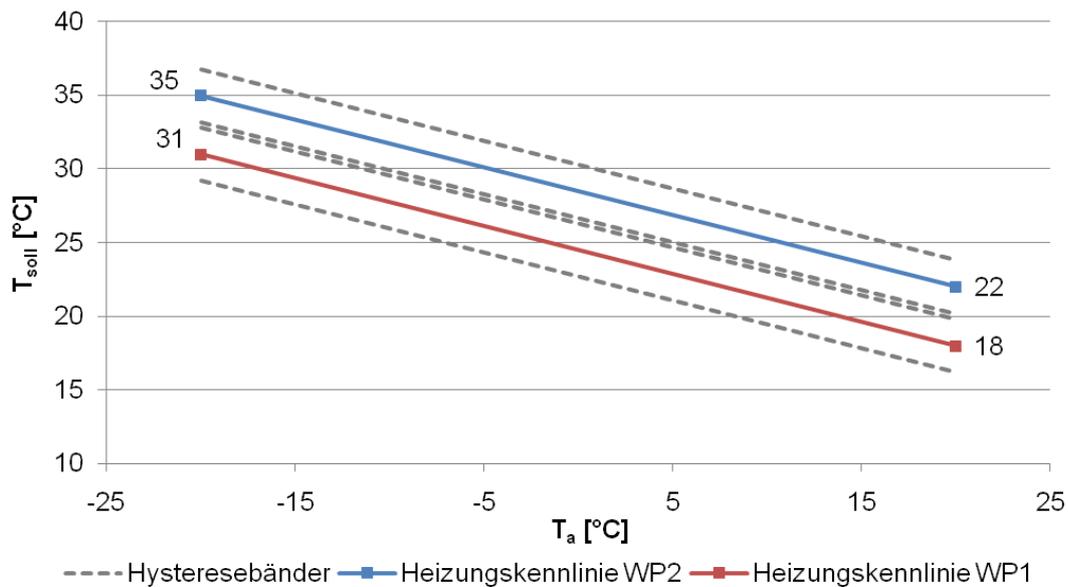


Abbildung 17: Heizkurven beider Wärmepumpen nach Anpassung

Tabelle 7: Eckpunkte der Heizkurven der Wärmepumpen nach Anpassung

	Außentemperatur T_a	Rücklauf-Solltemperatur T_{soll}	Hystereseband
WP 1	-20 °C	31 °C	± 1,8 K
	20 °C	18 °C	
WP 2	-20 °C	35 °C	± 1,9 K
	20 °C	22 °C	

Durch die vorgenommenen Änderungen der Einstellungen arbeitet WP 2 jetzt als Führungsaggregat, d.h. sie schaltet sich zunächst allein in der ersten Verdichterstufe zu. Dadurch wird ein kaskadenförmiges Schalten sowohl der je zwei Verdichterstufen als auch der Wärmepumpen nach folgendem prinzipiellen Ablaufschema möglich:

- Beim Absinken der Rücklaufsolltemperatur unter das obere Hystereseband schaltet sich WP 2 mit der ersten Verdichterstufe ein.
- Die zweite Verdichterstufe von WP 2 wird zugeschaltet, falls die Temperatur weiter bis zu ihrem unteren Hystereseband sinkt, oder die vorgegebene Rücklauf-Solltemperatur innerhalb von 25 Minuten nicht erreicht wird.
- Anschließend schaltet sich die erste Verdichterstufe von WP 1 zu, falls die Heizleistung von WP 2 in der zweiten Verdichterstufe nicht ausreicht und die Rücklauf-temperatur unter das obere Hystereseband von WP 1 sinkt.
- Sinkt die Rücklauf-temperatur unter das untere Hystereseband von WP 1, schaltet sich deren zweite Verdichterstufe zu, sodass die volle Leistung der Gesamtanlage zur Verfügung steht.

In Abbildung 18 ist die Arbeitsweise der Wärmepumpenanlage nach der Regelungsoptimierung dargestellt. Wie erwartet, geht die erste Verdichterstufe der WP 2 in Betrieb, sobald die Rücklauf­temperatur des Senkenkreises unter die von den Heizkurven vorgegebene Temperatur fällt. Falls die Rücklauf­Solltemperatur mit der ersten Verdichterstufe nicht erreicht wird, schaltet die zweite Verdichterstufe zu. Dabei bleibt WP 1 abgeschaltet, das zuvor beobachtete Takten der beiden Wärmepumpen tritt nicht mehr auf. Damit kann diese Optimierungsmaßnahme der Wärmepumpenregelung als erfolgreich bewertet werden, wie auch die verhältnismäßig hohen Arbeitszahlen von 5,2...4,3 nach der Optimierung zeigen, die in Abbildung 12 dargestellt sind.

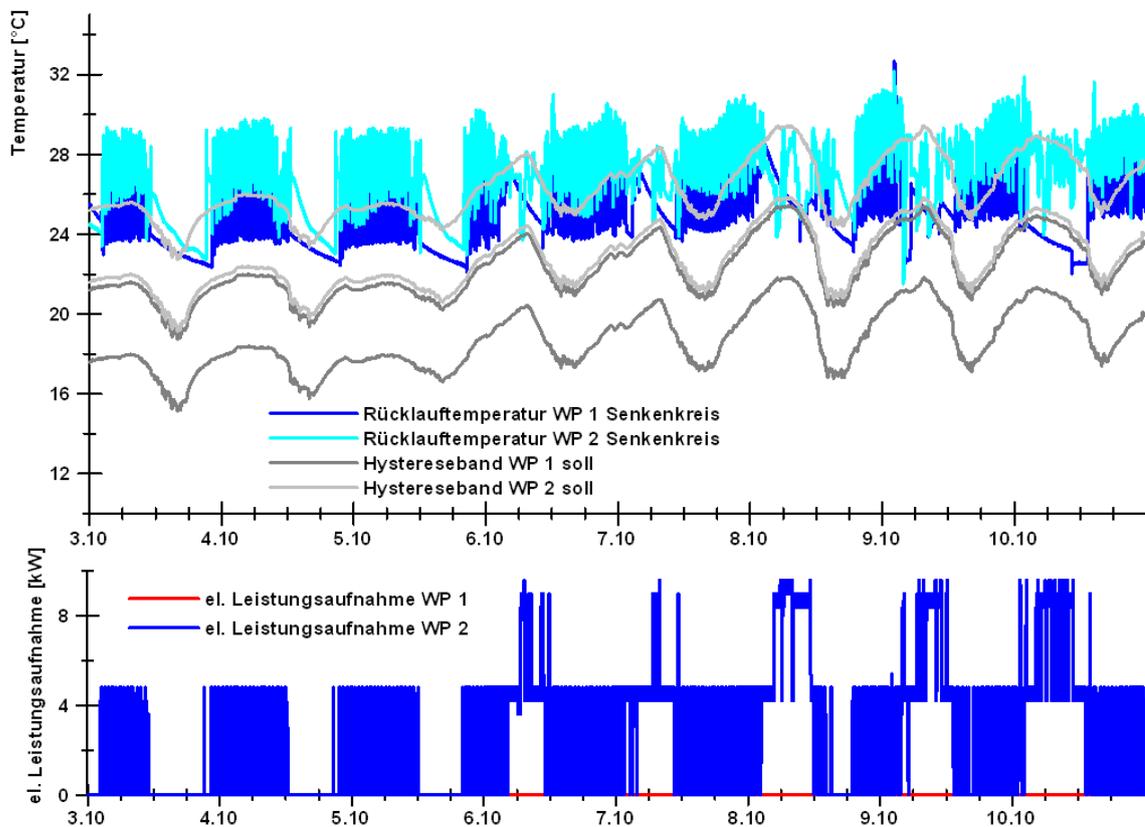


Abbildung 18: Arbeitsweise der Wärmepumpen nach Regelungsanpassung (2007)

8.4. Einfluss von Regelungseinstellungen auf die Energieeffizienz

Bei der Betrachtung der Arbeitszahlen der Wärmepumpenanlage fallen signifikante Veränderungen der Arbeitszahlen auf (vgl. Abbildung 12). Während die verhältnismäßig hohen Arbeitszahlen bis Mitte November 2007 die in Abschnitt 8.3 beschriebenen, optimierten Einstellungen der Wärmepumpenregelung widerspiegeln, sinkt beispielsweise die Arbeitszahl Mitte November 2007 von 4,4 auf 2,1 ab. Die auf Tagesbasis aufgelösten Arbeitszahlen in Abbildung 19 verdeutlichen dies.

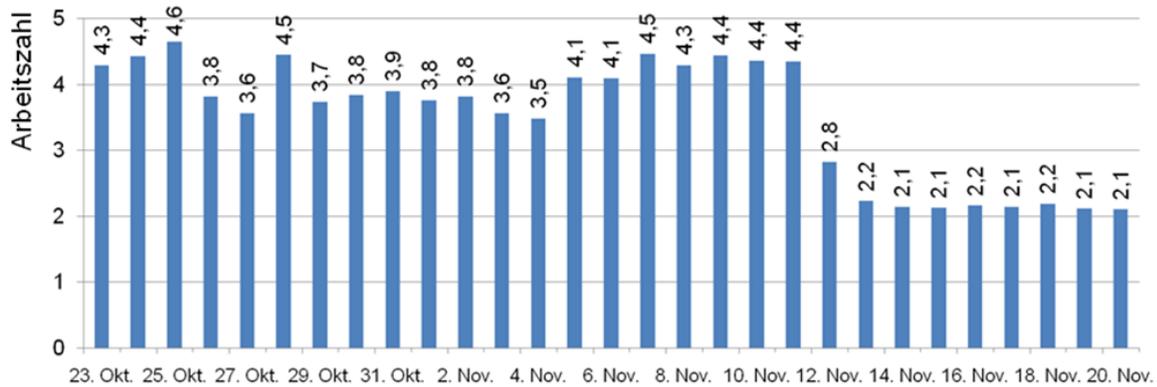


Abbildung 19: Tagesbasierte Arbeitszahlen der Wärmepumpenanlage (2007)

In den aufgezeichneten Messdaten ist dabei eine relevante Veränderung der Betriebsbedingungen seitens der Außentemperatur oder der Wärmequellen-temperatur vom 10.11 bis 12.11. nicht erkennbar. Vielmehr ist festzustellen, dass am 12.11.2007 die Heizkurven der beiden Wärmepumpen offensichtlich um mehr als 10 °C angehoben worden sind. In Abbildung 20 sind im oberen Diagramm die entsprechenden Temperaturverläufe an den Wärmepumpen dargestellt.

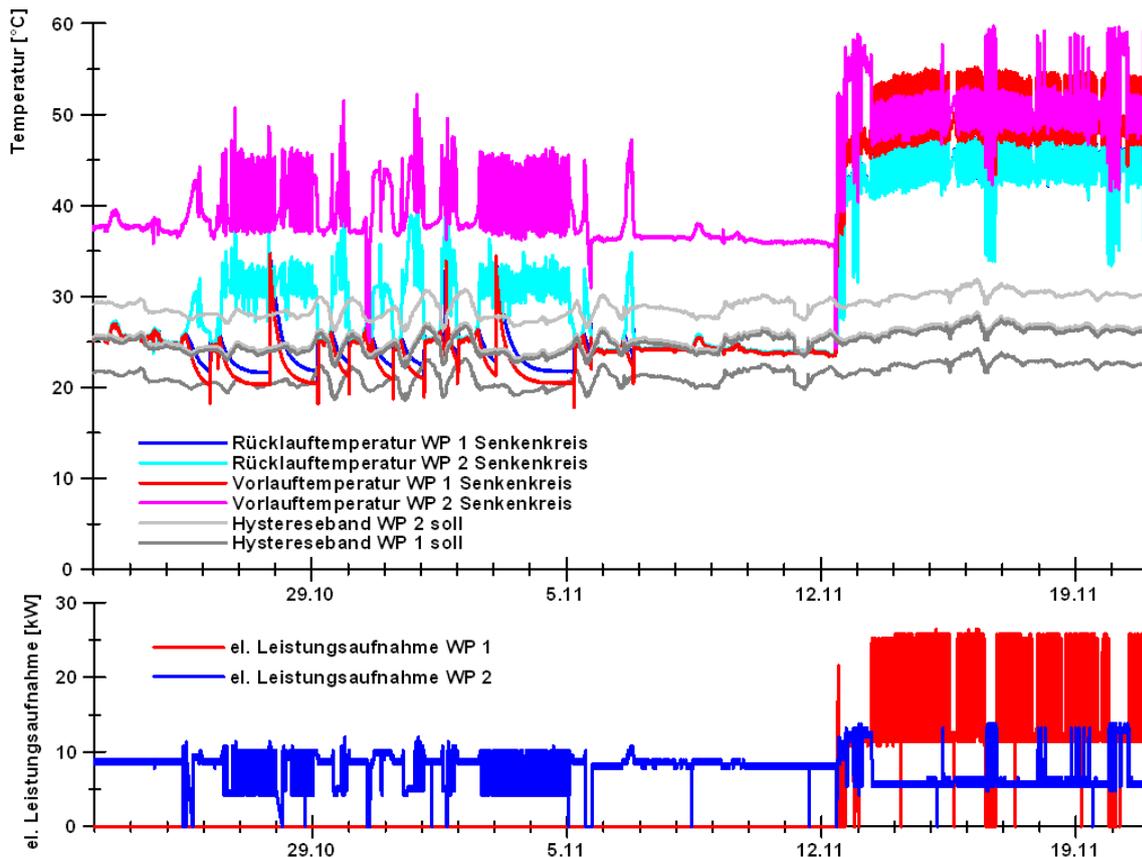


Abbildung 20: Veränderungen an der Regelung der Wärmepumpenanlage (2007)

Es ist eine plötzliche Erhöhung der Senkenkreis-Vorlauftemperaturen auf zeitweise deutlich über 50 °C erkennbar, die offensichtlich ausschlaggebend ist

für die Verschlechterung der Arbeitszahl der Wärmepumpenanlage. Die Rücklauftemperaturen der beiden Wärmepumpen sind deutlich über dem zuvor eingestellten, in Abbildung 20 grau dargestellten Hystereseband. Des Weiteren arbeiten beide Wärmepumpen nun wiederum parallel, um offensichtlich die geforderten, hohen Vorlauftemperaturen bereitstellen zu können. Die kaskadenförmige Zuschaltung der Verdichterstufen funktioniert ebenso wenig, da WP 2 auf Stufe 1 betrieben wird und gleichzeitig WP 1 anläuft. Dies deutet darauf hin, dass die Abstimmung der beiden Aggregate zueinander manuell verändert wurde.

Neben den Vorlauftemperaturen der Wärmepumpen verändern sich zum gleichen Zeitpunkt auch die Vorlauftemperaturen der einzelnen Heizkreise, die in Abbildung 21 aufgetragen sind.

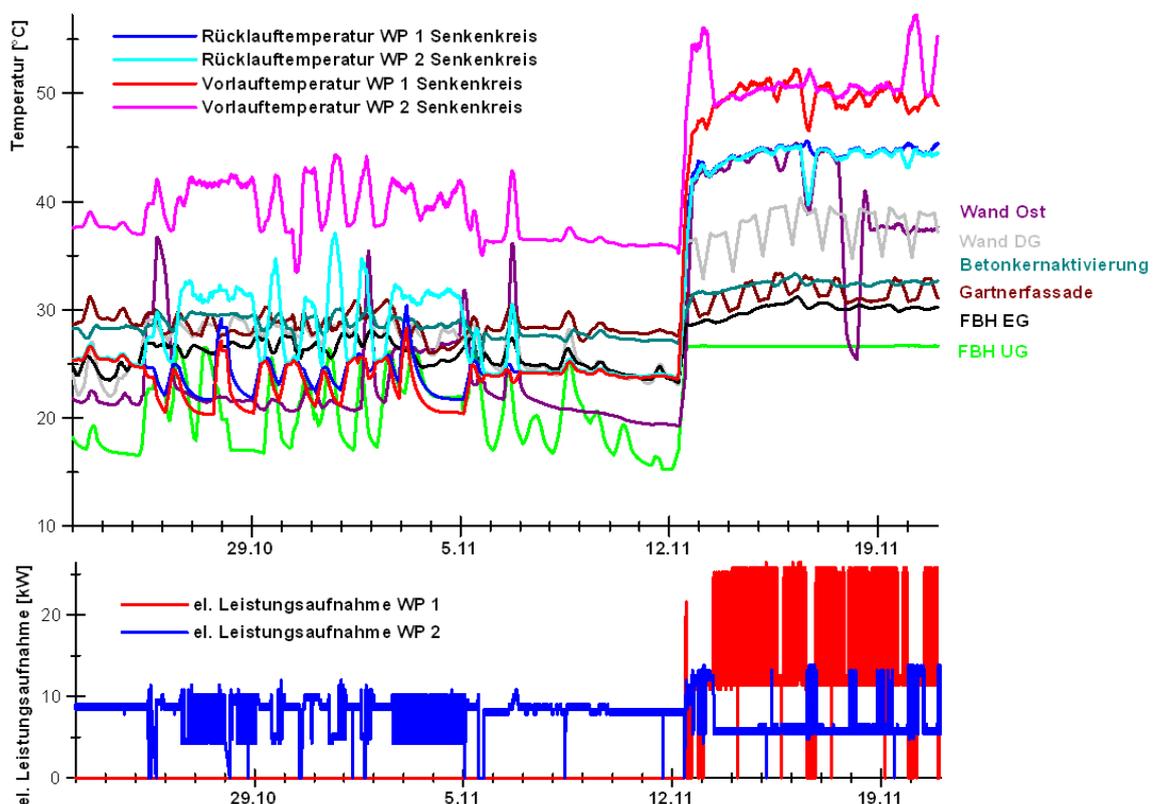


Abbildung 21: Veränderungen in den Vorlauftemperaturen der Heizkreise (2007)

Die Heizkurven der Heizkreise werden von der Gebäudeleittechnik, unabhängig von der Wärmepumpenregelung, eingestellt. Die Gebäudeleittechnik steuert dabei die Vorlauf-Solltemperaturen außentemperaturabhängig. Im Zuge der Regelungsoptimierung der Wärmepumpenanlage wurden auch die Heizkurven aller Heizkreise auf die Vorlauftemperatursollwerte von 38 °C, bei einer Außentemperatur von -16 °C und 22 °C bei einer Außentemperatur von 15 °C, eingestellt. Bei einer annähernd konstant bleibenden Außentemperatur über

den dargestellten Zeitraum von etwa 0...+6 °C sind die dargestellten Vorlauf-temperaturen der Heizkreise, vor allem der Wandheizung Ost, mit bis zu 45 °C deutlich zu hoch. Zudem sind alle Heizkreise praktisch durchgehend, auch nachts, in Betrieb. Während dies für die Betonkernaktivierung so vorgesehen ist, erscheint dies beispielsweise für die Gartner-Fassade, die als schnellregelndes Heizsystem in Ergänzung zur trägen Betonkernaktivierung konzipiert wurde, als sehr ungewöhnlich.

Bei Betrachtung der thermischen Leistungen der Heizkreise fällt auf, dass sich die Betonkernaktivierung und die Gartner-Fassade kaum verändern, während vor allem die thermische Leistung des Heizkreises „FBH EG“ deutlich ansteigt (Abbildung 22). Dieser Effekt hätte grundsätzlich auch durch eine ausschließliche Anpassung der Heizkurven des entsprechenden Heizkreises, allerdings ohne Verschlechterung der Arbeitszahlen erreicht werden können.

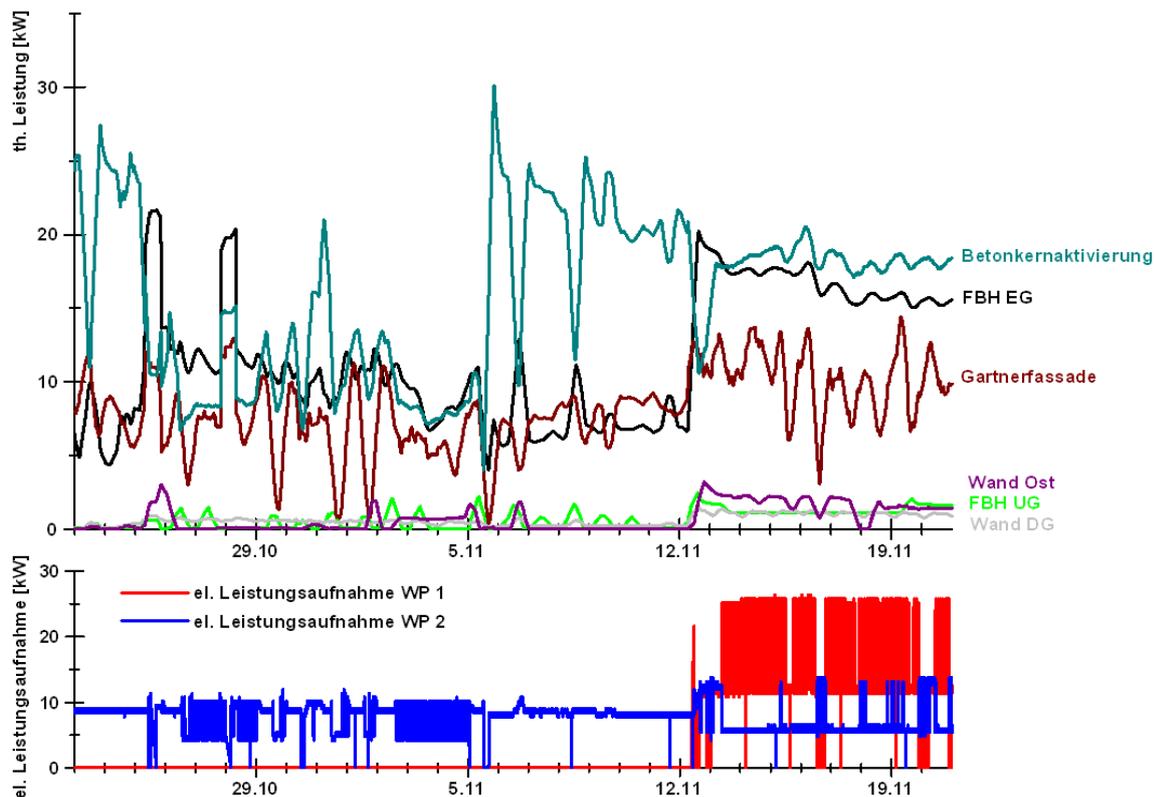


Abbildung 22: Thermische Leistung der einzelnen Heizkreise (2007)

Die dargestellten, wiederholt aufgetretenen, nicht dokumentierten und unkoordinierten Nutzereingriffe führen damit einerseits zu massiven Einbußen in den Arbeitszahlen der Wärmepumpen und andererseits zu einer Aufhebung der Funktionsweise des Gesamtsystems durch eine Veränderung der vorher eingestellten, aufeinander abgestimmten Parameter.

Erfahrungen mit vergleichbaren Gebäuden bestätigen die dargestellte Problematik der korrekten Parametrierung und Regelungseinstellung der Komponenten sowie die Systemabstimmung [Voss2007]. Demgegenüber zeigen die dort beschriebenen Beispiele aber auch das hohe Potenzial optimierter Regelungsansätze auf, sodass in einzelnen Fällen die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpensystemen erheblich gesteigert werden konnte, beispielsweise im sog. Balanced Office Building, Aachen, von 3,1 auf 4,8 unter anderem durch Änderungen in der Gebäuderegulung und Anpassung des Vorlauftemperaturniveaus.

8.5. Abschätzung der CO₂-Einsparung durch Einsatz der Wärmepumpen

Die CO₂-Emissionen bei der Energieerzeugung sind einerseits abhängig vom eingesetzten Brennstoff, andererseits aber auch von Umwandlungswirkungsgraden einzelner Anlagen sowie von Verteilverlusten etwa bei der Stromübertragung. Der Emissionsfaktor gibt dabei Aufschluss über die CO₂-Emissionen, die bei der Energieerzeugung mit verschiedenen Energieträgern typischerweise entstehen. Die Emissionen werden prinzipiell aus dem Energieverbrauch und dem Emissionsfaktor des verwendeten Energieträgers ermittelt. Tabelle 8 zeigt die Emissionsfaktoren derjenigen Energieträger, die für die Berechnung der CO₂-Emissionen von Bedeutung sind und für die Berechnungen verwendet werden. Zu berücksichtigen ist, dass die CO₂-Emissionen zusätzlich abhängig sind von der Anlageneffizienz des Heizungssystems, also beispielsweise des Kesselwirkungsgrades. Im Fall von elektrischem Strom ist darüber hinaus der individuelle Strommix des Energieversorgungsunternehmens ausschlaggebend.

Tabelle 8: Emissionen für verschiedene Energieträger [Öko-Institut2009, IZU2009]

Energieträger	Emissionsfaktor f [kg CO ₂ / kWh]
elektrischer Strom	0,622
Heizöl	0,311
Erdgas	0,247

Die Ermittlung der CO₂-Emissionen erfolgt analog zur Energiekostenermittlung in mehreren Stufen. Für die Abschätzung der CO₂-Emissionen bei Einsatz eines konventionellen Heizungssystems werden mit dem Heizwärmeverbrauch und den Emissionsfaktoren für Heizöl / Gas die Emissionen der Wärmeerzeugung berechnet. Die CO₂-Emissionen durch den Strom für die Heizungsverteilerpumpen werden über den Emissionsfaktor für Strom mit einbezogen. Die Emissionsabschätzung bei Einsatz der Wärmepumpen, also dem tatsächlich eingesetzten Heizungssystem, wird unter Verwendung des gesamten elektrischen Energieverbrauchs für Heizung und Kühlung sowie dem Emissionsfaktor für Strom ermittelt. In einem letzten Schritt wird die Einsparung

an CO₂-Emissionen durch die Erzeugung elektrischer Energie mit der Photovoltaik bestimmt. Wodurch sich die beim Betrieb des Gebäudes verbleibenden CO₂-Emissionen ergeben. Die Ergebnisse der entsprechenden Analyse sind in Abbildung 23 dargestellt.

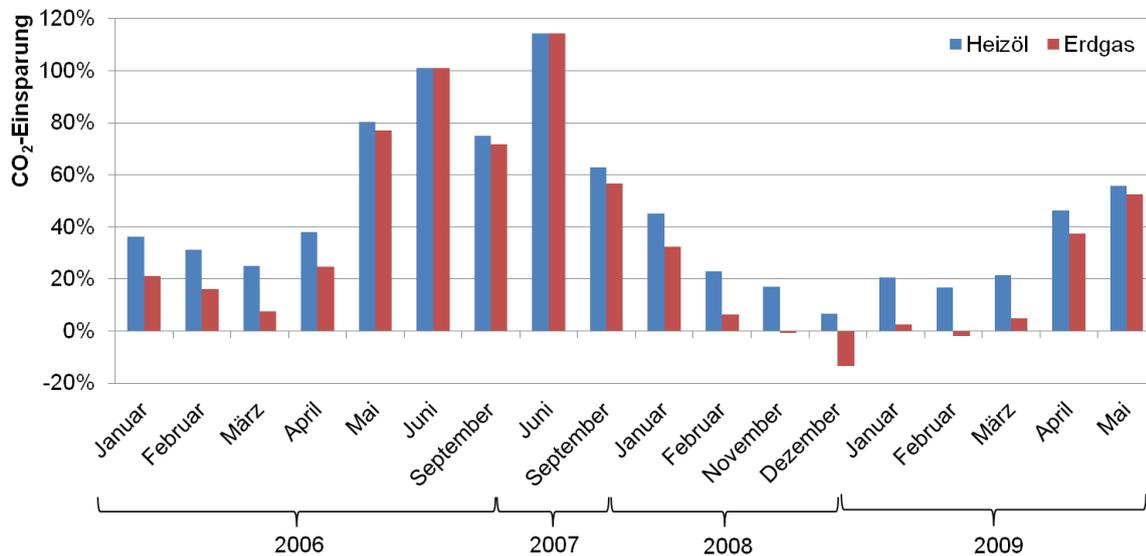


Abbildung 23: Eingesparte CO₂-Emissionen gegenüber konventionellen Heizsystemen

Der Vergleich zwischen konventioneller und der im Gebäude installierten Heiz- und Kühltechnik zeigt, dass unter den angenommenen Randbedingungen mit dem eingesetzten System durchaus Emissionsvorteile realisiert werden können. Beinahe ausschließlich wird durch die eingesetzten Systeme im Betrieb eine geringere CO₂-Menge emittiert als bei herkömmlichen Systemen. Jedoch hängt dieser Vorteil wiederum stark von der Anlageneffizienz und hierbei von der Anlagenregelung ab. Dies zeigt beispielsweise der Vergleich zwischen Januar 2008, in dem der Emissionsvorteil sehr deutlich ausgeprägt ist, und Januar 2009, in dem nur ein kaum nennenswerter Vorteil besteht. Die hohen Werte während der Sommermonate sind auf die Energiegewinnung mit PV zurückzuführen. Damit bestätigt sich die Sensibilität der realen Emissionen gegenüber der Anlageneffizienz in Form des bereits bei der Analyse der Wärmepumpen auffälligen Unterschieds der Arbeitszahlen von 3,8 (Jan. 08) im Vergleich zu 2,6 (Jan. 09) bei annähernd gleicher Grundwassertemperatur. Allein mit einem im Januar 2009 erhöhten Heizwärmebedarf aufgrund geringerer Außentemperaturen ist dieser Unterschied nicht zu erklären, da die Emissionen der konventionellen Vergleichssysteme auf Basis des tatsächlichen Heizwärmebedarfs berechnet werden.

Während des gesamten betrachteten Zeitraums konnten somit, bei einer Arbeitszahl der Wärmepumpenanlage von lediglich 2,84, ohne Berücksichtigung der Erlöse durch die Photovoltaikanlage, gegenüber einer konventionellen

Wärmeerzeugung mittels Heizöl insgesamt nur ca. 25 % und gegenüber einer konventionellen Wärmeerzeugung mittels Erdgas insgesamt kaum nennenswerte ca. 9 % der CO₂-Emissionen eingespart werden.

Abbildung 24 zeigt den prinzipiellen Zusammenhang zwischen Emissionseinsparung und Arbeitszahl auf. Durch eine optimierte Abstimmung der Systemregelstrategie können bei der hier betrachteten Wärmepumpenanlage aber deutlich höhere Leistungszahlen erreicht werden. Wie die Analyse in

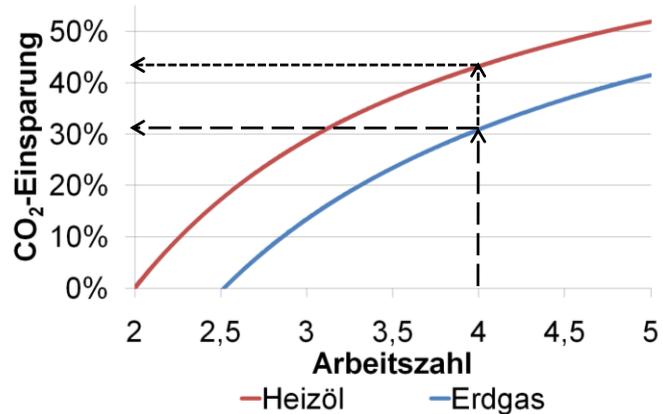


Abbildung 24: Potenzial CO₂-Einsparung (ohne PV)

Abschnitt 8.4 zeigt, reagiert die energetische Effizienz der Wärmepumpenanlage äußerst sensibel auf Parameter- und Regelungseinstellungen sowie auf die daraus resultierenden Betriebsbedingungen. So konnte der Betrieb der Anlage mit deutlich erhöhten Arbeitszahlen in einzelnen Zeiträumen, beispielsweise im November 2007 in einem Bereich von 60...100 %, bereits messtechnisch nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 19).

Wird angesichts des beim vorliegenden Gebäude eingesetzten (Niedertemperatur-) Wärmeverteilsystems und der prinzipiell vielversprechenden Wärmequelle Grundwasser von realistisch zu erreichenden Arbeitszahlen um 4,0 (+41 % gegenüber Ist-Stand) ausgegangen, so liegt die Einsparung bereits bei 43 % (gegenüber Heizöl) beziehungsweise bei 31 % (gegenüber Erdgas). Unter der Annahme, dass eine Arbeitszahl von 4,8 erreicht wird, wie sie in vergleichbaren Gebäuden durchaus realisierbar ist (vgl. [Voss2007]), kann mit beachtlichen CO₂-Einsparungen von 51% beziehungsweise 40 % gerechnet werden. Dies verdeutlicht das in der Anlage zweifellos vorhandene, beträchtliche Potenzial. In diesem Zusammenhang muss auch bedacht werden, dass sich dieses Potenzial nicht nur auf die energetisch-ökologische, sondern Hand in Hand damit auch auf die ökonomische Effizienz der Anlage bezieht (vgl. [Häring2010a]).

Nicht berücksichtigt wird in den dargestellten Betrachtungen, dass bei Einsatz eines konventionellen Öl- oder Gasheizungssystems wohl eine völlig andere Heizungsverteilung und keine Grundwassererschließung realisiert worden wäre. Damit hätte die energetisch effiziente Grundwasserkühlung nicht umgesetzt

werden können. Für die Gebäudeklimatisierung wären elektrisch angetriebene Kompressionskältemaschinen erforderlich gewesen, deren Primärenergieverbrauch und damit Emissionsanteil erheblich ist. Beispielsweise wurden im Juni 2007 die Wärmemenge von 17.150 kWh über die Grundwasserkühlung abgeführt. Wäre hierfür eine Kompressionskältemaschine mit einer angenommenen Arbeitszahl von 4,5 [Henning2004] verwendet worden, wären 2.370 kg CO₂ emittiert worden.

9. Schlussfolgerungen

Die Analyse der Energiebilanzen und erreichten CO₂-Einsparung bestätigt, dass nicht optimierte Gesamtregelungsstrategien auch bei Gebäudeklimatisierungskonzepten mit hohen (geplanten) regenerativen Anteilen zu geringen oder gar negativen Emissionsvorteilen gegenüber konventionellen Systemen führen können. Das umgesetzte Gebäudetechnikkonzept besitzt dahingehend zwar zweifellos nennenswertes Potenzial. Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses kann es wohl als innovativ, jedoch nur eingeschränkt als regenerativ bezeichnet werden.

Im Praxisbetrieb haben sich im untersuchten Gebäuden zum einen Probleme auf Komponentenebene, wie etwa den Wärmepumpenaggregaten gezeigt. Zum anderen wurde aber auch eine in zahlreichen Punkten optimierbare, regelungstechnische Abstimmung der einzelnen Systemkomponenten festgestellt. Beispielhaft ist hier die Abstimmung der Wärmepumpenregelung mit der Gebäuderegulierung, also den einzelnen Heizsystemen, zu erwähnen.

Des Weiteren wurden gerade in der Inbetriebnahme- und ersten Betriebsphase zahlreiche Problemstellungen erkannt, deren Behebung oder Verbesserung mit der wissenschaftlichen Analyse zum Teil angestoßen werden konnten. Dies betraf etwa die nicht optimale regelungstechnische Abstimmung der beiden Wärmepumpenaggregate und ihrer beiden Verdichterstufen.

Die vielfältigen Erfahrungen belegen die Notwendigkeit einer ausführlichen Inbetriebnahme- und Einregulierungsphase solch komplexer Anlagen, wie sie bereits auch als Konsequenz aus der Analyse vergleichbarer Projekte (z.B. [Voss2007]) gefordert wurde. Die aufgetretenen Betriebsprobleme, d.h. des unnötig erhöhten Energieverbrauchs und der damit erhöhten CO₂-Emissionen, wären ohne umfangreiche wissenschaftliche Begleitung und Betriebsdatenanalyse höchstwahrscheinlich nicht erkannt und behoben worden. Diese Tatsache zeigt schließlich eindringlich die Erfordernis einer adäquaten, der Komplexität der Anlagen angemessenen Betriebsüberwachung und Betriebsführung. Ersteres sollte hauptsächlich durch die Umsetzung angemessener Selbstüber-

wachungsstrategien der Anlagenkomponenten und vor allem der Gesamtsysteme realisiert werden, die in anderen Industriebereichen wie etwa der Automobilindustrie bereits Standard sind. Dies wird zu deutlich erhöhter Zuverlässigkeit im Betrieb, unter anderem im Hinblick auf die Energieeffizienz führen sowie die Betriebsführung der Anlagen für den Betreiber vereinfachen und damit verbessern.

Schließlich bleibt festzustellen, dass durch Nutzereingriffe, zum Beispiel in die Regelung von Komponenten und in die Systemabstimmung, die Energieeffizienz des Gesamtsystems herabgesetzt wurde, ohne eine entsprechende Rückmeldung über die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen durch die Anlagen.

Konzepte für die Gebäudeenergieversorgung sind an Benutzer, Architektur und Standort angepasste Unikate. Besonders innovative Konzepte erlauben durch einen hohen Technikeinsatz kein Plug&Play [Plesser2010]. Für einen energieoptimierten Betrieb von Gebäuden, wie das in diesem Vorhaben betrachtete *alki-TECHNIK*-Gebäude oder das Gebäude J des Güterverkehrszentrums Ingolstadt (vgl. [Zörner2005a]), sind unabhängig von ihrer Einmaligkeit Planungs- sowie Umsetzungsstandards notwendig. Nach der Planungsphase und der Inbetriebnahme ist besonderes Augenmerk auf die Einregulierungsphase und die weiteren Betriebsüberwachung zu legen.

10. Handlungsempfehlungen

Planungsphase:

- Bereits das grundlegende Konzept der Gebäudeenergieversorgung muss gründlich, beispielsweise durch Konzeptsimulationen, auf Plausibilität und Umsetzbarkeit hin untersucht und anschließend konsequent weiterverfolgt werden. So ist exemplarisch die Kombination der im *alki-TECHNIK*-Gebäude eingesetzten Wärmepumpenanlage mit den eingesetzten Heizsystemen in Frage zu stellen, da die vielversprechende Kombination von Wärmepumpe und Niedertemperaturheizsystemen nicht konsequent verfolgt wurde. So muss im Heizfall von der Wärmepumpenanlage die höchste im System benötigte Vorlauftemperatur bereitgestellt werden (hier beispielsweise die durchströmte Fassade mit einer Auslegungstemperatur von 45 °C), obwohl ca. 75 % der Wärmemenge über ein Niedertemperaturheizsystem (beispielsweise die Betonkernaktivierung mit einer Auslegungsvorlauftemperatur von 28 °C) in das Gebäude eingetragen werden, da im Gebäude nur ein einziges Wärmeverteilsystem installiert ist. Hier hätte bereits während der Planung ein geteiltes Nieder- und Hochtemperatur-

verteilsystem, das beispielsweise über eine Wärmepumpenanlage mit Heißgasentkopplung versorgt wird, in Betracht gezogen werden können.

- Das technische Grundkonzept darf nicht zu komplex sein, da ansonsten die Gefahr besteht, dass das System vom Nutzer nicht beherrschbar ist und so Frustrationen entstehen.
- Bereits während der Anlagenplanung muss die Gesamtregelungsstrategie, z.B. eine Priorisierung der einzelnen Systeme und eine Wärmeverteilstrategie, festgelegt werden. Im *alki-TECHNIK*-Gebäude kann beispielsweise die Energieeffizienz der Kühlung über die Gartner-Fassade erhöht werden, indem die Kühlung erst erfolgt, wenn die hohen externen Wärmelasten durch Sonneneinstrahlung zuvor durch die Jalousiesteuerung minimiert worden ist.
- In der Planungsphase muss berücksichtigt werden, dass die theoretische, physikalische Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen während des Betriebs nicht erreicht und ökologische sowie ökonomische Ziele daran angepasst werden.
- Bei der Planung von Wärmepumpenanlagen sind die Verfügbarkeit und das Temperaturniveau der Wärmequelle für den jeweiligen Standort genau zu untersuchen. So hätten bereits bei der Planung der Auslegung des Grundwasserbrunnens des *alki-TECHNIK*-Gebäudes der niedrige Grundwasserflurabstand kritisch hinterfragt werden müssen.
- In der Planung ist die Integration eines Anlagendiagnosesystems vorzusehen. Das Diagnosesystem soll eine automatisierte Selbstdiagnose ermöglichen und dem Nutzer so Feedback über den energetisch sinnvollen Betrieb der Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung geben sowie auch die Konsequenzen von Veränderungen in den Regelungseinstellungen darstellen. Während der Einregulierungsphase bietet es die Möglichkeit einen energetisch effizienten Betrieb einzustellen und diesen während der Betriebsphase zu überwachen. Im *alki-TECHNIK*-Gebäude kann beispielsweise lediglich über die Stromabrechnungen auf die Energieeffizienz rückgeschlossen werden, wodurch es jedoch nicht möglich ist, einen energieeffizienten Betrieb einzustellen und zu überwachen.

Inbetriebnahme- / Einregulierungsphase:

- Vor der Inbetriebnahme muss eine vollständige Übergabe der Bestandsunterlagen und Betriebsanleitungen erfolgen.
- Durch eine intensive Schulung der Anlagenbediener und verständliche Funktionsbeschreibungen wird die Motivation energetisch nicht sinnvoller Manipulationen an der Anlagenregelung vorzunehmen, wie im alki-TECHNIK-Gebäude geschehen, minimiert.
- Der Anlagenplaner muss in die Einregulierung der Anlage involviert sein. Dies kann bereits mit der Beauftragung sichergestellt werden, in dem die Zahlung eines Teilbetrags der Auftragssumme erst nach Abschluss der Einregulierungsphase erfolgt. Ein Einbeziehen des Planers in die Einregulierungsphase hat zudem den Vorteil, dass der Planer selbst daraus direkt Erfahrungen bei der Einregulierung sammeln und in folgende Projekte mit einfließen lassen kann.

Betriebsführung:

- Während des Betriebes muss eine Selbstüberwachung des Systems erfolgen. Das System muss in der Lage sein, Defekte auf Komponentenbasis einerseits und Verschlechterungen in der Energieeffizienz andererseits zu erkennen.
- In einem jährlichen Energiecheck sollten Trends in der Energieeffizienz aufgezeigt und mit den Ergebnissen der vorherigen Jahre verglichen werden.
- Energieeffizienz sollte als fester Bestandteil in den Wartungsplan aufgenommen werden. Im untersuchten Gebäude wie auch in anderen, vergleichbaren Gebäuden ist ein Qualitätssicherungsprozess nicht erkennbar. Damit steigt das Risiko von Defiziten im Bereich der Energieeffizienz. Diese Defizite können jedoch bereits durch geringinvestive Maßnahmen in der Anlagenplanung, der Einregulierungsphase sowie der weiteren Betriebsführung deutlich minimiert werden.

Quellenverzeichnis

- [alphainno2005] alphainnoTec (2005) *Wärmepumpenguide 2005/2006*. München: Marketing + Wirtschaft Verlagsgesellschaft
- [Bachschu2005] Architekturbüro Bachschuster (Hrsg.) (2005) *Exposé, Neubau Büro- und Produktionsgebäude Alkitronic-Technologie Ingolstadt*. Ingolstadt: Architekturbüro Bachschuster
- [Bergsteiner2005] Kaser, et al. (2005) *Funktionsschema Heizung*. Zeichnung B040399, Bauvorhaben Neubau Büro- und Produktionsgebäude, Manching-Oberstimm: Georg Bergsteiner GmbH
- [Bergsteiner2009] Georg Bergsteiner GmbH (2009) *Betreff: Brunnen*. [schriftliche Mitteilung] (persönliche Kommunikation, 23.02.09)
- [BMWi2011] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2011) *Zahlen und Fakten. Energiedaten. Nationale und Internationale Entwicklung*, Aktualisierung vom 15.08.2011 [Online] Abrufbar unter: <http://bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html> (aufgerufen am 12.09.2011)
- [Dimplex2004] Dimplex - KKW Kulmbacher Klimageräte-Werk GmbH (Hrsg.) (2004) *Projektierungs- und Installationshandbuch: Heizungs- und Warmwasser-Wärmepumpen*, Ausgabe 03/2004, Kulmbach
- [Dimplex2009] Dimplex – Glen Dimplex Deutschland GmbH (2009) *Wasser/Wasser- Wärmepumpen zum Heizen und für die Warmwasserbereitung* [Online] Abrufbar unter: <http://www.dimplex.de> (aufgerufen am 19.01.2009)
- [FIZ2001] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.) (2001) *basisEnergie 10 – Wärmepumpen*. Karlsruhe: BINE Informationsdienst
- [Gartner2005] Josef Gartner GmbH & Co. KG (2005) [Online] Abrufbar unter: www.josef-gartner.de (aufgerufen im Oktober 2005)
- [Handel2006] Bergius, S. (2006) *Erde wärmt Firmenzentrale*. [Online] Handelsblatt, 22.3.2006, Abrufbar unter: <http://www.handelsblatt.com/technologie/forschung/erde-waermt-firmenzentrale;1053594> (aufgerufen im Oktober 2009)
- [Häring2010] Häring, G.; Trinkl, C.; Zörner, W (2010) *Regeneratives Heizen und Kühlen in einem Multifunktionsgebäude: Überwachung und Bewertung einer regenerativ versorgten Heiz- und Kühlanlage in einem Multifunktionsgebäude*. Abschlussbericht 71k-U3320.1-2005/26-1 für das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, Ingolstadt: Kompetenzfeld Erneuerbare Energien der Hochschule Ingolstadt
- [Häring2010a] Häring, G.; Trinkl, C.; Zörner, W (2010) *Monitoring and Evaluation of Renewable Heating and Cooling in a Multi-Purpose Building. Eurosun 2010 – 2nd International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings*, Graz, 28.09.-01.10.2010
- [Henning1995] Henning, A. (1995) *Das Grundwasser-Temperaturfeld von Berlin. Brandenburgische geowissenschaftliche Beiträge*, Seiten 97-104
- [Henning2004] Henning, H.-M. (2004) *Klimatisieren mit Sonne und Wärme*. Karlsruhe: BINE Informationsdienst

- [IN-KB2009] Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR (2009) Grundwasserflurabstandskarte [Elektronisches Bild], Abrufbar unter: <http://www.in-kb.geoffice-bayerngis.de/Flurabstand/> (aufgerufen am 16.01.2009)
- [IZU2009] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2009) *Ermittlung der CO₂-Emissionen* [Online] Abrufbar unter: www.izu.de (aufgerufen am 17.09.2009)
- [Ochsner2005] Ochsner, K. (2005) *Wärmepumpen in der Heizungstechnik*. 3. Auflage, Heidelberg: C.F. Müller Verlag
- [Öko-Institut2009] Öko-Institut e. V. (2009) *GEMIS 4.2* [Online] Abrufbar unter: www.gemis.de (aufgerufen am 22.09.2009)
- [Plessner2010] Plessner, S. Fisch, N. (2010) *Gebäude energieeffizient betreiben – Den Anspruch der Planung einlösen*. Karlsruhe: BINE Informationsdienst
- [Prop2008] Drabits, S. (2008) Green Buildings. Erbauer der Zukunft. *Property Magazine* Nr. 06/03
- [STIEBEL2002] Stiebel Eltron (2002) *Wärmepumpen-Systeme/ Planung und Installation*, Holzminden: STIEBEL ELTRON
- [Voss2005] Voss, K. et al. (Hrsg.) (2005) *Bürogebäude mit Zukunft – Konzepte, Analysen, Erfahrungen*. Köln: TÜV-Verlag.
- [Voss2007] Voss, K. et al. (2007) Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsbauten. Analysen und Erfahrungen im Kontext des Förderkonzepts Energieoptimiertes Bauen. Teil 2: Energiekonzepte mit Wärmepumpen, *HLH Lüftung/Klima - Heizung/Sanitär - Gebäudetechnik* 58 (7), pp. 23-27
- [Wagner2005] Wagner, A. (2005) Energieeffizienz in Bürogebäuden – die KfW-Gebäude in Frankfurt am Main, *Europäischer Kongress „Energie einsparen im Gebäudebestand – mehr Wert entwickeln!*. München, 17. bis 18.01.2005
- [Waldmann2001] Waldmann, X. (2001) Fassadenheizung: Die dritte Dimension der Behaglichkeit. *M&T Metallhandwerk* Nr. 11, Lübeck: Charles Coleman Verlag
- [Zörner2005] Zörner, W.; et al. (2005) Wärmepumpen-Anlagen im industriellen Einsatz. 3. *Forum Wärmepumpe*, Berlin, 13. bis 14.10.2005
- [Zörner2005a] Zörner, W. (2005) Innovative Renewable Heating and Cooling Technologies in Office and Production Buildings. *European Conference on Sustainable Energy Systems for Buildings and Regions*, Wien, 05. bis 08.10.2005.
- [Zörner2006] Zörner, W. (2006) Solarunterstützte DEC-Anlage im Güterverkehrszentrum Ingolstadt. 4. *Symposium Solares Kühlen in der Praxis*, Stuttgart, 03. bis 04.04.2006

Impressum

Herausgeber

Der Präsident der
Hochschule für angewandte
Wissenschaften FH Ingolstadt
Esplanade 10
85049 Ingolstadt
Telefon: 0841 9348-0
Fax: 0841 9348-200
E-Mail: info@haw-ingolstadt.de

Druck

Hausdruck
Die Beiträge aus der Reihe „Arbeitsberichte – Working Papers“ erscheinen in unregelmäßigen Abständen. Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, ist gegen Quellenangabe gestattet, Belegexemplar erbeten.

Internet

Dieses Thema können Sie, ebenso wie die früheren Veröffentlichungen aus der Reihe „Arbeitsberichte – Working Papers“, unter der Adresse www.haw-ingolstadt.de nachlesen.

ISSN 1612-6483