



# WKSP Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude

## Forschungsbericht (Teil I)

<b>Gesamtleitung</b>	TU Braunschweig Institut für Gebäude- und Solartechnik – IGS, Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch (Institutsleiter) Dipl.-Ing. Franziska Bockelmann (Projektleiter) Dipl.-Ing. Herdis Kipry Dipl.-Ing. Christian Sasse
<b>Kooperationspartner</b>	TU Braunschweig, Institut für Grundbau- und Bodenmechanik - IGB, meteocontrol GmbH, Augsburg
<b>Bundesförderung</b>	 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
<b>Förderkennzeichen</b>	0327364A
<b>Laufzeit</b>	Juli 2004 – Februar 2010 (inkl. Aufstockung und Verlängerung)
<b>Stand</b>	November 2010

Der Forschungsbericht wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. (Förderkennzeichen: 0327364A) Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



**durchgeführt von**

TU Braunschweig  
Institut für Gebäude- und Solartechnik  
Mühlenpfordtstr. 23  
D - 38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391 3555 · Fax: 0531 / 391 8125  
Internet: [www.igs.bau.tu-bs.de](http://www.igs.bau.tu-bs.de) e-mail: [igs@tu-bs.de](mailto:igs@tu-bs.de)

Bearbeitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch  
Prof. Dr.-Ing. Lars Kühl  
Dipl.-Ing. Franziska Bockelmann  
Dipl.-Ing. Herdis Kipry  
Dipl.-Ing. Markus Peter  
Dipl.-Ing. Christian Sasse  
Dipl.-Ing. Dörte Blenke

**Kooperationspartner**

TU Braunschweig  
IGB – Institut für Grundbau- und Bodenmechanik,  
Gaußstraße 2  
D – 38106 Braunschweig  
Tel.: 0531 / 391 2730 · Fax: 0531 / 391 4574  
Internet: [www.igb-tubs.de](http://www.igb-tubs.de) e-mail: [igb@tu-bs.de](mailto:igb@tu-bs.de)

Bearbeitung: Dipl.-Ing. Christian Kuhn  
Eckhard Feistel

meteocontrol GmbH  
Energie & Wetter Service  
Spicherer Straße 48  
D – 86157 Augsburg  
Tel. 0821 / 34666 - 0 · Fax 0821 / 34666 - 11  
Internet: [www.meteocontrol.de](http://www.meteocontrol.de) e-mail: [info@meteocontrol.de](mailto:info@meteocontrol.de)

Bearbeitung: Bettina Zoczek  
Ralph Cerny



## VORWORT

In Deutschland werden die ersten Erdwärmesysteme zum Heizen und Kühlen von Büro- und Verwaltungsgebäuden seit 1990 umgesetzt. Heute werden immer mehr Gebäude mit diesen Systemen ausgestattet. Waren die ersten Gebäude noch Pilotprojekte, entsprechen die heute realisierten Anlagen dem Stand der Technik. Trotz der Vielzahl der bereits ausgeführten Projekte gibt es dennoch oft Fehler in der Umsetzung, die zu Problemen im Betrieb führen. Über die Redundanz bei der Deckung der Last über erdgekoppelte und konventionelle Systeme wird der Fehlbetrieb ohne messtechnische Begleitung oft nicht oder sehr spät erkannt. Derzeit gibt es kaum Untersuchungen aus dem realen Betrieb zur Funktionalität und Effizienz der Systeme. Die Vorteile der messtechnischen Begleitung im Betrieb werden jedoch in der Praxis erkannt, so dass von einem Anstieg an Erkenntnissen ausgegangen werden kann.

Ziel ist es daher, den aktuellen Stand der Praxis darzustellen, funktionsfähige Lösungen zu erkennen, aus Fehlern zu lernen sowie Optimierungserfolge und -potentiale aufzuzeigen.

**„Erfahrung ist der Anfang aller Kunst und jedes Wissens.“**

(Aristoteles, griech. Philosoph, 300 v. Chr.)

Das IGS dankt allen Unternehmen, die das Projekt WKSP unterstützen, für die Möglichkeit, ihre Gebäude im Betrieb zu untersuchen. Ihr Engagement, sowohl durch die finanzielle Unterstützung des Projekts, aber auch durch die offene, konstruktive und engagierte Mitarbeit bei den Untersuchungen, bildete die Grundlage dieses Projekts.

Für den Erfolg von WKSP ist die Möglichkeit der Publikation von Untersuchungsergebnissen zu einzelnen Gebäuden besonders wichtig. Wir danken den Unternehmen deshalb insbesondere für die Bereitschaft, eine Vielzahl von Informationen, Messergebnissen und Betriebserfahrungen einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen.

Wir hoffen, den Gebäuden und dem großen Engagement mit einer fachlich angemessenen und objektiven wissenschaftlichen Arbeit gerecht zu werden.

Braunschweig, den 01.11.2010

Univ.- Prof. Dr.- Ing. M. Norbert Fisch  
Institutsleiter

Dipl.-Ing. Franziska Bockelmann  
Projektleiter

Institut für Gebäude- und Solartechnik  
Fakultät Architektur, Bauen und Umwelt  
TU Braunschweig



## INHALTSVERZEICHNIS

1.	Zusammenfassung .....	6
2.	Das Projekt WKSP .....	9
2.1.	Motivation und Ziele .....	9
2.2.	Aufbau und Methodik .....	10
2.3.	Projektdaten und Fördergeber .....	12
2.4.	Wissenschaftliche Projektpartner .....	12
3.	Stand des Wissens und der Technik .....	13
3.1.	Erdreichwärmeübertrager .....	13
3.2.	Betriebsweisen – Prinzip der saisonalen Speicherung .....	16
3.3.	Einflussfaktoren und Randbedingungen .....	17
4.	Phase I - Grobanalyse .....	19
4.1.	Methodik und Vorgehen bei der Auswertung .....	19
4.1.1.	Objektauswahl .....	19
4.1.2.	Objekterfassung .....	19
4.2.	Einbindung der Erdwärmespeicher in das Gebäude (Heiz- und Kühl-konzepte)....	20
4.2.1.	Gebäude RIC, Hamburg (RIC) .....	23
4.2.2.	Hauptverwaltung der Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen (GEW).....	25
4.2.3.	Neues Regionshaus, Hannover (NRH).....	27
4.2.4.	Unibibliothek, Rostock (URO).....	29
4.2.5.	EnergieForum, Berlin (EFB) .....	31
4.2.6.	VGH Regionaldirektion Lüneburg (VGH).....	33
4.2.7.	Gebäude BIH, Hannover (BIH) .....	35
4.2.8.	KAI13, Düsseldorf (KAI).....	37
4.2.9.	AOK, Osnabrück (AOK).....	39
4.2.10.	VW-Bibliothek, Berlin (TUB) .....	41
4.2.11.	Accent Office Center, Frankfurt (AOC) .....	43
4.3.	Konzeptstrategien und Anlagenprognose .....	45
4.3.1.	Konzeptstrategien .....	45
4.3.2.	Planungs- und Auslegungswerte .....	52
5.	Phase II - Feinanalyse .....	61
5.1.	Methodik und Vorgehen bei der Auswertung (Phase II) .....	61
5.2.	Voruntersuchung der Erdwärmesysteme.....	63
5.2.1.	Fehleranalyse und -beseitigung.....	64
5.2.2.	Optimierungsmaßnahmen .....	67
5.3.	Monitoringergebnisse.....	71



5.3.1.	Mess- und Anlagenkonzepte .....	72
5.3.2.	Wärmeeintrag und –entzug sowie Erdreichtemperaturen .....	77
5.3.3.	Gebäude- und Anlagenperformance .....	86
5.3.4.	Ökologische Bewertung durch Kennzahlen .....	101
5.3.5.	Energiekosten .....	108
5.3.6.	Thermischer Komfort und sommerliche Überhitzung .....	114
6.	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	130
6.1.	Resümee und Erkenntnisse aus der Evaluierung .....	130
6.1.1.	Fehler und Mängel .....	130
6.1.2.	Grundregeln aus dem Monitoring .....	131
6.2.	Ausblick .....	133
7.	Anhang .....	134
7.1.	Veröffentlichungen .....	134
7.2.	Begriffe und Abkürzungen .....	137
7.3.	Quellen und Literatur zum Projekt .....	139
7.4.	Steckbriefe der untersuchten Gebäude .....	141



## 1. ZUSAMMENFASSUNG

Das WKSP- Projekt hat im Rahmen des Forschungsprogramms Energieoptimiertes Bauen (EnOB) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie in den Jahren 2004 bis 2010 insgesamt 11 Bürogebäude, die nach 2000 errichtet wurden, hinsichtlich ihrer Erdreichwärmeübertrager zur kombinierten Wärme- und / oder Kältespeicherung untersucht. Im folgenden Bericht (Teil I) werden die Zielsetzungen und das Vorgehen im Projekt sowie die Ergebnisse aus der Bearbeitung der Grob- und Feinanalyse zusammengefasst. Die Forschungsinhalte aus „PreCon – wetterprognosegeführte Regelung von thermisch aktivierten Bauteilen“ und „Plausibilitätsprüfung der geothermalen Randbedingungen und Numerische Simulation des Temperaturregimes im Gründungsbereich“ sind in den separaten Teilberichten II und III dokumentiert.

### Zielsetzung und Vorgehen

Ziel der im Rahmen des Forschungs- und Demonstrationsprojekts durchgeführten Untersuchungen ist es, die technische und wirtschaftliche Effizienz von Anlagen mit Erdreichwärmeübertrager zu evaluieren, den Aufbau solcher Anlagen zu optimieren und aus den Ergebnissen gesicherte Planungsstrategien zu entwickeln. Diese werden in einem Handbuch zusammengefasst und der Fachwelt zur Verfügung gestellt. Die Nutzbarkeit des vorhandenen und bisher weitgehend ungenutzten Speicher- und Energiepotentials im Gründungsbereich von Bürogebäuden wird durch das Forschungsvorhaben aufgedeckt und publiziert. Durch die wissenschaftliche Untersuchung bestehender Anlagen in Kooperation mit Partnern aus der Industrie wird der Weg vom derzeitigen Status als „Pilotanlagen“ zum anerkannten Stand der Technik vorangetrieben. Diese Technologie kann so einen Beitrag für eine nachhaltige und ressourcenschonende Energieversorgung leisten.

### Systemevaluierung

In einer Grobanalyse - PHASE I – werden 11 in Betrieb befindliche Gebäude mit Anlagen zur kombinierten Wärme- und / oder Kältespeicherung im Gründungsbereich hinsichtlich Planung, Auslegung, baulicher Umsetzung und Baukosten analysiert, dokumentiert und verglichen. Durch den entstehenden Anlagenkatalog werden erste Aussagen hinsichtlich der tatsächlichen Effizienz und Alltagstauglichkeit der unterschiedlichen Konzeptstrategien getroffen.

Die Ergebnisse aus der Forschungsarbeit, der wissenschaftlichen Begleitung von Projekten und die Umsetzung in der Praxis zeigen, dass es möglich und sinnvoll ist, Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund in innovative Energiekonzepte von Büro- und Verwaltungsgebäuden zu integrieren. Es hat sich gezeigt, wie wichtig es ist, die Funktion von Gebäuden und Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich im realen Betrieb aufzunehmen und zu dokumentieren. In Zusammenarbeit mit dem Gebäudemanagement können bei den Gebäuden und Anlagen mögliche Fehler sowie Optimierungspotenziale Schritt für Schritt identifiziert, der Betrieb der Anlagen optimiert und die Einregulierungsphase verkürzt werden.

Deutlich wird auch, dass nicht allein ein stimmiges Energiekonzept und innovative Anlagentechnik zu einem energieeffizienten Gebäude führen. Auch bei einer detaillierten, sorgfältigen Planung ergeben sich im Betrieb häufig Fehlfunktionen, durch die der Energieverbrauch in die Höhe schnellen kann oder der Komfort den Erwartungen nicht entspricht. Daher ist gerade in den ersten Betriebsjahren und über die Projektphasen hinweg eine Qualitätssicherung (Betriebsanalyse und –optimierung) bei den innovativen Konzepten von entscheidender Bedeutung. Nur so kann zum einen sichergestellt werden, dass Gebäude und Anlagen die Pla-



nungsziele und eine dauerhafte Funktionalität erreichen und zum anderen Fortschritte in der Energieeffizienz der Systeme und im Nutzerkomfort erzielt werden.

### **Betrieboptimierung**

In einer Feinanalyse - Phase II - werden über einen Zeitraum von zwei Jahren fünf Anlagen messtechnisch untersucht und dokumentiert. Unter Einbeziehung der thermischen Gebäude- und Anlagensimulation werden Optimierungspotentiale hinsichtlich des Energieertrags und der Betriebsenergie ermittelt und umgesetzt. Das Forschungsprojekt WKSP – ursprünglich zur Evaluierung von Systemen zur Wärme- und Kältespeicherung im Erdreich geplant – hat zusätzliche wichtige Erkenntnisse über die Bedeutung der Einregulierung und Betriebsüberwachung gebracht.

Ein häufig in der Praxis auftretendes Problem ist ein aufgrund fehlerhafter Betriebsweise sowie entsprechend unter- oder überwärmtem Erdreich nicht oder nur sehr eingeschränkt umsetzbarer freier Kühlbetrieb. Die Temperaturdifferenzen zwischen Wärmesenke und Gebäudekühlsystem sind häufig nicht aufeinander abgestimmt, wodurch dieses Problem noch verstärkt wird.

Abgesehen von Totalausfällen der Erdwärmesysteme als Folge von Überhitzung oder Unterkühlung des Erdreichs, können Leistungsmängel der Erdwärmeeinrichtungen sowie signifikante Fehlfunktionen ohne ein messtechnisches Monitoring nicht identifiziert werden. Erst viel später, durch einen u.a. hohen Strom- oder Fernwärmeverbrauch oder mangelnden Komfort in den Büroräumen, werden die Probleme und Fehler in den Anlagen erkannt und können nur in langfristigen Prozessen behoben werden.

Im Rahmen des Monitorings werden nicht nur die Daten aus den Gebäudeautomationssystemen genutzt. Auch die technische Prüfung einer gebäudetechnischen Anlage einschließlich der Funktionen der Regelung bzw. der Gebäudeautomation fließen in die Begleitung der Anlage ein. Die meisten Anlagen können so in einen wirtschaftlichen Betrieb überführt werden.

Entscheidend für den erfolgreichen Betrieb ist in der Regel nicht die Anlage zur Wärme- und Kältespeicherung an sich, sondern die einfache, sinnvolle technische und betriebliche Einbindung und Integration der Systembausteine zur Erdwärmeeinrichtung in das komplexe Gesamtsystem. Hierbei sind alle Anlagen zum Heizen und Kühlen, das Gebäude und das Nutzerverhalten, sowie ganzheitlich aufeinander abgestimmte Regelstrategien zu betrachten.

Bei entsprechender Auslegung und richtigem Betrieb sind die möglichen Energiekosteneinsparungen sowie CO<sub>2</sub> Reduktionen infolge Nutzung von Erdwärmespeichersystemen im Vergleich zu konventionellen Heiz- und Kühlsystemen erheblich. Steigende Energiepreise werden die wirtschaftliche Rentabilität des Einsatzes von Erdwärmesystemen zukünftig weiter verstärken.

Zur Erlangung eines optimalen Betriebs, der angestrebten Wirtschaftlichkeit und volle Nutzerakzeptanz von Erdwärmesystemen sowie effektiver Werkzeuge für den Gebäudebetrieb besteht jedoch weiterer Optimierungs- und Entwicklungsbedarf. Ziel muss es daher sein, die vorhandenen Erfahrungen für zukünftige Projekte zu bündeln, Planungswerkzeuge zu optimieren sowie Betriebsregeln zu entwickeln.

### **Wetterprognosegeführte Regelung**

In Zusammenarbeit mit einem Industriepartner wird eine Wettervorhersagen-gestützte (Predicted Control) Steuerung des Anlagenbereichs Bauteilaktivierung und deren Speicherfähigkeit evaluiert und getestet. Durch eine thermische und anlagentechnische Simulationen werden



die energetischen und wirtschaftlichen Potentiale untersucht und beurteilt. Die Ergebnisse der Bearbeitung sind in Bericht II dokumentiert.

Über die Zusammenfassung der Ergebnisse hinaus erfolgt die Erstellung eines Planungshandbuchs. Hier werden aus den Erfahrungen der analysierten Anlagenvarianten, den entwickelten Optimierungsstrategien und den aufgenommenen Messergebnissen generelle Strategien für die Planung und den Betrieb dieser Anlagen zusammengefasst.

Titel der Publikation: Erdwärme für Bürogebäude nutzen  
ISBN-Nr.: 978-3-410-20515-9  
Verlag: Fraunhofer IRB Verlag



## 2. DAS PROJEKT WKSP

Die Berichterstattung und Dokumentation zu innovativen Bürogebäuden enden meist mit der Fertigstellung der Gebäude und Anlagen, so dass anschließend kaum gesicherte Kenntnisse über die tatsächliche Performance der Gebäude im Vollbetrieb und damit während des größten Teils des Lebenszyklus vorliegen.

Durch die im Monitoring gewonnenen Optimierungsschritte soll der Nachweis erbracht werden, welche energetischen Verbesserungen durch den Einsatz innovativer Technologien und Methoden realisierbar sind. Weiterhin muss ausgearbeitet werden, welche technischen und betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlich effizienten Anlagenbetrieb einzuhalten sind. Durch die Schaffung technisch und wirtschaftlich belastbarer Aussagen können Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Anlagen wesentlich erleichtert und der Entscheidungsprozess eines Bauherrn über die Errichtung einer solchen Anlage beschleunigt werden.

Die Evaluation von Anlagen- und Energiekonzepten dient dazu, die Notwendigkeit der integralen Planung von Gebäuden unter Berücksichtigung von Betrieb und Nutzung zu unterstreichen und ihre Potentiale aufzuzeigen. Die im Projekt angewendeten Methoden zur Analyse und Bewertung von Energie- und Anlagenkonzepten können von Planungsbüros, Tiefbau-Unternehmungen, Anlagenkomponenten-Herstellern, Betreibern und Unternehmen im Facility-Management zur Optimierung des Energiehaushaltes von Gebäuden verwendet werden.

Das Forschungsprojekt „WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude“ soll dazu beitragen, diese o.g. Defizite zu beheben und damit einen Beitrag zur Erreichung der energetischen Ziele leisten. Die Bearbeitung des Projekts wurde Anfang 2004 mit Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie begonnen.

### 2.1. Motivation und Ziele

Die in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Anlagen nutzen das aufgrund der Wärmeleitfähigkeit und Speicherkapazität annähernd ideale Wärmeabsorptionsverhalten des Betons der Gründungsbauwerke aus. Es wird damit das Speichervermögen des umgebenden Erdreiches fast kostenlos verfügbar gemacht. Dies geschieht bei Energiepfahl- und Fundamentabsorberanlagen für den Bauablauf ohne größeren Mehraufwand. Erdwärmesondenfelder bereiten zwar einen gesteigerten Erschließungsaufwand, stellen dafür aber auch eine höher Entzugleistung bereit. Die auf diese Weise erschlossenen Wärme- und Kälteresourcen führen zu einer deutlichen Verringerung der einzusetzenden Primärenergie gegenüber einem konventionellen Gebäudebetrieb.

Die im Sommer durch die Speicherefähigkeit des Erdreiches bereitstehende Kälte kann ohne hohen maschinellen Aufwand direkt zur Kühlung des Gebäudes genutzt werden („Free-Cooling“-Betrieb). Eine konventionelle Klimaanlage kann damit entfallen oder deutlich kleiner dimensioniert werden. Die sonst mit einem hohen Stromverbrauch behaftete konventionelle Kältebereitstellung (Arbeitszahl von 2,5 bei Kompressionskältemaschinen, Primärenergie-Faktor  $2,7 \text{ MWh}_{\text{Pri}}/\text{MWh}_{\text{End}}$ ) reduziert sich bei den hier untersuchten Anlagen auf den Stromverbrauch von Umwälzpumpen und Regelung (Arbeitszahl freie Kühlung  $> 10$ , im Kältemaschinenbetrieb  $> 3$ ). Damit leisten Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich im direkten und indirekten Wege einen Beitrag zur Verminderung des Ausstoßes klimarelevanter Gase. Seit der Unterzeichnung des „Kyoto-Protokolls“ stellt die Senkung der Treibhausgasemissionen die größte umweltpolitische Herausforderung dar.



Durch die kombinierte Einsparung von Wärme und Strom steht dieses Vorhaben in der Reihe mit bereits geförderten Forschungsprojekten wie SolarBau:Monitor und bildet den wissenschaftlichen Hintergrund für Förderprogramme zur CO<sub>2</sub>-Emissionssenkung des Bundes sowie seiner Organe.

Das Forschungs- und Demonstrationsprojekt verfolgt das Ziel, Systeme mit Erdreichwärmeübertragern zur kombinierten Wärme- und / oder Kältespeicherung in Gebäuden im Betrieb zu evaluieren. Dazu werden für alle Gebäude Bestandsaufnahmen durchgeführt und Energiekennwerte gebildet. Anschließend werden in rund der Hälfte der Gebäude vertiefende Analysen durchgeführt. In Bezug auf die Energieeffizienz stehen dabei die Einzelkomponenten im Mittelpunkt. Auf Basis des Monitorings und mit zusätzlichen Analysen der Gebäudeautomation werden Optimierungspotenziale zur Verbesserung des Betriebs aufgezeigt. Die verschiedenen Systeme werden anschließend hinsichtlich ihrer Effektivität qualitativ bewertet. Mit Hilfe der aus der Untersuchung des Speicherverhaltens des Untergrundes gewonnenen Erkenntnisse wird die Nutzung der oberflächennahen Geothermie gefördert und damit ein Beitrag zur ressourcenschonenden und energieoptimierten Bauweise geleistet.

Als Ergebnis des Forschungsvorhabens soll aber nicht nur ein ökologisches Ziel stehen, sondern auch eine ökonomische Alternative zur konventionellen und in der Regel komplexen Gebäudetechnik aufgezeigt werden. Hier ist nicht nur ein Vergleich auf der reinen Investitionskostenebene zu führen, sondern auch eine Betrachtung von Wartungs- und Betriebskosten sowie Nutzerkomfort und -zufriedenheit einzugliedern.

Für eine erfolgreiche Durchführung sind auch die Ergebnisse internationaler Forschung und Expertenwissen zu berücksichtigen. Hierzu bestand eine Teilnahme des Vorhabens im internationalen Kooperationsrahmen der International Energy Agency (IEA).

## 2.2. Aufbau und Methodik

Der Evaluierung der wirtschaftlichen und energetischen Effizienz der Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich sowie der Optimierung der Systemtechnik und der Betriebe der evaluierten Anlagen liegt im Projekt folgende Vorgehensweise aus Grob- und Feinanalyse zu Grunde:

### 1. Grobanalyse (Phase I)

In der Grobanalyse des Projekts steht die anlagentechnische und energetische Grobanalyse der elf ausgewählten Gebäude im Vordergrund. In der Anamnese werden die Anlagen hinsichtlich Planung, Auslegung und baulicher Umsetzung analysiert, dokumentiert und verglichen. Durch Kategorisierung und Kennwertbildung der Anlagen und Anlagengrößen wird eine Vergleichbarkeit geschaffen.

Durch den entstehenden Anlagenkatalog können erste Aussagen hinsichtlich der tatsächlichen Effizienz und Alltagstauglichkeit der unterschiedlichen Konzeptstrategien getroffen werden. Dabei soll eine Beurteilung bezüglich der Erreichbarkeit der in der Planung prognostizierten Energieerträge erfolgen.

In Phase I wird eine Vorauswahl getroffen, welche Systemlösungen als weiteranwendbare Standard-Lösungen zu verfolgen sind bzw. welche Systemkonfigurationen als Individuallösungen zu betrachten sind.

Ein besonderes Augenmerk gilt der ersten Zusammenstellung der für einen betriebswirtschaftlichen und energetisch effizienten Betrieb notwendigen baulichen, geo- und hydrogeologischen sowie ökonomischen Rahmenbedingungen.



## 2. Feinanalyse (Phase II)

In einer Feinanalyse sollen bis zu fünf Anlagen messtechnisch untersucht und dokumentiert werden.

Schwerpunkte der Feinanalyse sind folgende Ziele:

- Primärziel ist es eine Erfolgskontrolle über Funktion und Energieertrag der Anlagen zu erhalten. Dazu werden in jedem Gebäude Wärme- und Kälteerträge, die Regelungsabläufe, der Stromverbrauch der einzelnen Anlagenabschnitte sowie die Wetterbedingungen und Grundwassertemperaturen erfasst und bewertet.
- Gleichzeitig erfolgt die Ausarbeitung des Optimierungspotentials der einzelnen Anlagen. Die Optimierungsansätze werden in die bestehende Regelung der Gebäude implementiert und weiter kontinuierlich analysiert und verbessert. Anhand der Messergebnisse soll eine Erfolgskontrolle durchgeführt werden.
- In einer Analyse des thermischen Komforts und der sommerlichen Überhitzung soll ein möglicher Einfluss der erdgekoppelten Anlagen auf das Raumklima untersucht werden.

Aufbauend auf Phase II soll eine Wettervorhersagen-gestützte (Predicted Control) Steuerung der Anlagenbereiche Bauteilaktivierung und deren Speicherfähigkeit evaluiert und getestet werden. Die energetischen und wirtschaftlichen Potentiale werden dabei durch thermische und anlagentechnische Simulationen untersucht und beurteilt. Dies geschieht in enger Kooperation mit einem Industriepartner.

Auf Basis der analysierten Anlagenvarianten, der gewonnenen Messergebnisse sowie der entwickelten Optimierungsstrategien werden in einem Planungs- und Betreiberleitfaden standardisierte Systemkonzepte dokumentiert. Mit diesem Handbuch soll ein Beitrag zur weiteren Verbreitung dieser zukunftsweisenden Technologie in die bauliche Praxis geleistet werden.

Die Bearbeitung des Projekts erfolgt durch das IGS – Institut für Gebäude- und Solartechnik in der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit den beiden Kooperationspartnern IGB – Institut für Grundbau (TU Braunschweig) und der Firma meteocontrol GmbH (Augsburg).



### 2.3. Projektdaten und Fördergeber

<b>Projekttitle</b>	WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude
<b>Kurztitel</b>	WKSP
<b>Projektnummer</b>	0327364A
<b>Projektförderung</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
<b>Projektträger</b>	PTJ - Projektträger Jülich - Forschungszentrum Jülich GmbH Herr Rolf Stricker
<b>Projektlaufzeit</b>	01.07.2004 – 30.06.2009 (Verlängerung: 28.02.2010)
<b>Ausführende Stelle</b>	Technische Universität Braunschweig Institut für Gebäude- und Solartechnik Univ.- Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch
<b>Bearbeitung</b>	Dipl.-Ing. Franziska Bockelmann (Projektleiter) Dipl.-Ing. Herdis Kipry Dipl.-Ing. Christian Sasse Dipl.-Ing. Markus Peter Dipl.-Ing. Dörte Blenke
<b>Wiss. Hilfskräfte</b>	Ivan Grgic, Anna Allenstein, André Gerken, Jonathan Nestler, Thomas Rast, Sonja Bockemühl, Victor Schwabauer, Silke Schmidt und Anna Kipping

### 2.4. Wissenschaftliche Projektpartner

Institut für Grundbau - IGB, TU Braunschweig	Dipl.-Ing. Christian Kuhn Eckhard Feistel
meteocontrol GmbH	Bettina Zoczek Ralph Cerny



### 3. STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK

Nachdem sich in der Bundesrepublik Deutschland der Gedanke des energiesparenden Bauens im Sektor des Wohnungsbaus fest etabliert hat, setzt sich auch auf dem Bereich der Bürogebäude das Bestreben hin zur energieeffizienten Bauweise in den letzten Jahren durch. Die Energieeffizienz eines Bürogebäudes wird neben der Gebäudehülle maßgeblich durch die eingesetzte Anlagentechnik bestimmt. Eine funktionierende Einheit können beide Komponenten nur bilden, wenn ein integrales Energiekonzept für das Gesamtsystem Gebäude und Anlagentechnik im Vorfeld der Fertigstellung zum Tragen gekommen ist. Das Ziel der Konzeptentwicklung ist hierbei ein bestmöglicher thermischer, akustischer und visueller Nutzerkomfort bei gleichzeitiger Realisierung kostenoptimaler Maßnahmenkombinationen.

Um die Ziele Primärenergiebedarfs- und Kostensenkung zu realisieren, wird in modernen energieeffizienten Bürogebäuden seit einigen Jahren die Gründung oftmals in Verbindung mit dem umgebenden Erdreich zur Wärme- und Kältespeicherung genutzt. Hierbei werden die aus statischen Gründen vorhandenen massigen Fundamentbodenplatten („Fundamentabsorber“) oder die Pfahlgründung („Energiepfähle“) synergetisch verwendet. Durch gründungsstatische Gesichtspunkte wird dabei die wärmeübertragende Fläche begrenzt. Ein weiterer Weg die Wärme-/Kältespeicherfähigkeit des Untergrundes zu erschließen, ist je nach Anwendungsfall die Umsetzung von zusätzlichen oder reinen Erdwärmesondensysteme.

Die Entwicklung der Systemkonzepte erfolgt jeweils angepasst an die geologischen und geotechnischen Verhältnisse, die Baukonstruktion sowie den Wärme- und Kältebedarf des Gebäudes. Standardisierte Planungsverfahren oder Systembausteine existieren derzeit nicht. Eine wissenschaftliche Evaluierung sowohl realisierter Anlagen als auch sich im Bau befindlicher Systeme, bietet damit den Grundstock zur Entwicklung abgesicherter Planungsinstrumente für Bauindustrie, Bauherren, Anlagenerrichtern sowie Fördermittelgebern.

#### 3.1. Erdreichwärmeübertrager

Energiepfahl- (EP) und Bodenabsorberanlagen (BA) sind ans Erdreich angrenzende Wärmetauscher, die in ein ohnehin statisch vorzusehendes Gründungsbauwerk integriert werden. Die gute Wärmeleitfähigkeit des Betons und die direkte Verzahnung von Gründungsbauwerk und Erdreich fördern dabei die energetische Nutzung des Gründungsbereiches als saisonalen Wärme-/ Kältespeicher. Die wärmeübertragende Fläche hängt bei Pfahlssystemen von der Pfahllänge und den eingelegten Rohrlängen ab. Die Pfahllänge ist dabei eine rein von statischen Gesichtspunkten veränderbare Größe. Pfahllängen liegen bei üblichen Baugrundverhältnissen im Bereich von 7 bis 30 bis hin zu 80 m [01].

Neben den beiden genannten weit verbreiteten Ausführungsformen Energiepfahl und Bodenabsorber können alle erdanliegenden Betonbauteile als sog. Energieabsorber verwendet werden. Weitere Anwendungsbeispiele sind die Aktivierung von Schlitzwände und Tunnelschalen. Bei all diesen Ausführungsvarianten kommen für die Bauteildurchströmung PE oder HDPE Rohre von durchschnittlich 20 mm bis 25 mm Durchmesser zum Einsatz. Diese werden entweder vor Ort (Beispiel: Bohrpfähle) oder ab Werk (Beispiel: Fertigrammpfähle) an die Bewehrungskörbe montiert. Eine werksseitige Montage bietet die Vorteile der höheren Qualitätssicherheit und der rationelleren Leitungsinstallation [01].

Analog zu Energiepfählen und anderen Erdreichwärmeübertragern können Erdwärmesonden (EWS) (Tiefenbereich meist 50 - 100 m) zur saisonalen Wärmespeicherung eingesetzt wer-

den. Im Vergleich zu Energiepfählen und Bodenabsorbern weisen Erdwärmesonden aufgrund des höheren Erschließungsaufwandes höhere Investitionskosten auf (Tabelle 1).

Durchschnittliche Kostenangaben für die Herstellung von Fundamentabsorbern sind in der Literatur nur selten zu finden. Hier besteht die Schwierigkeit, dass diese Anlagen im Gegensatz zur Erdwärmesonde oder dem Energiepfahl gewöhnlich Individuallösungen darstellen.

In Tabelle 1 sind für die Erdreichwärmeübertrager Erdwärmesonde, Energiepfahl und Bodenabsorber Richtwerte für Investitionskosten bezogen auf die Baugröße oder Leistung aufgeführt. Zusätzlich zu den hier aufgeführten spezifischen Kosten entstehen weitere Kosten für geologische Voruntersuchungen, wie dem Thermal Response Test oder Aufschlussbohrungen als auch für Genehmigungen, etc.

**Tabelle 1:** Richtwerte für die spez. Kosten von Erdreichwärmeübertragern

<b>System</b>	<b>spez. Kosten</b> bezogen auf Baugröße	<b>spez. Kosten</b> bezogen auf Leistung
<b>Erdwärmesonde (EWS)</b>	50 – 65 €/m	500 – (1500) €/kW
<b>Energiepfähle (EP)</b>	30 – 40 €/m	ca. 500 €/kW
<b>Bodenabsorber (BA)</b>	≥ 20 €/m <sup>2</sup>	1000 – 2000 €/kW

Kennwerte der spezifischen Entzugsleistung für Anlagen bis 30 kW können der VDI 4640 [17] entnommen werden. Für größere Anlagen sowie für den kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb bzw. den reinen Kühlbetrieb gibt es keine entsprechenden Richtwerte in der VDI-Richtlinie. Für diese Systeme müssen Anhaltswerte für Entzugs- und Eintragsleistungen aus der Literatur und aus Herstellerangaben entnommen werden. Entsprechende Richtwerte für die spezifischen thermischen Entzugs- und Eintragsleistung von Erdreichwärmeübertragern sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Bei Verwendung der aufgeführten Leistungen ist darauf zu achten, dass diese nur Richtwerte darstellen. Die tatsächlich realisierbaren Leistungen können je nach Bodeneigenschaften und Randbedingungen stark variieren.

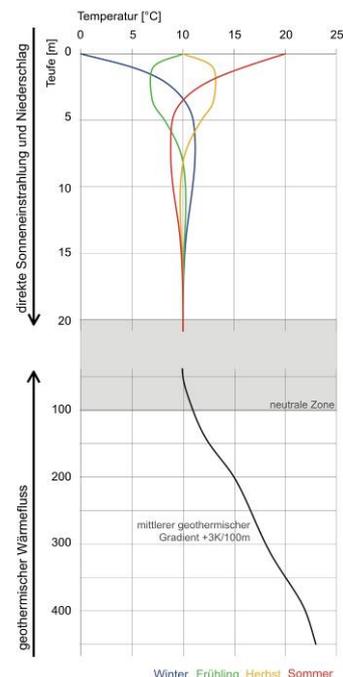
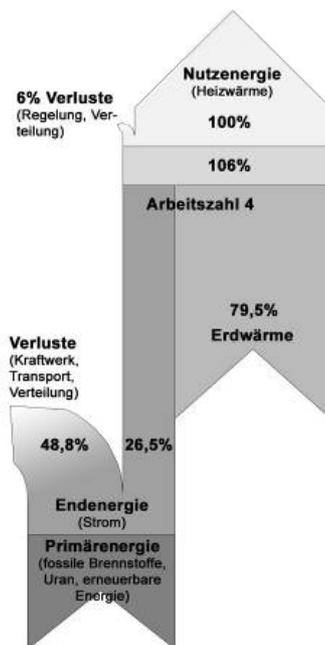
**Tabelle 2:** Richtwerte für die spez. therm. Entzugs- und Eintragsleistung von Erdreichwärmeübertragern

	Erdsonden		Energiepfähle		Boden	Erdkollektoren		Bodenabsorber		Brunnen	Quelle
	Wärmeentzug (Heizen mit WP) [W/m]	Wärmeentrag (Freie Kühlung) [W/m]	Wärmeentzug (Heizen mit WP) [W/m²]	Wärmeentrag (Freie Kühlung) [W/m²]		Wärmeentzug (Heizen mit WP) [W/m²]	Wärmeentrag (Freie Kühlung) [W/m²]	Wärmeentzug (Heizen mit WP) [W/m²]	Wärmeentrag (Freie Kühlung) [W/m²]		
Anlagen < 30 kW, reiner Wärmeentzug, Betriebsstunden 1800h / 2400h											
schlechter Untergrund (trockenes Sediment) $\lambda < 1,5 \text{ W/(m·K)}$ Normaler Festgesteins-Untergrund und wassergesättigtes Sediment $\lambda = 1,5\text{-}3,0 \text{ W/(m·K)}$ Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit $\lambda > 3,0 \text{ W/(m·K)}$	25 / 20	-	-	-	Trockener, nichtbindiger Boden	10 / 6	-	-	-	-	VDI 4640
	60 / 50	-	-	-	Bindiger Boden, feucht	20 - 30 / 16 - 24	-	-	-	-	
	84 / 70	-	-	-	Wassergesättigter Sand/Kies	40 / 32	-	-	-	-	
Entzugs- / Eintragsleistung	40 - 80	20 - 60	$\varnothing < 60 / \varnothing > 60$	$\varnothing < 60 / \varnothing > 60$		20 - 30	-	20 - 50	10 - 30	5 - 6	Zent-Fenger, www.geothermie-energy.ch, Kumbien
	[kWh/m · a]	[kWh/m · a]	[kWh/m · a]	[kWh/m · a]		[kWh/m² · a]	[kWh/m · a]	[kWh/m · a]	[kWh/m · a]	[kWh/m · a]	
Entzugs- / Eintragsenergie	100 - 150	kann von Wärmeentzug abweichen	$\varnothing = 40$	40 - 90		18 - 75					Hochschule Eberach, www.geothermie-energy.ch, enerciet

### 3.2. Betriebsweisen – Prinzip der saisonalen Speicherung

Im Allgemeinen gibt es für die Anlagen folgende vier typische Betriebsweisen [02]:

1. Heizbetrieb: Dem Untergrund wird über die Erdreichwärmeübertrager Wärme entzogen (Primärkreislauf). Eine Wärmepumpe hebt das Temperaturniveau auf das benötigte Temperaturniveau im Sekundärkreislauf an. Die Wärme wird über die thermisch aktivierten Bauteile an die Räume abgegeben. Das kalte aus dem Wärmepumpenrücklauf in die Wärmetauscher zurückströmende Trägermedium kühlt den Untergrund langsam ab (siehe Abbildung 1).
2. Heizbetrieb: Reicht die Heizwärmeleistung des Wärmepumpen-/ Wärmetauschersystems nicht mehr aus, wird zusätzlich erforderliche Heizleistung über ein redundantes System (z.B. Fernwärme, Kessel) bereitgestellt.
3. Kühlbetrieb: Der durch den Heizbetrieb im Winter abgekühlte Untergrund dient nun als Wärmesenke. Im sogenannten „Free-Cooling“-Betrieb (freie Kühlung) wird kühle Flüssigkeit direkt (nur über einen Plattenwärmetauscher) aus dem Wärmeübertrager im Erdreich in die thermisch aktivierten Bauteile gefördert. Hier nimmt sie Wärme auf und gibt sie über die Wärmeübertrager wieder an den Untergrund ab.
4. Kühlbetrieb: Sinkt mit der Zeit die durch die Wärmeübertrager bereitgestellte Kühlleistung, kann diese durch eine bivalente Kältemaschine bzw. eine andere Kältetechnik ergänzt werden.



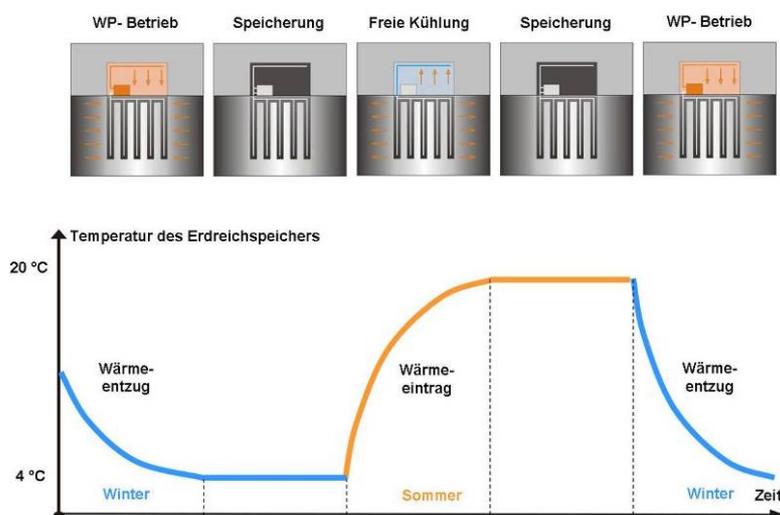
**Abbildung 1:** Energieflussschema zur Nutzung der Wärme- und Kältespeicherung im Gründungserdreich eines Gebäudes (Energiepfähle) mit Hilfe einer Wärmepumpe mit COP 4 (links); Temperaturverlauf im Erdreich von 0 bis 400 m Tiefe (rechts).

Bei der thermischen Nutzung des Erdreichs zum Heizen und Kühlen von Gebäuden wird im saisonalen Wechsel über ein in Rohrschleifen zirkulierendes Wärmeträgerfluid Wärme aus dem Boden entzogen bzw. in den Boden eingetragen.

Von Vorteil bei der Nutzung des Erdreichs zum Heizen und Kühlen von Gebäuden ist das relativ konstante Temperaturniveau des Erdreichs über das Jahr. So kann das Erdreich beispielsweise auch bei hohen Außentemperaturen im Sommer noch effizient im freien Kühlbetrieb, ohne den Einsatz von Kältemaschinen, genutzt werden. Das im Gebäude erwärmte Wärmeträgerfluid wird im Erdreich wieder heruntergekühlt und bildet damit den Grundstock der Wärmespeicherung im Untergrund.

Voraussetzung für die langfristige Funktionalität des Systems ist allerdings, dass das im Sommer infolge des Wärmeeintrags erwärmte Erdreich über den Winter wieder aktiv abgekühlt wird und umgekehrt.

Der Wärmeentzug im Winter erfolgt mittels einer Wärmepumpe, welche das Wärmeträgermedium auf das zum Heizen des Gebäudes erforderliche Temperaturniveau anhebt. Die Quelltemperaturen liegen bei der Wärme- und Kältespeicherung im Erdreich relativ nah an den zum Heizen und Kühlen erforderlichen Systemtemperaturen. Die mögliche Temperaturspreizung ist im Vergleich zu anderen Heiz- und Kühlsystemen daher relativ klein. Um die erforderlichen Heiz- und Kühlleistungen dauerhaft erreichen zu können, ist eine sorgfältige Anlagenplanung, eine der Planung entsprechende Umsetzung sowie eine Betriebskontrolle erforderlich.



**Abbildung 2:** Idealisiertes Prinzipschema der saisonalen Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund

### 3.3. Einflussfaktoren und Randbedingungen

Einflussfaktoren auf die Entzugsleistung sind bei einer energetischen Bewirtschaftung des Erdreiches folgende [03]:

- Energiekonzeption des Bauwerks
  - Bewirtschaftungs- und Nutzungsart
  - Wärme- und/oder Kältebedarf
  - Fließgeschwindigkeit innerhalb der Rohrleitungen

- Jahreszeitlicher Betriebsplan (Heiz- und/oder Kühlintervalle)
- Anordnung, Abstand, Geometrie, Herstellungsart und Betoneigenschaften der Pfähle, Schlitzwände, usw.
- Klimatische Bedingungen
- Bodenphysikalische Eigenschaften
  - Wassergehalt
  - Dichte und Porengehalt
  - Durchlässigkeit
  - Quell- und Schrumpfverhalten
  - Frost-Tau-Verhalten
  - Spannungs-/Verformungsverhalten
- Thermische Bodeneigenschaften
  - Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Sättigungsgrad, Porenanteil und Wichte
  - Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur des Bodens
- Hydrogeologische Eigenschaften des Untergrundes
  - Tiefe und Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels
  - Grundwasserströmung und Fließgeschwindigkeit

Diese Einflussfaktoren sind bei der Auslegung zu betrachten und daraus die Leistungsfähigkeit der geplanten Anlage richtig zu bestimmen. Grundlage für eine fachgerechte Auslegung bilden ein Baugrundgutachten, ein sog. „Thermal-Response-Test“ sowie bei kleinen Erdwärmesondenprojekten (bis 30 kW) die Berechnungsgrundlagen der VDI 4640.

Bei den im Rahmen des Projektes zu untersuchenden größeren Objekten sind die Angaben der VDI 4640 nicht mehr ausreichend und z. B. auf Energiepfehlanlagen u. ä. nicht übertragbar. Hier müssen je nach Projekt unterschiedlich komplexe deterministische oder numerische Berechnungsprogramme herangezogen werden. Hierbei gibt es einige weniger komplexere Programme, die aber aufgrund ihrer Simplifikation nur auf beschränkte Fragestellungen anwendbar sind. Als Beispiel ist hier das Programm „Earth Energy Designer“ - kurz EED - für die Erdwärmesondenberechnung zu nennen [04].

Für die Auslegung großer Anlagen (>100 kW), bieten sich Programme wie TRNSYS [05] mit seinen Zusatzmodulen [06] [07] oder auf FE-Methoden basierende Programme an [08] [09]. Die Stärke von TRNSYS liegt in der Simulation des Zusammenspiels von einzelnen Anlagenkomponenten, wodurch es sich mittels Implementierung von Wetterdatensätzen gut für die Lastfallsimulation eignet. Schwachpunkte von TRNSYS liegen in der Vereinfachung der geologischen Verhältnisse, wie dem an den Grundwasserstrom gekoppelten Wärmetransport. Hier sind FEM-Programme leistungsfähiger. Mit Ihnen können die geologischen Gegebenheiten, wie Schichtungen usw., räumlich nachgebildet werden. Nachteil dieser Programme ist, dass sie für die hier zu untersuchenden Fragestellung noch nicht zur Verfügung stehen.

Weiterhin gibt es auf Basis von TRNSYS Module, die speziell für einzelne am Markt agierende Firmen entwickelt wurden und somit nicht frei verfügbar sind.

## 4. PHASE I - GROBANALYSE

Neuer innovative Energieversorgungskonzepte können nur erfolgreich eingeführt werden, wenn sie neben einer gesicherten wissenschaftlichen Basis auch unter wirtschaftlichen und praxisrelevanten Prämissen entwickelt werden.

Das Forschungsvorhaben hat daher das Ziel, die Effizienz der Kälte- und Wärmeversorgung von Bürogebäuden durch Nutzung der Speicherfähigkeit des Gründungsbereiches zu untersuchen, zu evaluieren und zu optimieren. Im Fokus der Evaluierung stehen dabei Erdwärmesonden-, Energiepfahl-, und Bodenabsorberanlagen.

### 4.1. Methodik und Vorgehen bei der Auswertung

In der Grobanalyse erfolgt eine Bestandsaufnahme von elf Gebäuden mit erdgekoppelten Wärmeübertragern unter den Aspekten Geologie, Geotechnik, Gebäudegründung, Gebäudekonstruktion, technische Gebäudeausrüstung, Energiekonzept, Bau- und Betriebskosten. Gebäudebetreiber stellen, soweit vorhanden, Baugrunduntersuchungen, Thermal Response Tests, Gebäude- und Anlagensimulationen, Wärmeschutznachweise, Angaben zum Fundament, Anlagen- und Gebäudepläne sowie Unterlagen zur Anlagenauslegung zur Verfügung.

Besonderes Augenmerk bei der Bestandsaufnahme wird auf die in der Planung prognostizierte Anlageneffizienz und daraus bestimmten Energieerträge und Jahressystemarbeitszahlen gelegt. Die Anlagen zur kombinierten Wärme- und Kältespeicherung werden dokumentiert und gegenüber gestellt, wobei insbesondere die unterschiedlichen Konzeptstrategien herausgearbeitet werden.

Grundstock der **PHASE I** bilden die folgenden beiden Arbeitsschritte:

- **Objekterfassung:** Vororttermine, Sichtung und Erfassung der Gebäudeunterlagen sowie der Anlagentechnik mit Schwerpunkt auf den erdreichgekoppelten Wärmeaustauschern (Pläne, Wärmeschutznachweis, Baugrundgutachten, Anlagenauslegung, Funktionsbeschreibungen, Investitionskosten)
- **Analyse und Dokumentation:** Analyse der erfassten Daten, Kennwertbildung (Energieverbrauch, Energieertrag, spezifische Baukosten, Betriebskosten, vergleichende Studien)

#### 4.1.1. Objektauswahl

Die Gebäudeauswahl umfasst Verwaltungs- und Bürobauten mit besonderen als auch herkömmlichen energetischen Konzepten im Bereich der Nutzung von oberflächennaher Geothermie. Der Vergleich zwischen innovativen Konzepten mit dem „normalen“ Standard soll so ermöglicht werden. Bei der Auswahl der Gebäude wird eine repräsentative Mischung aus bis jetzt realisierten Anlagentypen getroffen. Ein objektiver Vergleich zeigt die Unterschiede der jeweiligen Anlagentypen. In das Forschungsvorhaben werden nur Verwaltungs- und Bürogebäude aufgenommen, die nach ihrer Fertigstellung schon mindestens ein bis zwei Jahre genutzt wurden. Auf diese Weise werden repräsentative Werte für Betrieb, Nutzungsverhalten und Energieverbräuche erfasst.

#### 4.1.2. Objekterfassung

Das IGS führt die Bestandsaufnahme der Gebäude in enger Zusammenarbeit mit Gebäudetechnikern vor Ort sowie mit den zur Verfügung stehenden Unterlagen durch. Den Grundstock



der Objekterfassung bilden Ausführungspläne, Wärmeschutznachweise, bisher soweit vorhandene erfasste Verbrauchswerte, Auslegungsunterlagen zur Anlagentechnik, Funktionsbeschreibungen und Regelschemata, Investitionskosten- und Leistungsverzeichnisse sowie Baugrundgutachten und gegebenenfalls wasserrechtliche Genehmigungsunterlagen.

Die geologische und geothermale Erfassung der Parameter des Untergrundes der hier untersuchten Erdwärmespeicher ist dem dritten Teil des Forschungsendberichts zu entnehmen (Teil III). Dabei wird zudem auf die Bewertung des Umfangs und der Qualität der im Planungsstadium ermittelten Baugrundparameter sowie die Beurteilung zur Eignung der geplanten Erdwärmenutzung eingegangen.

Die gesamte Dokumentation und Aufnahme der Gebäude und deren Erdwärmespeicher erfolgt über Steckbriefe, welche dem Anhang zu entnehmen sind (Kapitel 7.4).

#### Anmerkung:

Bei der Objekterfassung können leider bei keinem der analysierten Gebäude aussagekräftige Daten und Informationen zu den Investitionskosten ermittelt werden.

## **4.2. Einbindung der Erdwärmespeicher in das Gebäude (Heiz- und Kühlkonzepte)**

Insgesamt werden nachfolgend neun Büro- und Verwaltungsgebäude und zwei Bibliotheken mit ihren Heiz- und Kühlkonzepten vorgestellt, die innerhalb des Forschungsprojektes erfasst werden. Alle Gebäude werden im Zeitraum zwischen 2002 und 2007 fertig gestellt. Eine detaillierte Gebäudeübersicht mit Angaben zu den Gebäuden, Erdwärmespeichern, Übergabesystemen, etc. liefert Tabelle 3.



Die Gebäudeauswahl umfasst Systeme mit Erdwärmesondenspeicher, Energiepfahlanlagen und Bodenabsorber. Alle Erdwärmesysteme werden zum Heizen mittels einer Wärmepumpe und zum Kühlen im freien Kühlbetrieb genutzt. In einigen Anlagen ist zusätzlich eine an das Erdreich gekoppelte Kältemaschine integriert.

Für die Funktionalität der Anlagen ist nicht nur die Integration des Erdwärmespeichers in das gesamte Heiz- und Kühlsystem, sondern auch das Gebäude- und Nutzungskonzept von wesentlicher Bedeutung. Nachfolgend werden die wesentlichen architektonischen Aspekte sowie die Gebäudenutzung erläutert. Zusätzlich zur Beschreibung der Gebäude erfolgt eine schematische Darstellung der Erdwärmesysteme und deren Einbindung in das gesamte Heiz- und Kühlsystem für jedes Gebäude differenziert nach Heiz- und Kühlbetrieb.

Die verwendeten Symbole entsprechen der Legende in Abbildung 3.

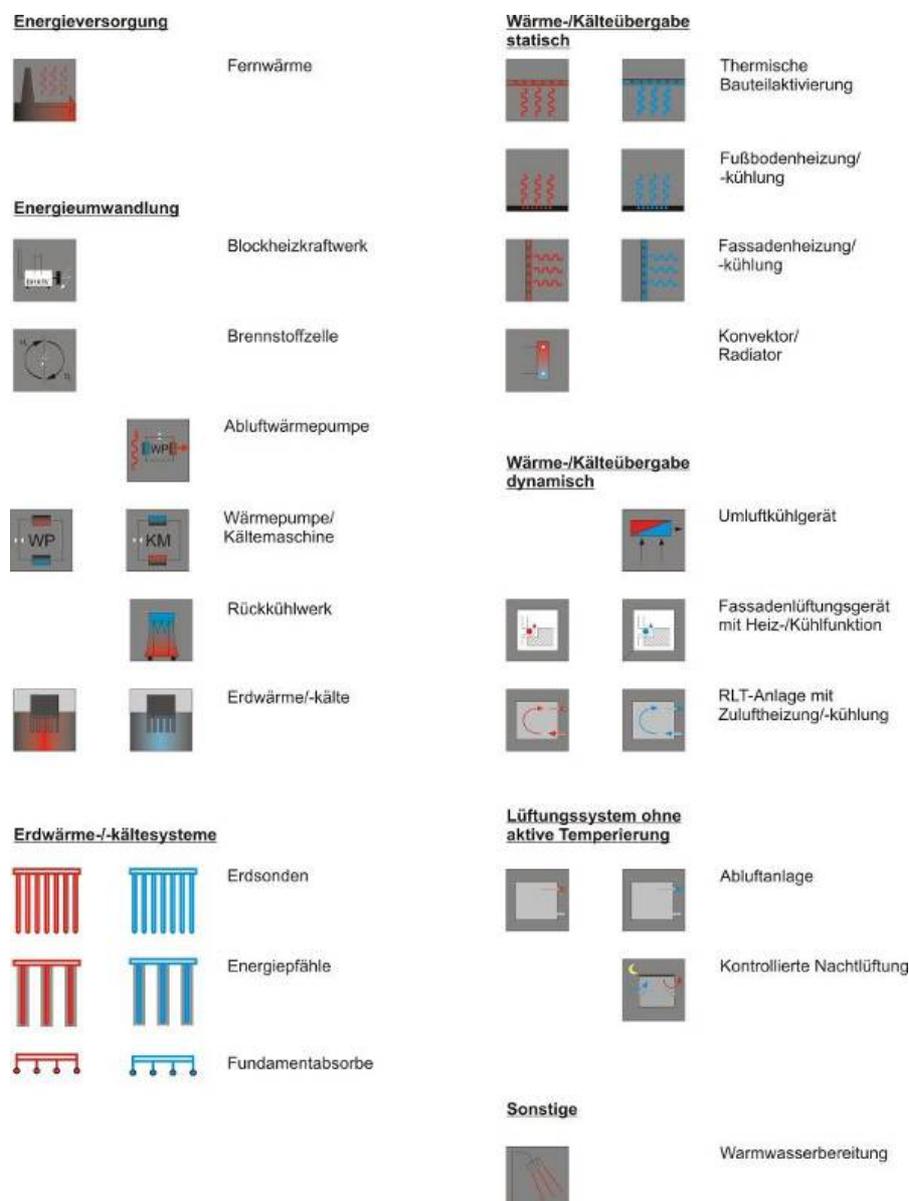


Abbildung 3: Legende zu den Heiz- und Kühlkonzepten



#### 4.2.1. Gebäude RIC, Hamburg (RIC)

Das Gebäude RIC wurde 2002 bezogen. Zehn Meter ragt die geöffnete Seite über die Polderkante hinaus. Der Eingang befindet sich auf der der Elbe abgewandten Seite auf Tiefgaragenhöhe im Polder. Von hier aus gelangt man direkt in das Foyer und zu den Erschließungstreppen. Durch eine 15 Meter breite, verglaste Polderwand fällt reichlich Tageslicht in den Raum. Im darüber liegenden Erdgeschoss sowie dem 1. bis 4. Obergeschoss sind Büros untergebracht. Zellenbüros befinden sich in den nach außen orientierten Bereichen. Die zum Innenhof orientierten Zonen sind zu Großraumbüros zusammengefasst.

Die umlaufende 50 cm tiefe Doppelfassade wurde als „Korridorfassade“ mit einzelnen vertikalen Schotts ausgeführt und schützt das Innere gegen Sonneneinstrahlung, Kälte und Schallimmissionen. Der Sonnenschutz besteht aus beweglichen Vertikallamellen im Fassadenzwischenraum. Zuluftöffnungen in Höhe der Geschosdecken ermöglichen sowohl eine Belüftung des Fassadenzwischenraums als auch eine Frischluftversorgung der Büros. Eine Abluftanlage sorgt für einen ständigen Unterdruck im Gebäude, so dass Außenluft über Ansaugleitungen in der Doppelfassade nachströmt. Eine Konditionierung der Zuluft erfolgt über Luftboxen, die auf der Innenseite der Fassade im Bodenbereich installiert sind.

Neben der Doppelfassade ist die saisonale Wärmespeicherung über Erdsonden wesentlicher Bestandteil des Energiekonzepts des 5-geschossigen Bürogebäudes. Die Anlage besteht aus 17 je 99 m tiefen Sonden. Im Sommer wird mit der Kälte des Bodens gekühlt. Das Sondenfeld wird im Eingangsbereich für eine Fußbodenkühlung und in den Bürobereichen für die Betonkerntemperierung sowie zur Zuluftkonditionierung über die Luftboxen verwendet. Einen zusätzlichen Kälteerzeuger gibt es nicht. Im Winter nutzt eine Wärmepumpe das Erdreich als natürliche Energiequelle. Versorgt werden entsprechend dem Sommerbetrieb Heizflächen im Fußboden des Foyers, die Betonkernaktivierung sowie die Luftboxen. Zur Nachheizung verfügt das Gebäude zusätzlich über eine Abluftwärmepumpe sowie einen Fernwärmeanschluss.

Eine Nachheizung über die Fernwärme erfolgt erst, wenn die Leistung des Erdreichs bzw. der Wärmepumpe und der Abluftwärmepumpe nicht mehr ausreicht. Die Integration der Fernwärmenachheizung ermöglicht Systemtemperaturen oberhalb der für Erdwärme üblichen Werte. So kann auch noch bei extrem niedrigen Außentemperaturen die erforderliche Heizleistung zur Zulufterwärmung über die Luftboxen gewährleistet werden. Für die Betonkernaktivierung ist allerdings durch eine Rücklaufbeimischung eine Anpassung auf die für dieses System sinnvolle Temperatur erforderlich. Bei hohen Außenlufttemperaturen im Sommer erreicht die Zuluftkühlung aufgrund verhältnismäßig hoher Vorlauftemperaturen ihre Grenzen. Dennoch sind im Vergleich zur Fensterlüftung niedrigere Zulufttemperaturen möglich.

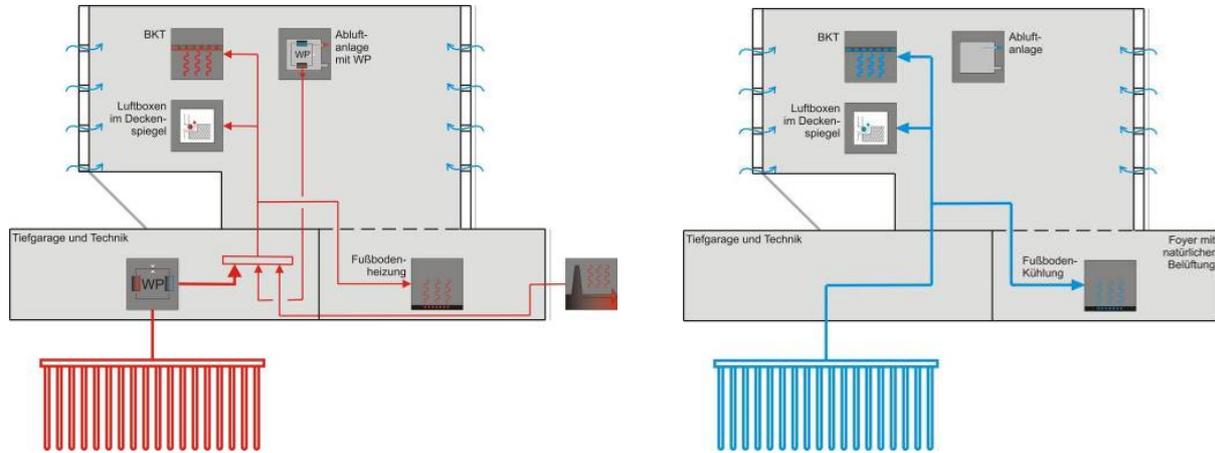


Abbildung 4: Energiekonzept Gebäude RIC, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)

### Gebäudedaten im Überblick

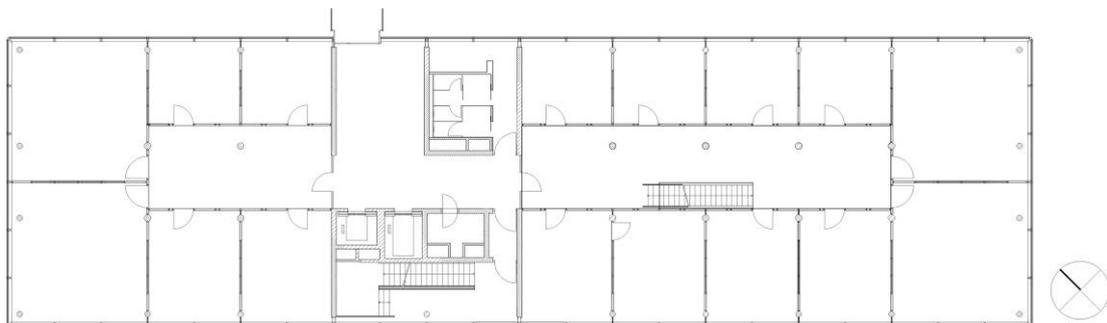
Proj. 1 - Gebäude RIC, Hamburg (RIC)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen			Eckdaten	
BGF	10.886 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	225 kW	22,7 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2002
NGF	9.920 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	128 kW	12,9 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	EWS
A <sub>N</sub>	8.280 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf (nach WSV 95)	484 MWh/a	48,8 kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

#### 4.2.2. Hauptverwaltung der Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen (GEW)

Die Hauptverwaltung der Gelsenwasser AG, bestehend aus einem Alt- und einem Neubau, hat ihren Sitz an der Willy-Brand-Allee 26 in Gelsenkirchen. Der neue Baukörper wurde 2004 fertig gestellt. Mit seinen Abmessungen bildet der Neubau einen gläsernen Zwilling zum Altbau. Die Erschließung der beiden Gebäude erfolgt über ein gemeinsames Foyer im Erdgeschoss des Altbaus. Zwei gläserne Brücken verbinden die Gebäude miteinander und ermöglichen den Zugang zum Neubau. Letzterer besteht aus sieben Vollgeschossen, einem Staffelgeschoss sowie einem Untergeschoss mit Technik und EDV-Räumen. Die interne Erschließung erfolgt über zwei Aufzüge und ein Treppenhaus. Der Neubau hat eine Brutto-Grundfläche (BGF) von etwa 7.100 m<sup>2</sup>. In den Bürogeschossen dient ein breiter Mittelgang als Kommunikationszone. West- und östlich vom Mittelgang liegen Einzel- und Gruppenbüros. Besprechungsräume und zweigeschossige Wintergärten befinden sich im nördlichen Kopfbereich. Die südlichen Kopfbereiche werden zum Teil für Großraumbüros genutzt. Im Staffelgeschoss sind ein großer Konferenzraum mit Dachgarten sowie eine Lüftungszentrale untergebracht.



**Abbildung 5:** Altbau „Weißes Haus“ und Neubau „Transparentes Haus“ der Hauptverwaltung Gelsenwasser AG – Nord und Süd-West Ansicht [Quelle: IGS]



**Abbildung 6:** Grundriss Erdgeschoss, „Transparentes Haus“ Hauptverwaltung Gelsenwasser AG [Quelle: Anin Jeromin Fitolidis & Partner, Düsseldorf]

Besondere Anforderungen an das Energiekonzept des Neubaus stellt der hohe Verglasungsanteil des 7-geschossigen Verwaltungsgebäudes. Die Erdwärmeanlage zum Heizen und Kühlen, bestehend aus 36 jeweils 150 m langen Erdwärmesonden, ist Kernstück dieses Energiekonzepts. Im Winter erfolgt der Wärmeentzug aus dem Erdreich mit Hilfe einer Wärmepumpe. Die Wärme dient im Neubau sowohl zur Raumheizung über die Deckensegel als auch zur Konditionierung der Zuluft.

Die Kälte aus dem Erdreich wird entweder im freien Kühl- oder im Kältemaschinenbetrieb genutzt. In das Kühlkonzept des Neubaus wurde auch der Altbau mit einbezogen. So werden neben den Deckensegeln im Neubau auch das Fassadenkühlsystem und die Lüftungsanlage für den Konferenzbereich im Altbau mit Kälte versorgt. Abgesehen von einer DCS-Anlage (Desiccant Cooling) zur Zuluftkühlung der Büroflächen (EG, 1. bis 6. OG) sowie des Besprechungsraums im 7. OG wird der Neubau monovalent über das Erdreich beheizt und gekühlt. Bei der DCS Anlage erfolgt die Kühlung der Zuluft über Trocknungsprozesse. Hier kommt die Wärme eines ansonsten zur Beheizung des Altbaus vorgesehenen BHKW zum Einsatz. Zusätzlich zur mechanischen Lüftung besteht die Möglichkeit der natürlichen Nachtlüftung und Abführung von warmer Raumluft über spezielle wie Kiemen ausfahrbare Lüftungsöffnungen in der Fassade.

Beim Neubau der Hauptverwaltung der Gelsenwasser AG wird das Erdreich nicht nur zur Grundlastdeckung sondern in Kombination mit den flinken Deckensegeln auch zur Spitzenlastdeckung eingesetzt. Hinzu kommen der Anspruch eines recht hohen thermischen Komforts und einer möglichst individuellen Regelbarkeit der Raumtemperatur. Realisiert wird dieses Ziel mit einer Wärmepumpe, die bei Kühlbedarf im Gebäude nicht nur das Erdreich, sondern auch das Gebäude selbst als Wärmequelle nutzt. Es kann also zeitlich parallel geheizt und gekühlt werden. Aber auch als reine an das Erdreich gekoppelte Kältemaschine ist die Wärmepumpe im Sommer einsetzbar.

Vorteil dieses Systems ist die Möglichkeit der doppelten Nutzung des thermischen Wärmepumpenprozesses und die daraus resultierende Flexibilität im Betrieb. Der Effizienz der parallelen Wärme- und Kältenutzung steht allerdings der zumeist weniger effiziente Teillastbetrieb aufgrund der Spitzenlastauslegung entgegen.

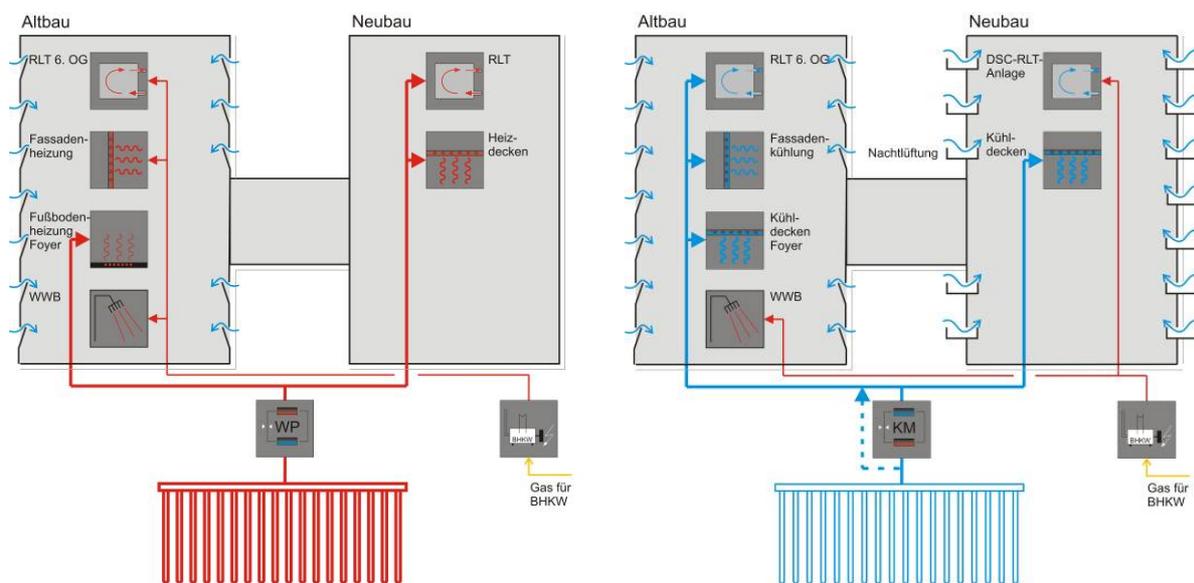


Abbildung 7: Energiekonzept Gelsenwasser AG, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)

### Gebäudedaten im Überblick

Proj. 2 - Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen (GEW)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen			Eckdaten	
BGF	7.114 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	270 kW	43,6 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2004
NGF	6.189 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	305 kW	49,3 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	EWS
A <sub>N</sub>	6.907 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf	k.A. MWh/a	k.A. kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

### 4.2.3. Neues Regionshaus, Hannover (NRH)

Im April 2007 wurde der neue Anbau der Region Hannover bezogen. Das Gebäude in der Innenstadt Hannovers ergänzt den dichten Bestand von Verwaltungsgebäuden der Region Hannover. Der winkelförmige Baukörper besteht aus einer massiven Stahlbeton-Konstruktion und nimmt die Materialien und Farbgebung des Altgebäudes aus den 50er Jahren mit auf.



Abbildung 8: Neues Regionshaus Hannover – Nord-Ansicht [Quelle: IGS]

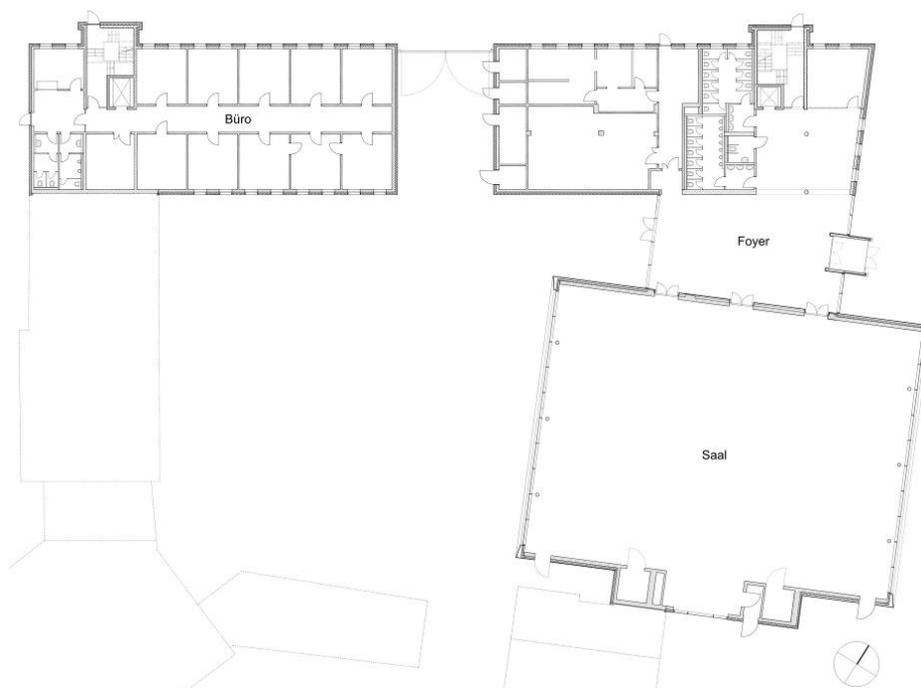


Abbildung 9: Grundriss Erdgeschoss Neues Regionshaus Hannover  
[Quelle: bünemann & collegen gmbH, Hannover]

Der im Erdgeschoss zur Straße und zum Innenhof herausgeschobene, großzügige Multifunktionsaal hebt sich durch seine grüne Kupferfassade farblich vom restlichen 5-geschossigen klar gegliederten Kalkstein-Bauwerk ab. Der Saal wird über ein Foyer von der Hildesheimer Straße aus betreten wird. Über die vollständige Verglasung des großen Saales entsteht ein freier Durchblick bis in den Innenhof. Er bildet das so genannte „Fenster der Region“. In den Obergeschossen befinden sich 191 Büroräume, die jeweils mit zwei Personen besetzt werden können. Die Bruttogrundfläche des Neubaus beträgt 8441 m<sup>2</sup>. Der gesamte Anbau wird bis auf den Multifunktionsbereich und die WC-Anlagen natürlich belüftet.

Für die Sommermonate (Mai bis September) wird zur Kühlung der Büroräume eine Betonkernaktivierung in den Nachtstunden aktiviert. Das erwärmte Wasser aus den Rohrschleifen in den Decken wird über einen Speicher im freien Kühlbetrieb direkt über zwölf 70 m lange Erdsonden durch das Erdreich wieder abgekühlt. Über die Erdsonden wird zusätzlich in den Tagstunden die Zuluft des Multifunktionsbereichs vorkonditioniert. Eine Kältemaschine ist nur als Redundanz vorgesehen und soll nur für die Lüftungsanlage arbeiten.

Im Heizfall werden sowohl die statischen Heizkörper in den Büroräumen als auch die Lüftungsanlage für den Multifunktionsbereich über die Fernwärme versorgt. Die Lüftungsanlage des Multifunktionsbereichs wird zusätzlich zur Fernwärme über erdgekoppelte Vorerhitzer konditioniert. Der Vorerhitzer ist nicht an eine Wärmepumpe gekoppelt sondern arbeitet ebenfalls im freien Umwälzbetrieb. Der Wärmeentzug im Heizbetrieb ist gering im Verhältnis zum Wärmeeintrag im Sommer, soll aber zur Regeneration des Erdreichs beitragen.

Um einen effektiven und optimalen Sonnen- und Blendschutz zu gewährleisten, wurden in den Fensterzwischenräumen motorisch gesteuerte Jalousien integriert, die über Tageslichtlenkung gesteuert werden. Die Beleuchtung ist sowohl präsenz- als auch helligkeitsgesteuert und trägt zur Energieeinsparung bei.

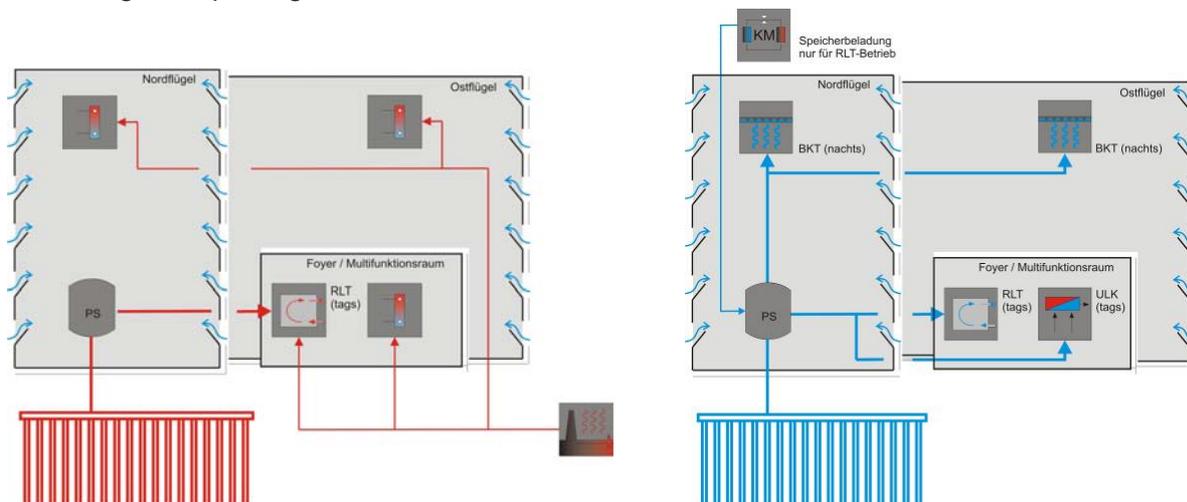


Abbildung 10: Energiekonzept Neues Regionshaus, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)

### Gebäudedaten im Überblick

Proj. 3 - Neues Regionshaus, Hannover (NRH)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen			Eckdaten	
BGF	8.441 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	400 kW	55,4 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2007
NGF	7.222 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	84 kW	11,6 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	EWS
A <sub>N</sub>	9.252 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf (nach EnEV)	269 MWh/a	37,3 kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

#### 4.2.4. Unibibliothek, Rostock (URO)

Der Bibliotheksneubau der Uni Rostock ist seit Oktober 2004 in Betrieb. Das fünfgeschossige Gebäude mit seinem L-förmigen Grundriss öffnet sich wie ein aufgeschlagenes Buch zum neu entstehenden Campus in der Südstadt.



Abbildung 11: Unibibliothek Rostock – Ost Ansicht [Quelle: Ulrike Wittig, Rostock]

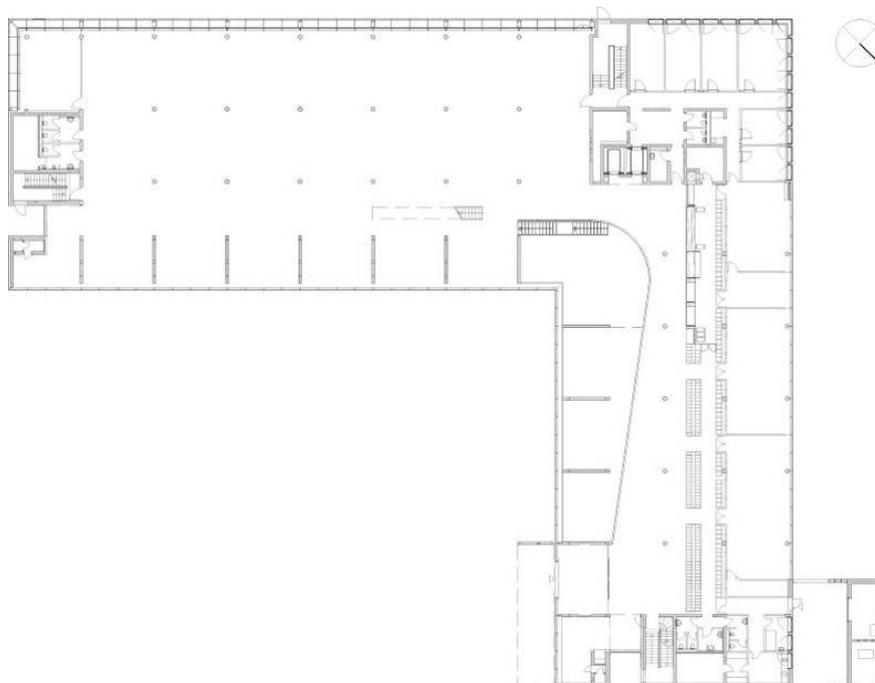


Abbildung 12: Grundriss Erdgeschoss Unibibliothek Rostock  
[Quelle: Henning Larsen Architects, Kopenhagen]

Ein großzügig gestalteter Eingangsbereich befindet sich auf der Innenseite des Nordflügels. Hier sind im Erdgeschoss die Ausleihe sowie Schließfächer untergebracht. Im offen gestalteten Südflügel des Erdgeschosses schließen sich mediale Arbeitsbereiche an. Die Erschließung des 1. bis 3. Obergeschosses erfolgt über eine gerade durch das ganze Haus verlaufende Treppe mit Zwischenpodesten in den Etagen sowie über zwei Aufzüge. In den drei Obergeschossen sind großflächig die Freihandbereiche untergebracht. Darüber hinaus befinden sich in allen Etagen an der Nordfassade abgetrennte Bereiche mit Büros, Vortragsaal sowie Gruppen-, Schulungs- und Sitzungsräumen. Das Untergeschoss steht dem Magazin und der Technikzentrale zur Verfügung.

Das Heizen und Kühlen der Universitätsbibliothek Rostock übernimmt eine Erdwärmeanlage. Sie besteht aus 28 Erdwärmesonden, die 84 Meter in die Tiefe ragen und in einem Abstand von 6 Metern angeordnet sind. Im Sommer wird das Erdreich im Freien Kühlbetrieb zur Kühlung der thermisch aktivierten Decken genutzt und im Winter versorgt eine Wärmepumpe die Betonkerntemperierung mit Erdwärme. Zur Spitzenlastabdeckung dient eine statische Heizung, die an das Fernwärmenetz angeschlossen ist.

Darüber hinaus sorgen Zu- und Abluftanlagen für die erforderliche Frischluftzufuhr in die Unibibliothek, lediglich im hinteren Verwaltungsbereich des Erdgeschosses ist eine Fensterlüftung vorgesehen. Die Zuluftkonditionierung erfolgt im Sommer soweit möglich im Freien Kühlbetrieb über Rückkühlwerke auf dem Dach. Bei Bedarf können zwei Kältemaschinen in das System eingebunden werden. Für die Nacherwärmung der Luft im Winter wird die Fernwärme genutzt.

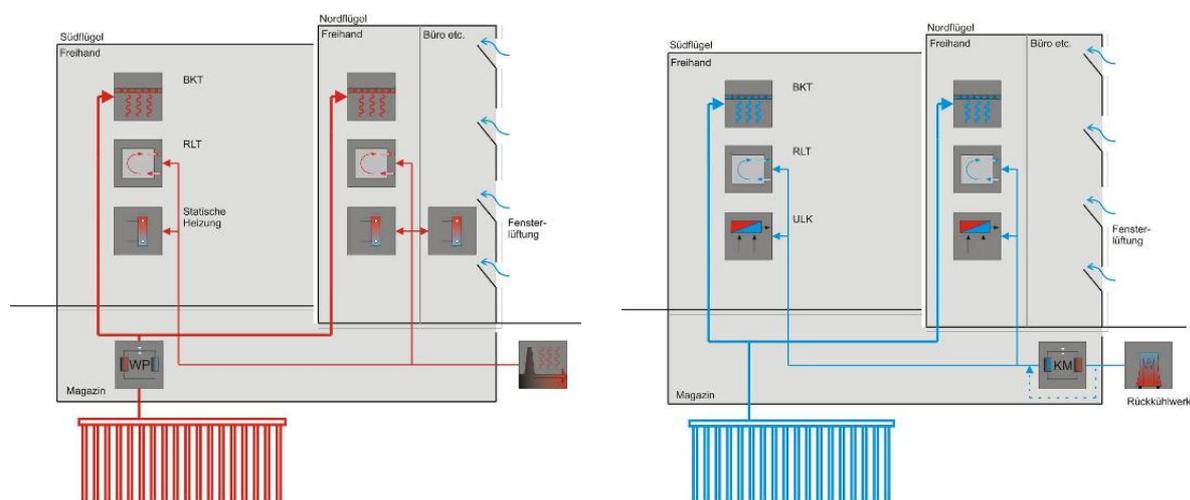


Abbildung 13: Energiekonzept Unibibliothek Rostock, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)

### Gebäudedaten im Überblick

Proj. 4 - Unibibliothek Rostock (URO)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen			Eckdaten	
BGF	14.118 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	640 kW	52,1 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2004
NGF	12.283 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	300 kW	24,4 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	EWS
A <sub>N</sub>	15.176 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf (nach WSV0 95)	881 MWh/a	71,8 kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

#### 4.2.5. EnergieForum, Berlin (EFB)

Der Gesamtkomplex des EnergieForums Berlin besteht aus einem alten denkmalgeschützten, fünfgeschossigen Magazingebäude und zwei modernen achtgeschossigen Riegeln. Miteinander verbunden sind die drei Gebäudeteile über ein 1200 m<sup>2</sup> großes Atrium. Der Gebäudekomplex wurde 2003 fertig gestellt. Die Erschließung des Gebäudes erfolgt über das Atrium entweder vom Stralauer Platz über eine Eingangsröhre durch das Magazingebäude oder direkt von der rückseitigen Spreeuferseite. Im Erdgeschoss befinden sich an das Atrium angrenzend Tagungsräume. Die oberen Geschosse werden als Büroräume genutzt.



Abbildung 14: EnergieForum, Berlin – Südansicht und Blick ins Atrium vom Spreeufer [Quelle: IGS]

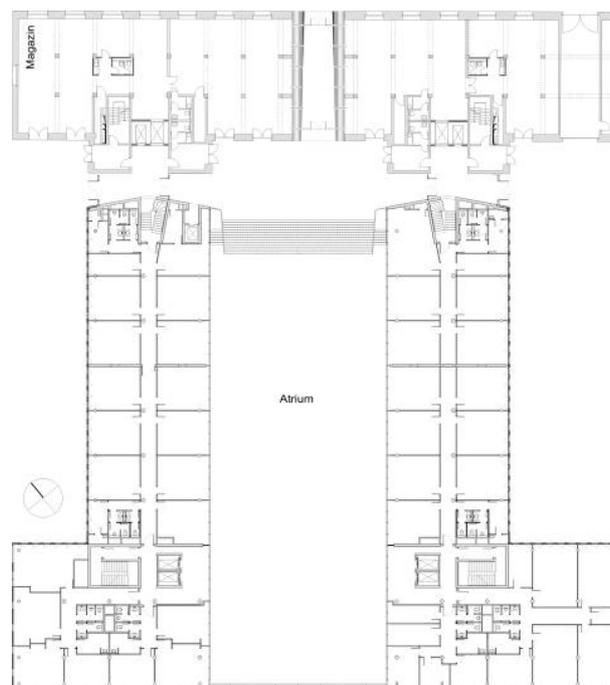


Abbildung 15: Grundriss Erdgeschoss, EnergieForum Berlin [Quelle: BRT Architekten LLP, Hamburg]

Zentrale Rolle bei der Energieversorgung des EnergieForums spielt eine Energiepfahlanlage. Insgesamt sind 196 Gründungspfähle mit einer Länge von 8,5 Metern und 0,5 Meter Durchmesser thermisch aktiviert. Im Winter versorgt eine an die Energiepfahlanlage gekoppelte Wärmepumpe die Betonkernaktivierung in den Riegeln mit Wärme. Ergänzt wird die Wärmeversorgung des EnergieForums durch einen Fernwärmeanschluss, und eine Abluftwärmepumpe im Magazingebäude. Angebunden sind Konvektoren in den Riegeln und Plattenheizkörper im Magazingebäude, die Fußbodenheizung des Atriums sowie die Nacherhitzer der beiden Zu- und Abluftanlagen der Neubauriegel. Die Zu- und Abluftanlagen sind nur im Winter in Betrieb. Um bei niedrigen Außentemperaturen eine energetisch ungünstige Fensterlüftung zu vermeiden, signalisiert eine Anzeige dem Nutzer den Betrieb der Wärmerückgewinnung.

Im Sommer kühlt die Betonkernaktivierung die Büroräume in den Riegeln. Sie wird im freien Kühlbetrieb von den Energiepfählen mit Kälte versorgt. In Abhängigkeit von den Außen- und Bürottemperaturen unterstützt eine automatische Nachtlüftung die Auskühlung der Speichermassen. Tagsüber werden die Büroräume über die Fenster natürlich belüftet. Automatisch gesteuerte Lüftungsklappen sorgen für eine stetige Frischluftzufuhr in das Atrium. So lassen sich auch die an das Atrium angrenzenden Büroräume natürlich belüften. Die Belüftung des Magazingebäudes wird von der Abluftanlage und passiven Zuluftelementen im Brüstungsbe- reich der Fenster unterstützt.

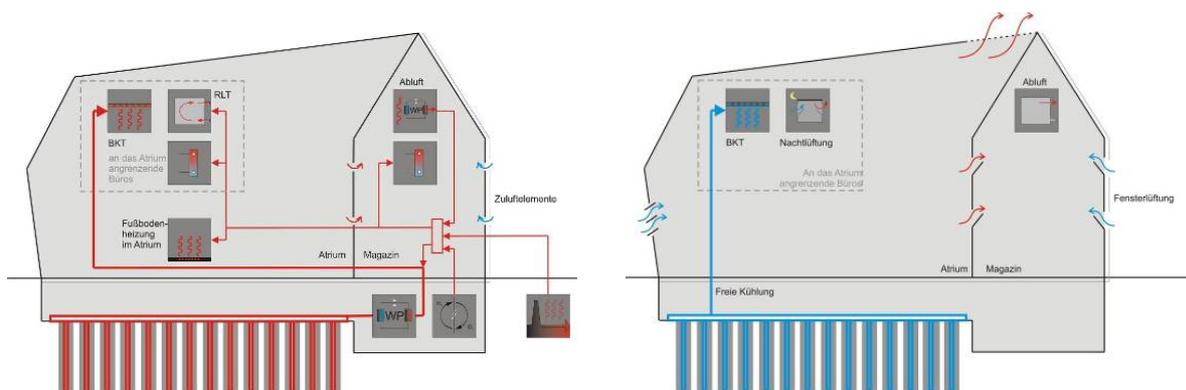


Abbildung 16: Energiekonzept EnergieForum Berlin, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)

### Gebäudedaten im Überblick

Proj. 5 - EnergieForum Berlin (EFB)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen			Eckdaten	
BGF	16.526 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	1.045 kW	71,3 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2003
NGF	14.664 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	150 kW	10,2 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	EP
A <sub>N</sub>	16.203 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf (nach WSV 95)	1.037 MWh/a	70,7 kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

#### 4.2.6. VGH Regionaldirektion Lüneburg (VGH)

Das Verwaltungsgebäude der VGH-Regionaldirektion Lüneburg, Konrad-Zuse-Allee 4 wurde Ende 2002 bezogen. Der lang gestreckte, viereinhalb geschossige und auf der südöstlichen Seite abgerundete Kubus umfasst eine Bruttogrundfläche von etwa 4550 m<sup>2</sup>. Erschlossen wird das Gebäude über einen Windfang von der Konrad-Zuse-Allee.

Im vorderen Bereich befindet sich das Foyer. Von dort teilt ein Lichthof mit Treppenaufgängen das gesamte Gebäude längs in zwei Bereiche. Schulungsräume schließen sich auf der südwestlichen Seite des Erdgeschosses an. Auf der nordöstlichen Seite des Lichthofes ist eine Cafeteria untergebracht. In den zwei Obergeschossen und im südwestlich gelagerten dritten Obergeschoss befinden sich jeweils Büroräume. Das Untergeschoss wird für die Technikzentrale, eine Tiefgarage und Materialräume genutzt.



Abbildung 17: VGH-Lüneburg – West- (links) und Süd-Ansicht (rechts) [Quelle: IGS]

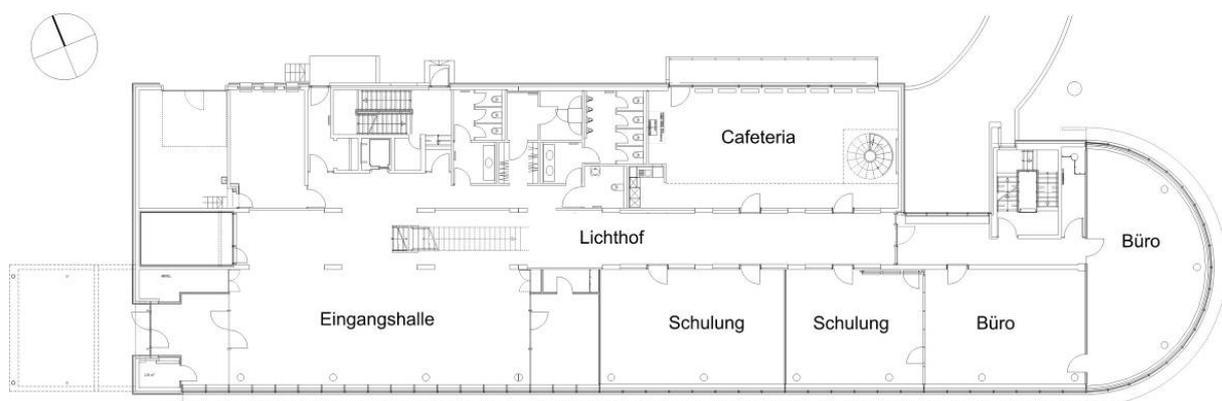


Abbildung 18: Grundriss Erdgeschoss VGH Lüneburg [Quelle: Architekten LMS, Hannover]

Schwerpunkt des Energiekonzeptes der VGH ist neben einer optimierten Tageslichtnutzung mit angepasstem Sonnenschutz die Nutzung der Pfahlgründung zum Heizen und Kühlen des Gebäudes. Insgesamt wurden 101 Gründungspfähle mit einer Länge zwischen 17 und 22 m thermisch aktiviert.

Im Winter wird mittels einer Wärmepumpe dem Erdreich Wärme entzogen. Die Wärmepumpe dient tagsüber der Vorwärmung der Zuluft von zwei Lüftungsanlagen für die Eingangshalle und den Schulungsbereich. Nachts versorgt die erdgekoppelte Wärmepumpe die Betonkernaktivierung in den Büro- und Schulungsbereichen. Neben der Grundlastdeckung über die Erdwärme wird im Tagbetrieb der darüber hinaus gehende Wärmebedarf des Gebäudes über Fernwärme gedeckt. Versorgt werden konventionelle Konvektoren in den Büros sowie eine Fußbodenheizung im Eingangsbereich. Zusätzlich ermöglicht die Fernwärme eine Nachheizung der Zuluft der zwei Lüftungsanlagen.

Im Sommer kann die reversible Wärmepumpe als Kältemaschine genutzt werden. Die Rückkühlung erfolgt dabei über das Erdreich. Analog zum Winterbetrieb wird tagsüber die Zuluft der zwei Lüftungsanlagen mit Kälte versorgt. Nachts dient das Erdreich als Kältequelle für die Betonkernaktivierung in den Büro- und Schulungsräumen. Solange die Erdreichtemperaturen dieses zulassen, erfolgt die Kühlung der sich über den Tag erwärmten Betondecken im freien Kühlbetrieb. Unterstützt wird die Wärmeabfuhr aus den Büros über eine freie Nachtlüftung. Hierbei wird die warme Luft aus den Räumen in den Lichthof und anschließend über Klappen im Dachbereich nach draußen geführt. Die kalte Nachtluft strömt über die Außenfenster nach.

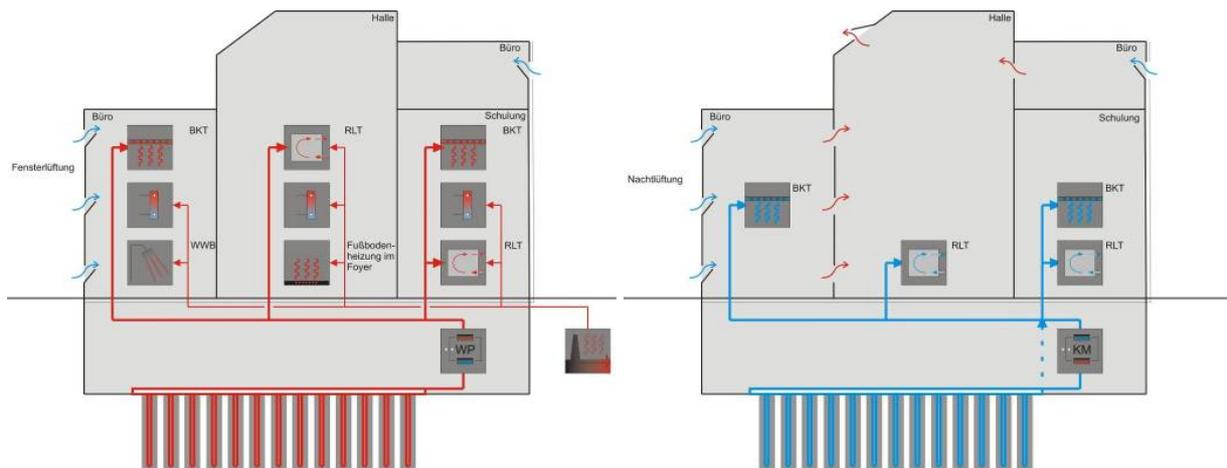


Abbildung 19: Energiekonzept VGH-Lüneburg, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)

### Gebäudedaten im Überblick

Proj. 6 - VGH Regionaldirektion, Lüneburg (VGH)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen		Eckdaten		
BGF	4.548 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	350 kW	88,5 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2002
NGF	3.957 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	120 kW	30,3 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	EP
A <sub>N</sub>	3.730 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf (nach WSV 94)	127 MWh/a	32,2 kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

#### 4.2.7. Gebäude BIH, Hannover (BIH)

Das Bürogebäude wurde im Juni 2002 fertig gestellt. Auf einer Ecke der bestehenden sechsgeschossigen Blockrandbebauung entwickelt sich der Neubau zu einem Hochhaus mit siebzehn Geschossen. Da die einzelnen Gebäudeteile unterschiedliche Tiefen aufweisen, konnten alle gängigen Bürotypen (Großraum-, Zellen-, Kombi- oder Gruppenbüros) realisiert werden.

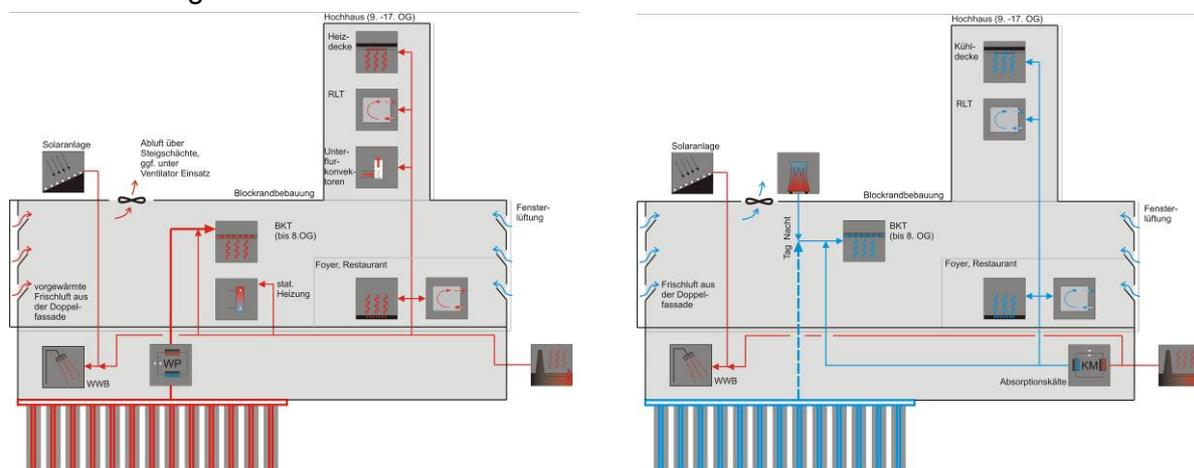
Die Bruttogrundfläche von Bestand und Neubau umfasst insgesamt 81.300 m<sup>2</sup>. Der von der Blockrandbebauung eingefasste Innenhof ist für Passanten ebenso zugänglich wie die im Erdgeschoss angesiedelten Restaurants und Boutiquen. Unterhalb des Gebäudes erstreckt sich eine zweigeschossige Tiefgarage.

Bereits während der Planung des Gebäudes wurde auf das Energieversorgungskonzept ein besonderes Augenmerk gesetzt. Wesentlicher Bestandteil ist die thermische Nutzung des Erdreichs über eine Energiepfahlanlage. Insgesamt sind 121 Gründungspfähle mit einer Länge von 20 m und einem Durchmesser von 0,9 m thermisch aktiviert.

Die Energiepfahlanlage ist an eine Wärmepumpe gekoppelt und versorgt im Winter die thermisch aktivierten Decken der Gebäudeteile Blockrand und Hochhaus (bis 8.OG) mit Wärme. Darüber hinaus gehender Wärmebedarf der Blockrandbebauung wird über Konvektoren gedeckt, welche an die Fernwärmeversorgung des Gebäudes angeschlossen sind. Die Fernwärme stellt über Unterflurkonvektoren, Heiz-/Kühldecken und temperierte Luft aus den Zu- und Abluftanlagen auch die erforderliche Wärme für das 9. bis 17. OG des Hochhauses bereit. Gesonderte Bereiche wie Foyer, Cafeteria und Speiseraum werden über eine Fußboden- und Fassadenheizung ebenfalls mit Fernwärme beheizt.

Im Sommer erfolgt nachts die Rückkühlung der Betonkernaktivierung im freien Kühlbetrieb über Rückkühlwerke auf dem Dach. Am Tag wird auf eine Rückkühlung über die Energiepfahlanlage umgeschaltet. Darüber hinaus kann sowohl nachts als auch tags über die Absorptionskälte nachgekühlt werden. Die Heiz-/Kühldecken sowie die Zu- und Abluftanlage der Büros im Hochhaus werden ebenfalls von den Absorptionskältemaschinen mit Kälte versorgt. Gleiches gilt für die gekühlten Bereiche wie die Eingangshalle, Foyer, Küche, Konferenzbereich, Forum und Theatercafé sowie Betriebs- und Fremdrestaurant.

In der Blockrandbebauung ist ganzjährig eine natürliche Fensterlüftung möglich. Aus Schallschutzgründen und damit auch die natürliche Belüftung gewährleistet werden kann, ist der nördliche Blockrand mit einer Doppelfassade versehen. Die Frischluft für die Nordbüros wird über Kanäle aus dem Innenhof angesaugt, so dass keine verunreinigte Straßenluft in das Gebäude eindringt.



**Abbildung 20:** Energiekonzept Gebäude BIH Hannover, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)



## Gebäudedaten im Überblick

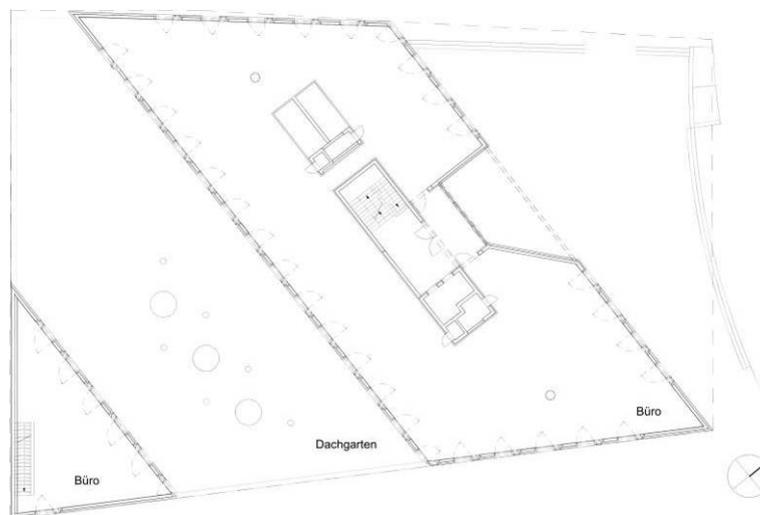
Proj. 7 - Gebäude BIH, Hannover (BIH)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen			Eckdaten	
BGF	81.000 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	6.156 kW	83,7 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2002
NGF	73.524 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	1.358 kW	18,5 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	EP
A <sub>N</sub>	56.101 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf (nach WSV0 95)	3.098 MWh/a	42,1 kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

#### 4.2.8. KAI13, Düsseldorf (KAI)

Das Büro- und Geschäftshaus KAI 13 im Düsseldorfer Medienhafen wurde 2003 fertig gestellt. Mit seiner einfachen, aber ungewöhnlichen Geometrie erstreckt sich das Gebäude im Erdgeschoß über das Grundstück. Zwei daraus emporsteigende Baukörper in Form eines fünfgeschossigen Parallelogramms und eines kleineren dreigeschossigen dreieckigen Körpers sowie ein verbindender begehbare Garten im ersten Obergeschoss vervollständigen das Ensemble. Das Erdgeschoss des Gebäudes wird für Ladenlokale genutzt, während sich die Büroflächen als Hauptnutzung auf die oberen Stockwerke verteilen.



**Abbildung 21:** Bürogebäude KAI 13 Düsseldorf [Quelle: Manos Meisen, Düsseldorf]



**Abbildung 22:** Grundriss 1. Obergeschoss Bürogebäude KAI 13 Düsseldorf [Quelle: Döring Dahmen Joeressen Architekten, Düsseldorf]

Kern des Energiekonzeptes ist eine Energiepfahlanlage zur saisonalen Wärmespeicherung bestehend aus 113 thermisch aktivierten Pfählen mit einer Einzellänge von 5,60 bis 13,60 m und einer Gesamtlänge von 1017 m.

Angebunden an eine reversible Wärmepumpe wird das Gebäude im Winter mit Wärme aus dem Erdreich versorgt. Nachts erfolgt über eine Betonkernaktivierung die Belandung der Decken mit Wärme. Sie stellen 80 % der erforderlichen Heizleistung bereit. Um am Tage einen individuellen Komfort zu erreichen, sind zusätzliche Flachheizkörper mit Thermostatventilen installiert. Sie werden ebenfalls mit Erdwärme versorgt und sollen die restlichen 20% Heizleistung decken. Darüber hinaus steht die Erdwärme am Tag zur Nachwärmung der Zuluft der mechanischen Lüftung zur Verfügung. Zusätzlich ist das gesamte System an das Fernwärmenetz angebunden. Bei Lastspitzen können die Flächenheizkörper alternativ zur Erdwärme mit Fernwärme versorgt werden. Außerdem besteht im Falle einer Störung im Geothermienetz die Möglichkeit, Fernwärme in das komplette System einzuspeisen und den gesamten Wärmebedarf über Fernwärme zu decken.

Im Sommer wird das Bürogebäude im wechselnden Tag-/Nachtbetrieb über die mechanische Lüftungsanlage und die Betonkernaktivierung gekühlt. Geht der Kühlbedarf über die Kapazität der freien Kühlung aus dem Erdreich hinaus, wird die an das Erdreich gekoppelte Kältemaschine hinzugeschaltet. Reicht die Leistung bei hochsommerlichen Temperaturen zur Kühlung der Zuluft nicht aus, schaltet sich der auf dem Dach installierte Kühlturm zu und speist die Lüftungsanlage mit Kälte.

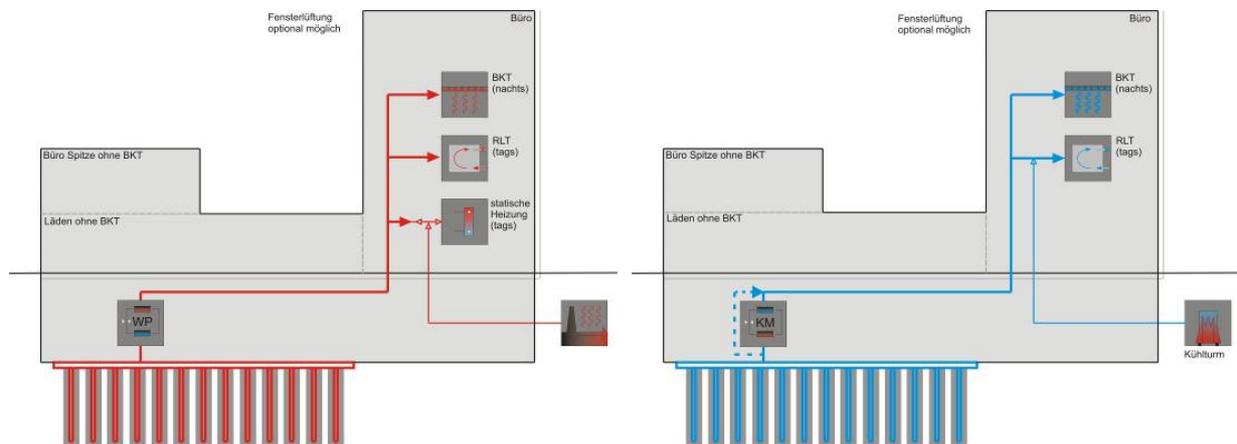


Abbildung 23: Energiekonzept KAI 13 Düsseldorf, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)

### Gebäudedaten im Überblick

Proj. 8 - KAI13, Düsseldorf (KAI)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen			Eckdaten	
BGF	6.876 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	320 kW	52,3 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2003
NGF	6.120 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	350 kW	57,2 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	EP
A <sub>N</sub>	5.962 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf	k.A. MWh/a	k.A. kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

#### 4.2.9. AOK, Osnabrück (AOK)

Der Neubau der AOK Regionaldirektion in der Niedersachsenstraße in Osnabrück wurde 2003 fertig gestellt. Der Gebäudekomplex besteht aus drei Bürotrakten A, B und C. Die Erschließung erfolgt über das entlang der nördlichen Grundstücksgrenze angeordnete trapezförmige und vier Vollgeschosse umfassende Haus A. Die Häuser B und C mit rechteckigem Grundriss besitzen drei Vollgeschosse. Zwei kleine nach Osten orientierte Bürotrakte mit Atrien zur Westseite schaffen die Verbindung zwischen den Häusern A-C. Es entsteht eine kammartige Gebäudestruktur, mit nach Nord und Süd orientierten Hauptfassadenflächen der Bürotrakte.

Die Raumaufteilung der Gebäude besteht zum großen Teil aus Einzelbüros. Lediglich im westlichen Bereich sind einige Großraumbüros vorhanden. Ein Schulungs- und Konferenzbereich ist im Erdgeschoss des Hauses C untergebracht. Im Untergeschoss, welches sich über die gesamte Fläche des Gebäudekomplexes erstreckt, befinden sich darüber hinaus eine Gymnastikhalle und eine Lehrküche sowie eine Tiefgarage und die Technik. Die gesamte Bruttogrundfläche umfasst rund 10.200 m<sup>2</sup>.



Abbildung 24: AOK Osnabrück – Nordwest [Quelle: IGS]

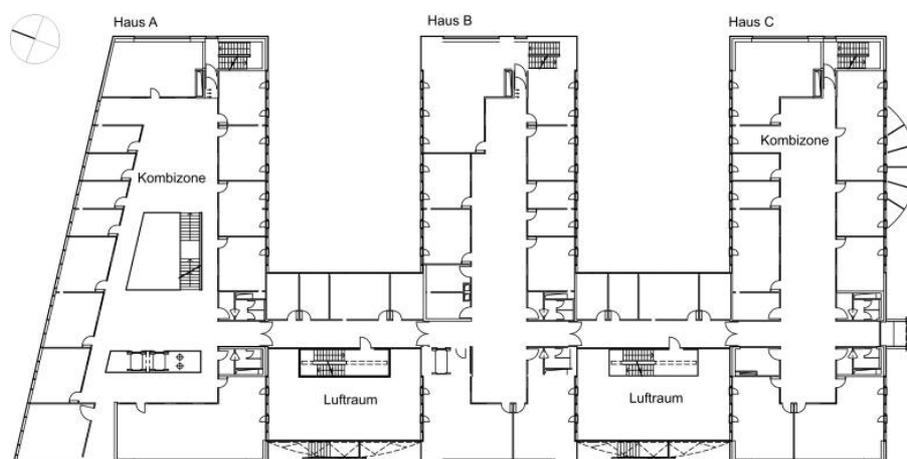


Abbildung 25: 1.Obergeschoss AOK Osnabrück [Quelle: Architekten PSP - Braunschweig]

Insgesamt 120 Gründungspfähle mit einer Länge von 15 bis 20 m wurden thermisch aktiviert und werden im Energiekonzept zum Heizen und Kühlen des Gebäudes verwendet.

Die Energiepfahlanlage ist an eine Wärmepumpe gekoppelt und versorgt im Winter die Betonkernaktivierung sowie einen Heizungspufferspeicher mit Wärme. An den Pufferspeicher sind die Heizregister der Lüftungsanlage sowie die zusätzlich zur Betonkernaktivierung vorhandene statische Heizung angeschlossen. Gesonderte Bereiche wie das Foyer, die Atrien, Konferenzräume und die Gymnastikhalle werden über eine an den Pufferspeicher angeschlossene Fußbodenheizung mit Wärme versorgt. Kann die erdgekoppelte Wärmepumpe die geforderte Wärmeleistung nicht decken, wird der Pufferspeicher über einen Gasbrennwertkessel beheizt.

Im Sommerbetrieb erfolgt die Kühlung der Büroräume über die Betonkernaktivierung und einen freien Kühlbetrieb. Eine Kältemaschine wird zusätzlich über die Energiepfahlanlage rückgekühlt. Die Kältemaschine versorgt die Umluftkühlgeräte der Serverräume, die Kühldecken der zwei Konferenzräume sowie die Kühlregister der RLT-Anlage Konferenz mit Kälte.

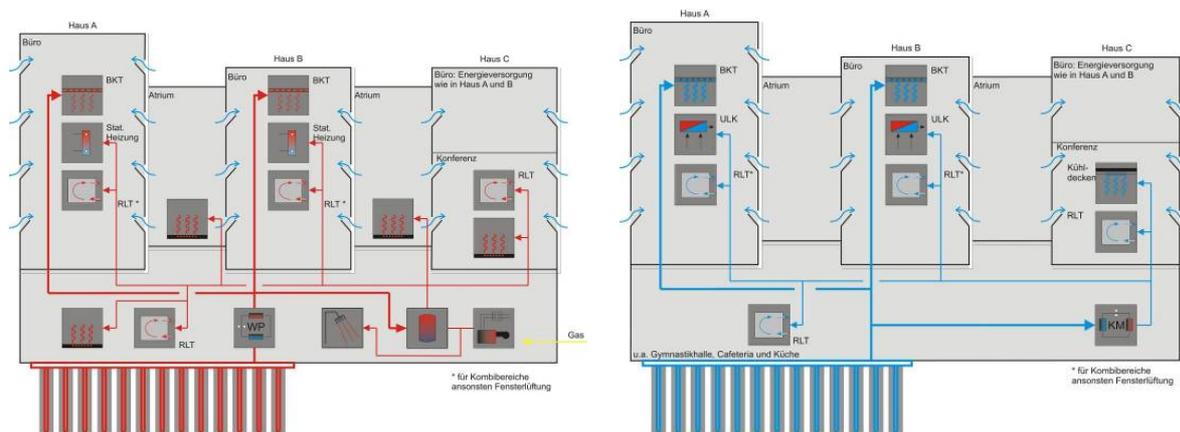


Abbildung 26: Energiekonzept AOK Osnabrück, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)

### Gebäudedaten im Überblick

Proj. 9 -AOK, Osnabrück (AOK)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen			Eckdaten	
BGF	10.180 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	325 kW	35,9 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2003
NGF	9.060 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	100 kW	11,0 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	EP
A <sub>N</sub>	10.240 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf (nach k.A.)	480 MWh/a	53,0 kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

#### 4.2.10. VW-Bibliothek, Berlin (TUB)

Das sechsgeschossige, lang gestreckte Gebäude der VW-Bibliothek der TU Berlin in Charlottenburg, Fasanenstraße Ecke Herzallee ist seit Herbst 2004 für den Publikumsverkehr geöffnet.

Auf der Westseite des in Nord-Südrichtung ausgerichteten Gebäudes befinden sich die Lesesaalbereiche, an die sich ein Lichthof mit zwei Treppenaufgängen anschließt. Freihandmagazine sind zwischen dem Lichthof und der nach Osten orientierten Bürozeile gelagert. Im Erdgeschoss befinden sich über die genannten Nutzungen hinaus ein Foyer mit Garderobe und Schließfächern, eine Cafeteria, zwei Hörsäle sowie Schulungsräume. Im Untergeschoss mit einer annähernd doppelt so große Fläche eines Obergeschosses sind Magazine sowie Technikzentralen und eine Werkstatt untergebracht.



Abbildung 27: Volkswagen Bibliothek TU Berlin – Südwest Ansicht [Quelle: Stefan Müller, Berlin]

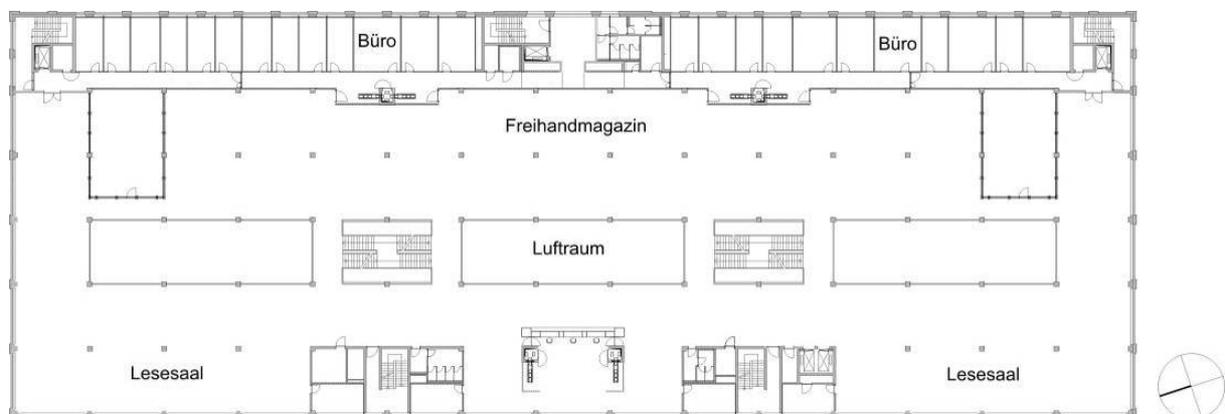


Abbildung 28: Grundriss 1. Obergeschoss Volkswagen Bibliothek TU Berlin [Quelle: Architekturbüro Walter A. Noebel, Berlin]

Eine zentrale Rolle bei der Energieversorgung der Bibliothek spielt der Bodenabsorber, welcher das Erdreich unter dem Gebäude als thermischen Speicher nutzt. Insgesamt wurden unter der ca. 8100 m<sup>2</sup> große Bodenplatte ca. 21,3 km PE-Rohr im Abstand von 0,49 m verlegt.

Der Bodenabsorber wird in Kombination mit einer Betonkernaktivierung in den Büros und in den Lesesälen zum Heizen und Kühlen genutzt. Das im Laufe des Winters mittels einer Wärmepumpe abgekühlte Erdreich wird im Sommer als Kältequelle zur freien Kühlung eingesetzt. Reicht die freie Kühlung über den Bodenabsorber nicht aus die Geschossdecken zu kühlen, kann über eine Kältemaschine mit Rückkühlwerk auf dem Dach Kälte in die Betonkerntemperatur nachgespeist werden. Die Kältemaschine versorgt darüber hinaus die Umluftkühlgeräte in den Serverräumen und die Kühlregister der Lüftungsanlagen der Sondermagazine. Im Winter werden Spitzenlasten von Fernwärme versorgten konventionellen Plattenheizkörpern gedeckt.

Die Belüftung des Gebäudes erfolgt in den Büros ganzjährig über die Fenster. Lesesaalbereiche, Freihandmagazine und das Magazin im Untergeschoss werden über Zu- und Abluftanlagen mit Frischluft versorgt. Für die Zuluftkonditionierung über Trocknungs- und Befeuchtungsprozesse kommt Sorptionstechnik in Verbindung mit Fernwärme zum Einsatz.

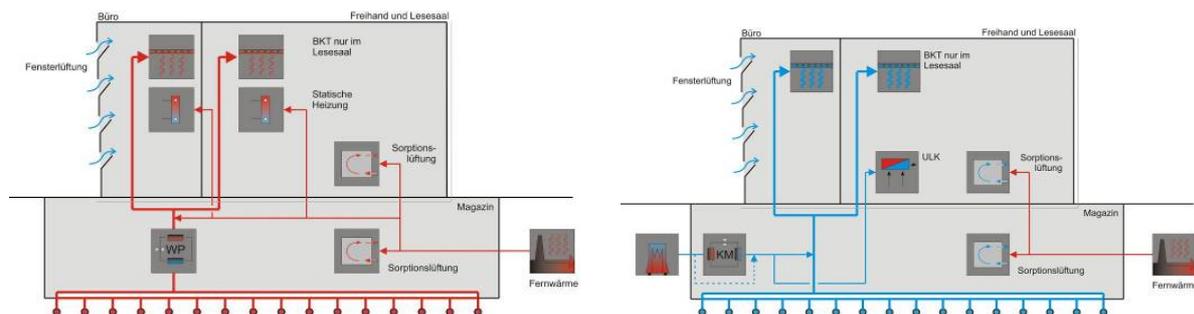


Abbildung 29: Energiekonzept VW-Bibliothek Berlin, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)

### Gebäudedaten im Überblick

Proj. 10 - VW-Bibliothek, Berlin (TUB)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen			Eckdaten	
BGF	33.287 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	570 kW	19,3 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2004
NGF	29.532 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	250 kW	8,5 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	BA
A <sub>N</sub>	43.146 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf (nach EnEV)	16.172 MWh/a	547,6 kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

#### 4.2.11. Accent Office Center, Frankfurt (AOC)

Der Gebäudekomplex des Accent Office Center in Frankfurt am Main wurde 2004 fertig gestellt. Im Norden begrenzt die Ferdinand Happ Straße, im Osten die Leibbrandstraße und im Süden die Hanauer Landstraße das Accent Office Center.

Insgesamt besteht der Gebäudekomplex aus sechs Häusern, die über das Erd- sowie das erste Obergeschoss großflächig miteinander verbunden sind. Hier befinden sich zahlreiche Läden, Ausstellungsflächen und Gastronomie. Im zweiten bis sechsten Obergeschoss der sechs Häuser sind hauptsächlich Büronutzungen unterschiedlicher Mieter untergebracht. Als Staffelgeschoss im Atelier-Look ist das sechste Obergeschoss ausgeführt. Insgesamt umfassen die Geschosse eine Bruttogrundfläche (BGF) von etwa 46.000 m<sup>2</sup>. Von der BGF stehen 400 Stellplätzen in der Tiefgarage der beiden Untergeschosse zur Verfügung.



Abbildung 30: Accent Office Center Frankfurt – Nord-Ansicht [Quelle: BLFP – Architekten, Friedberg]

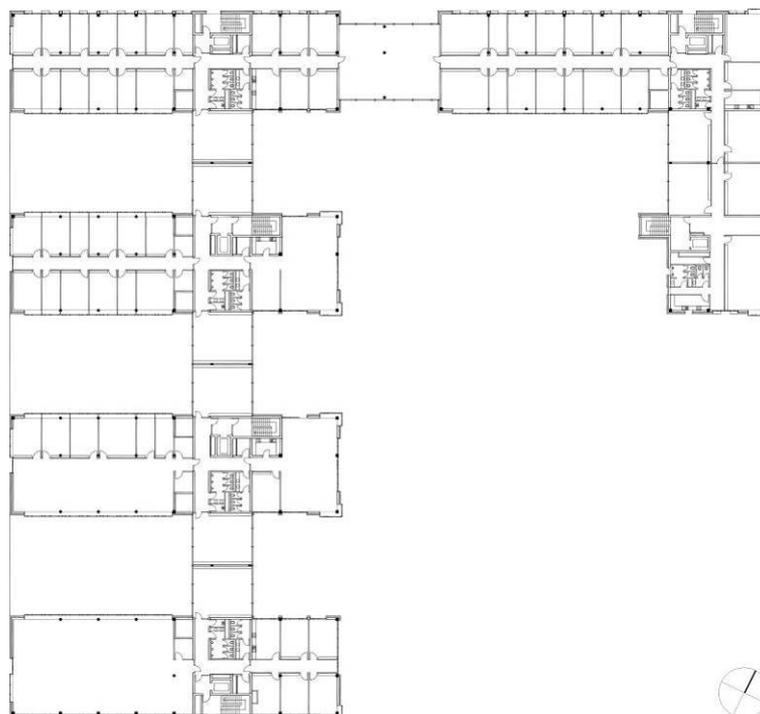


Abbildung 31: Grundriss 2. bis 5. Obergeschoss Accent Office Center Frankfurt [Quelle: BLFP – Architekten, Friedberg]

Das Energiekonzept des Gebäudes wird neben den verschiedenen Nutzungen wesentlich durch die unterschiedlichen Wärme-, Sonnen- und Schallschutzanforderungen der einzelnen Fassaden bestimmt. Entsprechend ausgewählte Sonnen- und Wärmeschutzverglasungen ermöglichen eine optimale Tageslichtnutzung und reduzieren den Energiebedarf für Heizen und Kühlen sowie künstliche Beleuchtung.

Die Versorgung der Laden-, Ausstellungs- und Gastronomiebereiche mit Frischluft sowie Wärme und Kälte geschieht komplett über mechanische Lüftungsanlagen.

Die Kühlung der Bürogeschosse kann aufgrund der reduzierten Kühllasten über eine Betonkernaktivierung und die Frischluftzufuhr über manuelle Fensterlüftung erfolgen. Lediglich die Riegel zur stark befahrenen Hanauer Landstraße und zur Ferdinand Happ Straße sind aus Schallschutzgründen zusätzlich mit einer mechanischen Lüftung ausgestattet und werden mit gekühlter Frischluft versorgt.

Zeitlich verschoben zum während des Tages anfallenden Kühllastbedarf der mechanischen Lüftung erfolgt die Rückkühlung der Betonkernaktivierung nachts. Die Kühllastspitze am Tag und die notwendige zu installierende Kälteleistung werden dadurch reduziert. Zur Rückkühlung stehen drei Alternativen zur Verfügung. Bei niedrigen Außentemperaturen z.B. in der Nacht kann die Rückkühlung im freien Kühlbetrieb über nasse Kühltürme auf dem Dach erfolgen. Bei hohen Außentemperaturen wird über einen Bodenabsorber rückgekühlt. Erst wenn das Kältepotential des Erdreichs ausgeschöpft ist, kommen Kompressionskältemaschinen in Kombination mit den Rückkühlwerken auf dem Dach zum Einsatz.

Im Winter wird das gesamte Gebäude über zwei gasbetriebene Brennwertkessel beheizt. Konventionelle statische Heizflächen als auch die Nacherhitzer der Lüftungsanlagen beziehen hierher die Wärme.

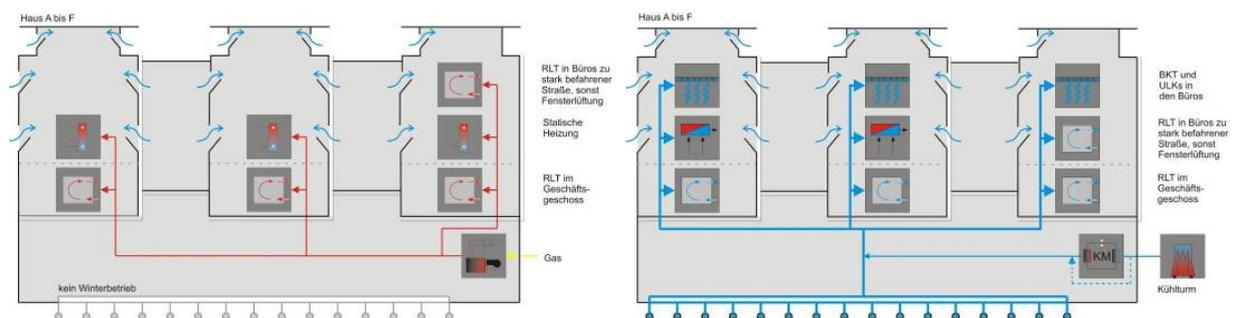


Abbildung 32: Energiekonzept Accent Office Center, Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts)

### Gebäudedaten im Überblick

Proj. 11 - Accent Office Center, Frankfurt (AOC)						
Gebäudeflächen		Auslegungsleistungen			Eckdaten	
BGF	46.070 m <sup>2</sup>	Gesamtheizlast	3.008 kW	75,0 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Baujahr	2004
NGF	40.080 m <sup>2</sup>	Gesamtkühllast	1.635 kW	40,8 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub>	Erdwärmesystem	BA
A <sub>N</sub>	35.510 m <sup>2</sup>	Jahresheizwärmebedarf (nach EnEV)	1.600 MWh/a	39,9 kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a		

### 4.3. Konzeptstrategien und Anlagenprognose

Die im Forschungsprojekt untersuchten Gebäude mit ihren geothermischen Anlagen stellen aufgrund der unterschiedlichen Konstruktionen, Ausstattung und Nutzung jeweils Einzelobjekte dar, deren Kennwerte nicht unmittelbar vergleichbar sind.

Im Rahmen der Auswertung der Konzeptstrategien, Planungswerte und der Bildung von spezifischen Planungs-Kennwerten kann daher nur auf einer allgemeinen Basis ein Vergleich der Anlagen durchgeführt und die Umsetzung der oberflächennahen Geothermie innerhalb der Energiekonzepte untersucht und beurteilt werden.

Nachfolgend werden aus den Planungsdaten Deckungsanteile, spezifische Entzugs- und Eintragsleistungen sowie die geplante / prognostizierte Anlageneffizienz, etc. der Gebäude sowie der geothermischen Anlagen ermittelt und verglichen. Verbrauchsdaten können nicht ausgewertet werden, da sie nur in unzureichender Form zur Verfügung stehen. Weiterhin werden die jeweiligen Konzeptstrategien auf Raumebene und Gebäudeebene analysiert und in eine Standard-Systemlösung / Systemkonfiguration überführt.

Im Rahmen einer Feinanalyse (siehe Kapitel 5) werden anschließend fünf Gebäude messtechnisch genauer untersucht und hinsichtlich ihrer Planungs- und Verbrauchswerte bewertet.

Die im Forschungsvorhaben integrierten Projekte werden in den entsprechenden Tabellen und Diagrammen über Abkürzungen, wie nachfolgend aufgelistet, dargestellt.

Projekt 1	RIC	- Gebäude RIC, Hamburg
Projekt 2	GEW	- Hauptverwaltung Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen
Projekt 3	NRH	- Neues Regionshaus, Hannover
Projekt 4	URO	- Unibibliothek Rostock
Projekt 5	EFB	- EnergieForum Berlin
Projekt 6	VGH	- VGH Regionaldirektion, Lüneburg
Projekt 7	BIH	- Gebäude BIH, Hannover
Projekt 8	KAI	- KAI13, Düsseldorf
Projekt 9	AOK	- AOK, Osnabrück
Projekt 10	TUB	- VW-Bibliothek, Berlin
Projekt 11	AOC	- Accent Office Center, Frankfurt

#### 4.3.1. Konzeptstrategien

Die umgesetzten Konzeptstrategien werden auf zwei Ebenen analysiert. Auf der so genannten Raumebene erfolgt die Betrachtung der einzelnen Nutzungszonen bzw. Räume innerhalb des Gebäudes. Die Gebäudeebene spiegelt dagegen das Gesamtkonzept (Gesamtsystem) mit der entsprechenden Gebäudehülle als Systemgrenze wieder.

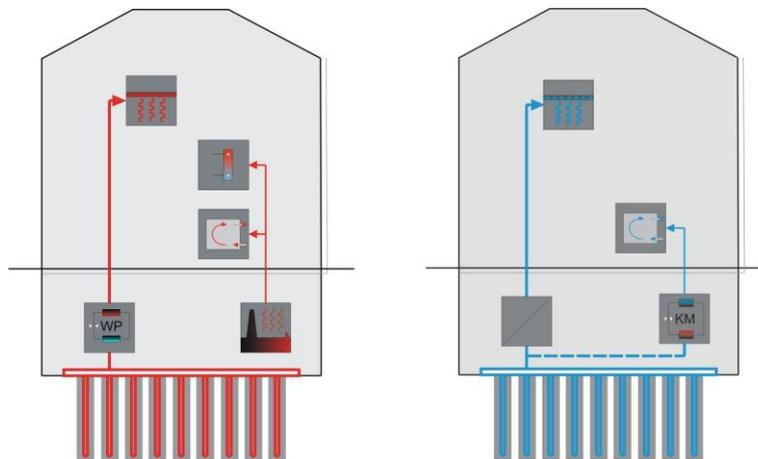
Bei der Analyse der einzelnen Gesamtsysteme kann zusammenfassend festgestellt werden, dass es sich bei den hier untersuchten Gebäuden und deren Versorgungssystemen allgemein eher um Standardlösungen als Individuallösungen handelt.

Erst in der Umsetzung der verschiedenen Übergabesysteme im Gebäude kann von individueller Planung und Ausführung gesprochen werden. Bei wenigen der hier untersuchten Gebäude werden verschiedene Varianten und auch zonenabhängige Varianten umgesetzt.

Eine große Varianz in den Konzepten auf Raum- als auch auf Gebäudeebene kann zu unübersichtlichen Regelungen und Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten führen. Als Standardlösung ergibt sich hier die einfache Kombination aus maximal zwei Komponenten.

### Gebäudeebene (Gesamtsystem)

Im Rahmen des Gesamtsystems wird die Erzeugung und Verteilung von Wärme und Kälte zur Versorgung des Gebäudes betrachtet. Der Schwerpunkt dabei liegt auf der Nutzung der Erdwärmesysteme und deren Einbindung in die Versorgung des Gebäudes zum Heizen und Kühlen sowie die Aufteilung der Grund- und Spitzenlastversorger. Abbildung 33 zeigt dazu beispielhaft die Umsetzung eines Gesamtkonzepts mit Erdwärmesystem für den Heiz- als auch Kühlfall.



**Abbildung 33:** Beispiel eines umgesetzten Gesamtkonzepts: Heizen (links) und Kühlen (rechts)

### Heizen

Über 80% der betrachteten Anlagen nutzen im Heizfall eine erdgekoppelte Wärmepumpe zur Wärmebereitstellung, nur 20% der Gebäude nutzen ihr Erdwärmesystem in der Heizperiode nicht. Anhand der elf im Forschungsvorhaben untersuchten Gebäude ist dabei festzustellen, dass ca. 73% der Systeme einen Fernwärmeanschluss für den Heizfall aufweisen. Mit Ausnahme einer Anlage (Projekt 2 – Gelsenwasser AG (GEW)) besitzen die restlichen Gebäude eine Gaskesselanlage zur Wärmeerzeugung (Tabelle 4).

Für alle Anlagen generell, dass die installierten Erdwärmesysteme in Kombination mit einer Wärmepumpe zur Grundlastdeckung eingesetzt werden. Eine Nachheizung im Spitzenlastfall erfolgt entweder über einen Fernwärmeanschluss bzw. über eine Gaskesselanlage, siehe auch Gebäudebeschreibungen Kapitel 4.2). Bei zwei Anlagen wird zusätzlich die Abwärme der RLT-Anlagen über eine Abluftwärmepumpe genutzt.

Bei der Wärmeerzeugung liegt das Temperaturniveau (Vor- und Rücklauftemperatur im Auslegungsfall) für die jeweiligen Erzeuger auf folgendem Niveau:

- Fernwärme (Sekundärseite Wärmeübertrager)      60°C / 40°C bis 80°C / 60°C
- Gas-Brennwertkessel                                      50°C / 30°C bis 70°C / 50°C
- Gas-BHKW    90°C / 80°C
- erdgekoppelte Wärmepumpe                              27°C / 30°C bis 45°C / 40°C
- Abluftwärmepumpe                                         30°C / 25°C bis 50°C / 40°C

## Kühlen

Alle untersuchten Anlagensysteme nutzen im Sommer das Erdreich zum Kühlen. Für den Kühlfall wurde zu 55% der Gebäude das Erdreich als alleiniger Kälteerzeuger verwendet, 2/3 davon besitzen zusätzlich eine reversible Wärmepumpe (Umschaltung zur Kältemaschine) besitzen. Bei den restlichen 45% der Systeme erfolgt die Kombination der Erdwärme mit einer Kältemaschine, wobei die Ausführung zwischen Kompressions- und Absorptionskältemaschine variiert. In jeder der hier untersuchten Anlagen kann der freie Kühlbetrieb, d.h. reiner Umwälzbetrieb im Erdreichwärmeübertrager, gefahren werden, siehe Tabelle 4.

Für die Kälteversorgung der Gebäude werden hauptsächlich die installierten Erdwärmesysteme zur Grundlastversorgung eingesetzt. Dies gilt aber nicht generell. Ist das Temperaturniveau des Erdreichs für den freien Kühlbetrieb ausgeschöpft so können in vier Anlagen reversible Wärmepumpe eingeschaltet werden. In diesem Fall wird das Erdreich zur Rückkühlung genutzt und erwärmt sich weiter. Besitzt das System keine umschaltbare Wärmepumpe zur Kälteerzeugung werden Kompressions- oder Absorptionskältemaschinen zur Deckung der Spitzenlast eingesetzt.

Bei der Kälteerzeugung liegt das Temperaturniveau (Vor- und Rücklauftemperatur im Auslegungsfall) für die jeweiligen Erzeuger wie folgt:

- Erdwärmesystem (freie Kühlung) 14°C / 18°C bis 20°C / 25°C
- Kompressionskältemaschine 6°C / 12°C bis 10°C / 16°C
- Absorptionskältemaschine 6°C / 12°C
- Reversible Wärmepumpe 6°C / 12°C bis 15°C / 19°C
- Reiner Kühlturm 18°C / 21°C

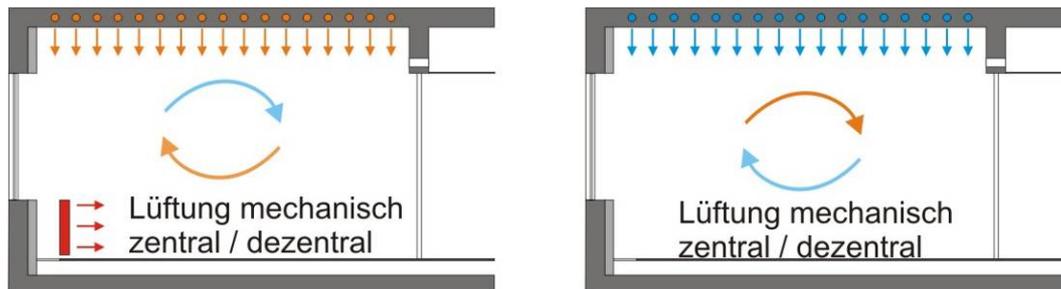
**Tabelle 4:** Übersicht der Umsetzung von Heiz- und Kühlsystemen im Gesamtsystem

Gesamtkonzept - Gebäudemodell		EWS				EP				BA		
Projekt-Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Objekt		RIC	GEW	NRH	URO	EFB	VGH	BIH	KAI	AOK	TUB	AOC
Heizen	Wärmepumpe ü.E.	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
	Fernwärme	X		X	X	X	X	X	X		X	
	Gasbrennwertkessel									X		X
	Gas-BHKW		X									
	Abluftwärmepumpe	X				X						
Kühlen	freie Kühlung ü.E.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	rev. Wärmepumpe ü.E.		X				X		X	X		
	DSC-Anlage		X									
	Kompressionskältemaschine ü.K.			X	X						X	X
	Absorptionskältemaschine ü. K.							X			X	
	nur Kühlturm							X	X			

EWS - Erdwärmesonden    EP - Energiepfähle    BA - Bodenabsorber  
 ü. E. = über Erdreich    ü. K. = über Kühlturm

## Raumbene (Zonensystem / Büroraum)

Auf Raumbene liegt der Schwerpunkt beim jeweiligen Wärme- bzw. Kälte-Übergabesystem (Betonkernaktivierung, Deckensegel, Heizkörper, Fußbodenheizung, etc.). Hierzu werden die jeweiligen Systeme und ihre Verknüpfung ermittelt (siehe Abbildung 34). Des Weiteren spielt die Art der Lüftung (Fensterlüftung, mechanische Lüftung) eine entscheidende Rolle und in wie weit die vorhandenen Systeme sich gegenseitig beeinflussen können.



**Abbildung 34:** Beispiel eines umgesetzten Raumkonzepts: heizen (links) und kühlen (rechts)

In zehn von elf im Rahmen des Forschungsprojekts untersuchten Gebäuden wird die Erdwärme in Verbindung mit der Betonkernaktivierung eingesetzt. Ausnahmefall ist die Gelsenwasser AG (Projekt 2, GEW). Das Gebäude ist mit Deckensegeln zum Heizen und Kühlen ausgestattet. Aufgrund des hohen Verglasungsanteils wird ein flinkes Übergabesystem im Gebäude benötigt.

## Heizen

Im Rahmen der Grobanalyse hat sich gezeigt, dass die für den Heizbetrieb gewählte Kombination aus träger Betonkernaktivierung (BKT) und einem unabhängigen zweiten System aus einer flinken statischen Heizung und / oder Raumluftheizungsanlage (RLT) eine gängige anlagentechnische Lösung ist (siehe Tabelle 5). Zusätzliche flinke Systeme ermöglichen eine individuelle Regelbarkeit und gewährleisten an kalten Wintertagen die Spitzenlastabdeckung des Raums bzw. der Zone. Der Parallelbetrieb von trägem und flinkem Übergabesystem in einem Raum ist regelungstechnisch allerdings nicht ganz unproblematisch. Ein außer Kraft setzen der trägen Bauteilaktivierung durch das flinkere System ist unbedingt regelungstechnisch zu vermeiden.

Bei der Wärmeverteilung bzw. -übergabe liegt das Temperaturniveau (Vor- und Rücklauftemperatur im Auslegungsfall) für die jeweiligen Systeme wie folgt:

- Heizkörper 60°C / 40°C bis 70°C / 55°C
- Fußbodenheizung 30°C / 25°C bis 50°C / 40°C
- Betonkernaktivierung um 28°C / 25°C
- Deckensegel 33°C / 30°C
- Luftboxen 30°C / 25°C
- Heizregister RLT-Anlage 40°C / 34°C (über Erdwärme)  
bis 70°C / 45°C (über Fernwärme)

## Kühlen

Eine sehr effiziente und in allen hier untersuchten Gebäuden umgesetzte Lösung ist die Gebäudekühlung ausschließlich über die Betonkernaktivierung (Tabelle 5). Allerdings hat diese Systemlösung in der begrenzten Kühlleistung und der hohen Trägheit seine Grenzen. Bei einem schnellen Wechsel von Heiz- zu Kühlanforderung steht die Kühlleistung daher nicht sofort zur Verfügung und auch an extremen Sommertagen kann es zu Temperaturanstiegen in den Räumen über die gewünschten Sollwerte kommen (siehe Kapitel 5.3.6).

Um Tauwasserbildung zu vermeiden, sind bei der Kombination von Kühlflächen wie der Betonkernaktivierung mit natürlicher Lüftung darüber hinaus die Oberflächentemperaturen und somit die Systemtemperaturen nach unten begrenzt.

Die Büroräume der 11 analysierten Gebäude weisen je zur Hälfte eine natürliche Fensterlüftung bzw. eine mechanische Lüftung über eine RLT-Anlage auf. Die Kälteversorgung der mechanischen Belüftung erfolgt dabei zu ca. 50% über das vorhandene Erdwärmesystem. Die andere Hälfte wird über eine Kältemaschine versorgt.

Bei der Kälteverteilung bzw. -übergabe liegt das Temperaturniveau (Vor- und Rücklauftemperatur im Auslegungsfall) für die jeweiligen Systeme wie folgt:

- Fußbodenkühlung 22°C / 25°C
- Betonkernaktivierung um 18°C / 22°C
- Deckensegel 16°C / 19°C
- Luftboxen 18°C / 25°C
- Kühlregister RLT-Anlage 8°C / 14°C bis 16°C / 19°C
- Umluftkühlgeräte um 6°C / 12°C

**Tabelle 5:** Übersicht der Raumkonzepte zum Heizen und Kühlen

Raumebene	Projekt-Nr.	EWS				EP				BA		
		1 RIC	2 GEW (Neubau)	3 NRH	4 URO	5 EFB	6 VGH	7 BIH	8 KAI	9 AOK	10 TUB	11 AOC
Heizen	Betonkernaktivierung	Δ			X	X	X	X	X	X	X	
	Deckensegel / Heizdecke		X									
	Fußbodenheizung	Δ								Δ		
				•								
	raumlufttechnische-Anlage		X	(Saal)	•	•	X*)	•	X		•	•
	Luftboxen	Δ										
	Unterflurkonvektoren							•				
	Fensterlüftung			✓			✓	✓		✓	✓	✓
Radiatoren / Konvektoren			•	•	•	•	•	Δ	Δ	•	•	
Kühlen	Betonkernaktivierung	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Deckensegel / Kühldecken		X					•		X		
	Fußbodenkühlung	X						•				
					•					X	•	X
	Umluftkühlgerät (ULK)											
	raumlufttechnische-Anlage		•	(Saal)	•		X	•	Δ		•	X
	Luftboxen	X										
	Fensterlüftung		✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓

EWS - Erdwärmesonden EP - Energiepfähle BA - Bodenabsorber  
X - Erdwärme • - anderer Erzeuger Δ - beide Erzeuger ✓ - vorhanden  
\*) Nachheizung über Fernwärme

## Regelstrategie

Die in den untersuchten Gebäuden verwendeten Regelstrategien werden in Tabelle 6 zusammengefasst. Dabei wird nur auf die vereinfachte Regelstrategie und Schaltung der Systeme untereinander eingegangen. Die Aufnahme der detaillierten Regelungsparameter ist dem Anhang zu entnehmen (Kapitel 7.4 – Steckbriefe der einzelnen Gebäude).

Die Definition der Betriebsweisen und Regelstrategien auf der Erzeugerseite lauten:

**Parallelbetrieb:** Die vorhandenen Wärme- und Kälteerzeuger speisen einen gemeinsamen Verteiler, Speicher oder hydraulische Weiche. Von hier aus, werden alle Verteil- und Übergabesysteme gemeinsam versorgt.

**Einzelbetrieb:** Jeder Wärme- und Kälteerzeuger hat sein eigenes Übergabesystem. Eine Vermischung der erzeugten Wärme oder Kälte findet nicht statt. Beim Einzelbetrieb kann die Versorgung auf verschiedenen Tempera-

turniveaus sehr gut abgedeckt werden. Zudem kann jeder Erzeuger effizient umgesetzt und für das entsprechende Temperaturniveau bzw. -hub dimensioniert werden.

*Wechselbetrieb:* Zeitlich versetzt erfolgt die Versorgung, z.B. in der Nacht über das Erdreich und tagsüber über eine Kältemaschine.

Auf Raumebene erfolgt die Definition für

Tabelle 6 und den dort zusammengefassten Regelstrategien wie folgt:

*Parallelbetrieb:* Die in einer Zone vorhandenen Übergabesysteme versorgen gleichzeitig die Zone mit Wärme oder Kälte. In einer Winternacht erfolgt bei der Kombination von BKT und statischer Heizung meist eine Nachtabsenkung der statischen Heizung.

Hier ist auf eine sorgfältige Abstimmung der Systeme zu achten. Andernfalls kann es passieren, dass die statische Heizung die Wärme erzeugt und die trägere BKT nicht zum Einsatz kommt oder sogar durch den Selbstregulierungseffekt eher die Wärme aus den Räumen ableitet.

*Reihenbetrieb:* Innerhalb einer Zone sind mindestens zwei Übergabesysteme vorhanden, die meist in Abhängigkeit einer gemittelten Außentemperatur unterschiedliche Freigabegrenzen aufweisen. So kann z.B. die trägere BKT die Räume soweit vorkonditionieren, dass eine statische Heizung erst bei niedrigeren Außentemperaturen zugeschaltet werden muss, wenn die Heizleistung über die BKT nicht mehr alleine abgedeckt werden kann.

*Wechselbetrieb:* Wie bei den Erzeugern erfolgt ein zeitlicher Wechsel zwischen den Übergabesystemen innerhalb einer Zone. Der am häufigsten vorgekommene Fall liegt in der wechselseitigen Konditionierung der Räume über die BKT in der Nacht und tagsüber über die RLT-Anlage. Eine direkte Beeinflussung der Systeme untereinander kann so vermieden werden.

Des Weiteren kann anhand

Tabelle 6 festgestellt werden, dass nicht alle Gebäude ein Totband verwenden, in dem weder geheizt noch gekühlt wird. Sechs der untersuchten Gebäude weisen einen fließenden Betrieb zwischen Heiz- und Kühlbetrieb auf. Ohne einer klaren Begrenzung und / oder sorgfältigen Abstimmung von Heiz- und Kühlfall, kann es in der Übergangszeit (Herbst und Frühling) vorkommen, dass das Gebäude in der Nacht über die thermische Bauteilaktivierung beheizt wird und am Tag aufgrund der internen Lasten im Gebäude wieder heruntergekühlt werden muss (siehe auch aufgestellte Regeln, Kapitel 6.1.2).

**Tabelle 6:** Übersicht der Regelkonzepte

Gebäudekonzept / Raumkonzept		EWS				EP				BA		
Projekt-Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Objekt		RIC	GEW	NRH	URO	EFB	VGH	BIH	KAI	AOK	TUB	AOC
Heizen	<i>Wärmeerzeuger</i>											
	Erzeugeranzahl	3	1	nur FW	2	3	2	2	2	2	2	nur Kessel
	Parallelbetrieb	x							x (***)	x		
	Einzelbetrieb				x	x	x	x				
	Wechselbetrieb											
	<i>Übergabeschaltung</i>											
	Parallelbetrieb	x	x									x
	Reihenbetrieb				x	x	x	x		x		
	Wechselbetrieb						x *)		x *)			
	Kühlen	<i>Kälteerzeuger</i>										
Erzeugeranzahl		1	1	RKW + EWS	RKW + EWS	1	1	RKW + EP	RKW + EP	1	3	RKW + BA
Parallelbetrieb									x (***)		x	
Einzelbetrieb					x							x
Wechselbetrieb				x				x				
<i>Übergabeschaltung</i>			nur DS			nur BKT		nur BKT				
Parallelbetrieb		x			x					x	x	
Reihenbetrieb												
Wechselbetrieb				x			x		x			x
Allgemein		Totband	x				x		x			

RKW - Rückkühlwerk auf dem Dach; EP - Energiepfahl; EWS - Erdwärmesonde; BA - Bodenabsorber  
\*) - BKT und RL; \*\*) - RKW und BA; \*\*\*) - Nachspeisung

## Vor- und Nachteile

Im Folgenden werden die aus den untersuchten Gebäuden umgesetzten Systemkombinationen bewertet und bezüglich der Plausibilität in der Anwendung geprüft.

Aufgrund der unterschiedlichen Gebäudenutzung können die Vor- und Nachteile der Systeme etwas anders gelagert sein. Anders als bei einer reinen Büronutzung muss z.B. in einer Bibliothek den individuellen Komfortansprüchen kaum Rechnung getragen werden.

- 👍 Bei Bibliotheken wird ein einheitliches Raumklima gefordert, wofür sich die Betonkernaktivierung gekoppelt mit einem Erdwärmesystem hervorragend eignet.
- 👍 Bei einem Betrieb zur Grundlastdeckung mit Systemtemperaturen nahe der gewünschten Raumtemperatur können auch kleinere Bedarfsschwankungen über die Betonkernaktivierung gut abgepuffert werden.
- 👍 Bei einem Betrieb der Betonkernaktivierung in den Nachtstunden im Sommer kann durch die Beschränkung auf die Betonkernaktivierung, diese effizient mit Systemtemperaturen nahe dem Temperaturniveau im Erdreich betrieben werden.  
Darüber hinaus wird im Heizbetrieb die Vorlauf-Temperatur der statischen Heizung in der Nacht abgesenkt und es besteht keine Überschneidung / -lagerung zum Betrieb der Betonkernaktivierung.
- 👎 Um auf flinke Bedarfsschwankungen zu reagieren, ist das System Erdwärme – Betonkernaktivierung zu träge. Die Kombination mit z.B. raumluftechnischen Anlagen, die schnell in der Lage sind interne Lasten abzuführen, ist daher sinnvoll.
- 👎 Wird die Betonkernaktivierung nur in den Nachtstunden beladen (Nachtbetrieb), nimmt die Kühlleistung der Decken im Laufe des Tages ab. Da die gespeicherte Kälte im Gegensatz zu einem Dauerbetrieb nicht kontinuierlich zur Verfügung steht bzw. nachgeliefert wird, sondern langsam abbaut.
- 👎 Während des Lüftungsanlagenbetriebs über das Erdwärmesystem, ist eine stärkere Absenkung der Vorlauf-Temperatur erforderlich (z.B. auf 6°C / 12°C). Somit ist der Be-

trieb über eine Kältemaschinen notwendig. Im Fall einer vorhandenen reversiblen Wärmepumpe ergeben sich höhere Eintrittstemperaturen ins Erdreich als im normalen freien Kühlbetrieb (z.B. 18°C / 20°C). Das Erdreich wird somit stärker erwärmt.



Problematisch ist im Sommer der Wechsel vom Kältemaschinenbetrieb (reversible Wärmepumpe) zurück in den freien Kühlbetrieb der Betonkernaktivierung. Die Zeit zur Abkühlung des Wärmeträgers im Erdreich auf das für die freie Kühlung erforderliche Temperaturniveau unmittelbar nach dem Wechsel ist vermutlich zu kurz, so dass häufig weiterhin die Übergabesysteme im Kältemaschinenbetrieb laufen müssen, um die gewünschten Vorlauf-Temperaturen zu erreichen.

### 4.3.2. Planungs- und Auslegungswerte

Nachfolgend werden die Planungs- und Auslegungswerte der einzelnen Gebäude in Bezug auf Deckungsanteile, geothermische Ergiebigkeit und Anlageneffizienz zusammengestellt und bewertet. Hierzu werden spezifische Kennwerte berechnet

#### 4.3.2.1. Geplante / prognostizierte Deckungsanteile Heizen und Kühlen

Der geplante Deckungsanteil der bereitgestellten Wärme über Geothermie bei den hier untersuchten Gebäuden schwankt zwischen 13 und 100%. Bei der Versorgung im Kühlfall zwischen 10 und 100%. Abbildung 35 stellt die spezifische Heizleistung sowie den Deckungsanteil an der Jahresheizlast des Wärmepumpensystems dar. Je geringer die prognostizierte spezifische Heizleistung des Wärmesystems über Geothermie, desto geringer ist auch der geplante Deckungsanteil an der Jahresheizlast.

Analog dazu zeigt Abbildung 36 die spezifische Kühlleistung sowie den Deckungsanteil an der Jahreskühlleistung. Vergleicht man die spezifischen Leistungen vom Heizen und Kühlen, ergeben sich höhere Werte in Bezug auf den Kühlfall. Ca. 1/3 der untersuchten Gebäude sieht die 100%-ige Deckung der Kältelast über den Erdwärmespeicher vor.

Die dargestellten Deckungsanteile zeigen, dass bei den analysierten Gebäuden zwar regenerative Energie umgesetzt wird, der Anteil aus der Planung jedoch gering gehalten wird. Meist stellt dieser Teil nur die Grundlastabdeckung dar. Die Umsetzung und Einbindung von oberflächennaher Geothermie ist bei diesen Gebäuden daher noch als Entwicklungs- und Versuchsstatus zu sehen.

Anzumerken bleibt, dass die erdgekoppelten Systeme stark durch die Gebäudehülle (Konstruktion, Bauphysik, Verschattung, Fensterflächenanteil, etc.) sowie die Nutzung des Gebäudes beeinflusst werden. So ist bei der Unibibliothek Rostock (URO) ein deutlich höherer Deckungsanteil geplant, als im Vergleich zum EnergieForum (EFB) mit ungefähr gleicher spezifischer Heizleistung. Im Vergleich Neues Regionshaus Hannover (NRH) zum Gebäude BIH soll im sommerlichen Kühlfall die gleiche Kühlleistung erzielt werden, der Deckungsanteil unterscheidet sich jedoch deutlich um ein 8-faches.

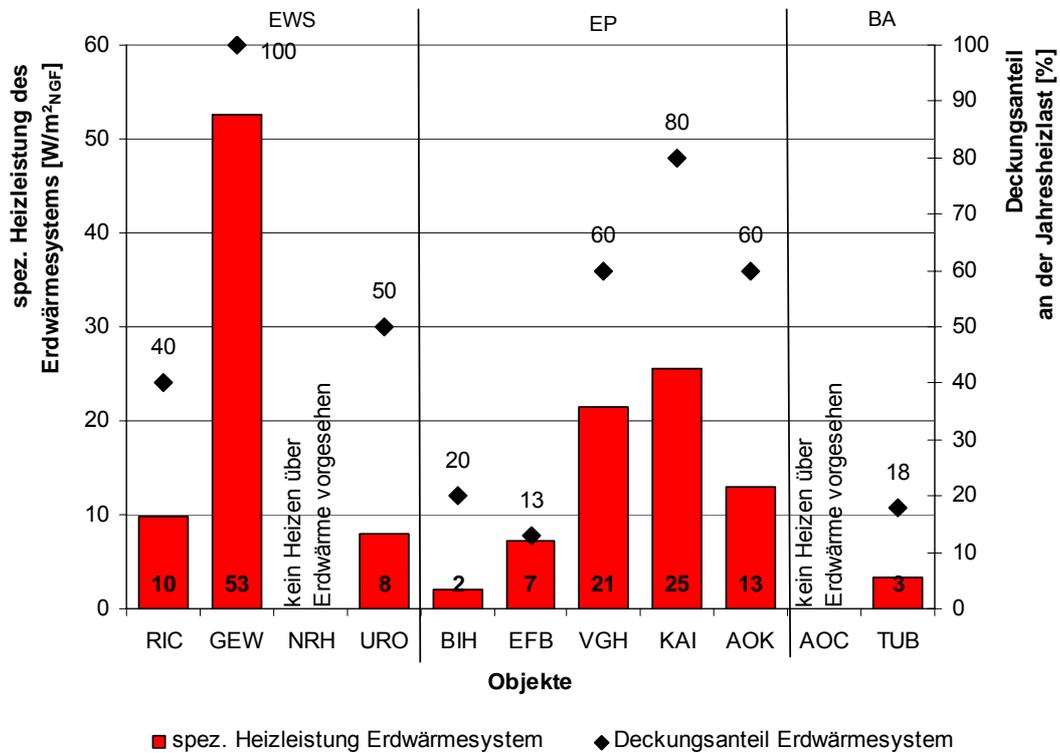


Abbildung 35: spezifische Heizleistung des Erdwärmesystems (Wärmepumpe) pro Nutzfläche; Deckungsanteil an Jahresheizlast

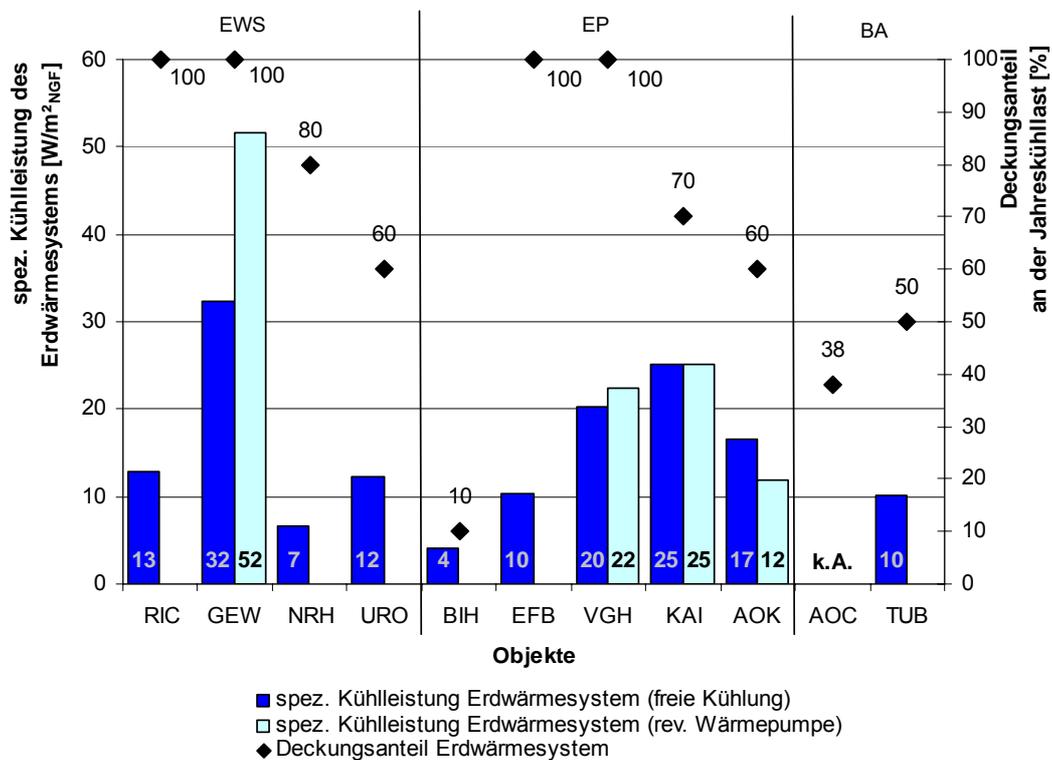
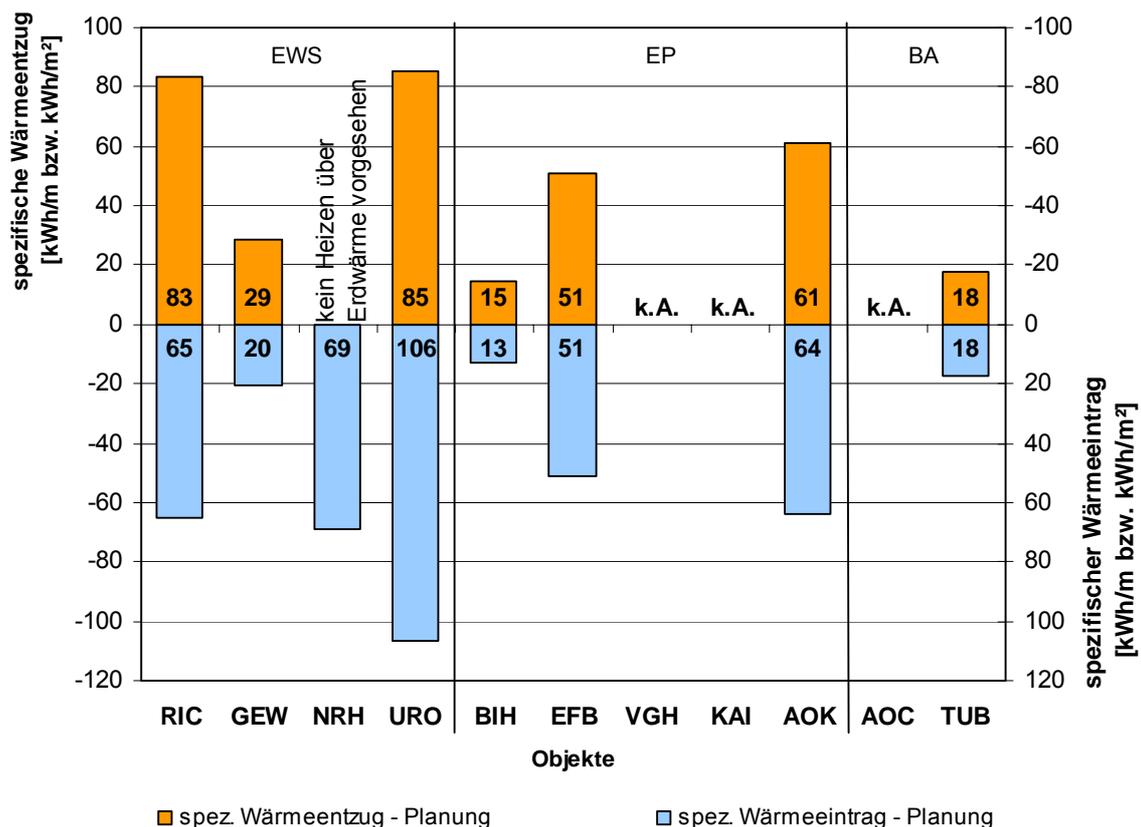


Abbildung 36: spezifische Kühlleistung des Erdwärmesystems aufgeteilt nach freier Kühlung und reversibler Wärmepumpe pro Nutzfläche; Deckungsanteil an der Jahreskühllast

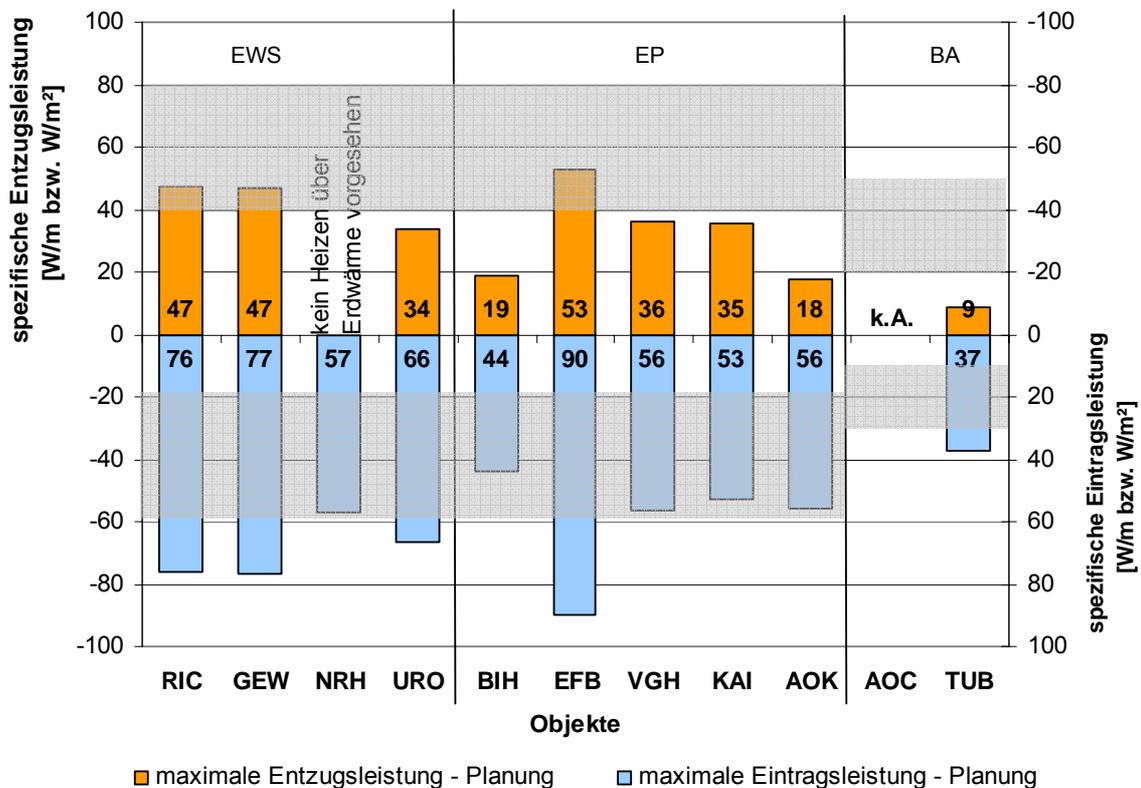
#### 4.3.2.2. Geplante / prognostizierte geothermische Ergiebigkeit sowie spezifische Entzugs- und Eintragsleistung

In Abbildung 37 sind die aus der Planung der Gebäude hervorgegangenen geothermischen Ergiebigkeiten, d.h. spezifischer Wärmeeintrag und Wärmeentzug, bezogen auf die Speichergröße (m bzw. m<sup>2</sup>) für ein Betriebsjahr dargestellt. An den Planungswerten ist bereits zu erkennen, dass bei einigen Erdwärmesystemen von vornherein von keiner ausgeglichenen Energiebilanz im Erdreich ausgegangen wird.

Zusätzlich zeigt Abbildung 38 die aus der Planung definierten mittleren spezifischen Eintrags- und Entzugsleistungen. Dabei sind die Leistungsbereiche gekennzeichnet, wie sie in der Literatur und von Herstellern von Erdwärmespeichern angegeben werden. Ein Vergleich dieser Werte mit den Planungswerten zeigt, dass die Eintragsleistungen zum Teil die Werte aus der Literatur widerspiegeln bzw. sogar darüber liegen, die Entzugsleistungen in den meisten Fällen jedoch darunter liegen.



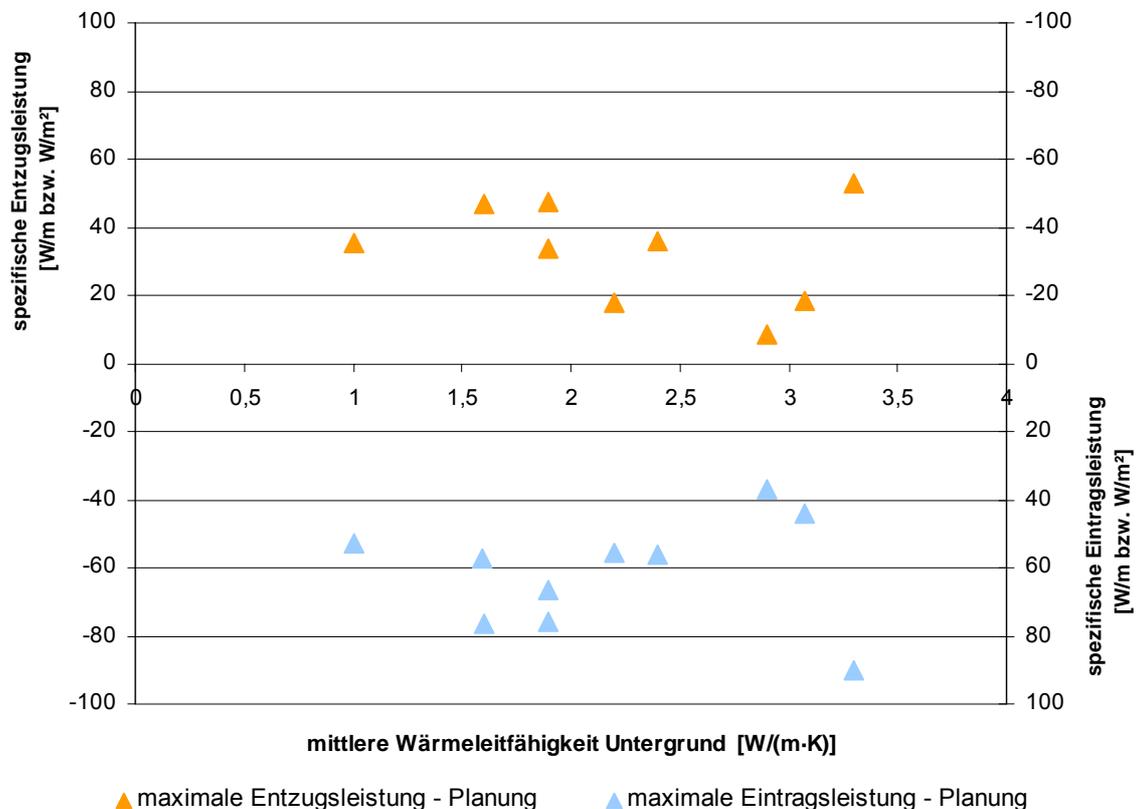
**Abbildung 37:** Planungswerte der geothermischen Ergiebigkeit (spez. Wärmeeintrag und Wärmeentzug) bezogen auf die jeweilige Speichergröße



**Abbildung 38:** Planungswerte der maximalen spezifischen Eintrags- und Entzugsleistung bezogen auf die jeweilige Speichergröße

Bei der Gegenüberstellung der Entzugs- bzw. Eintragsleistung gegenüber der mittleren Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes an den evaluierten Gebäuden, siehe Abbildung 39, ist keine Abhängigkeit zu erkennen. Verteilt über eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 1,0 bis 3,5 W/mK schwanken die Eintragsleistungen zwischen 35 bis 90 W/m bzw. W/m<sup>2</sup> und bei der Entzugsleistung zwischen 10 bis 50 W/m bzw. W/m<sup>2</sup>.

Festzustellen ist jedoch, dass im Vergleich zum Heizfall im Kühlfall von einer deutlich höheren Eintragsleistung (rund 50%) ausgegangen wird.



**Abbildung 39:** Gegenüberstellung geplante Entzugs- / Eintragsleistung über ermittelte mittlere Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes

#### 4.3.2.3. Geplante / prognostizierte Anlageneffizienz

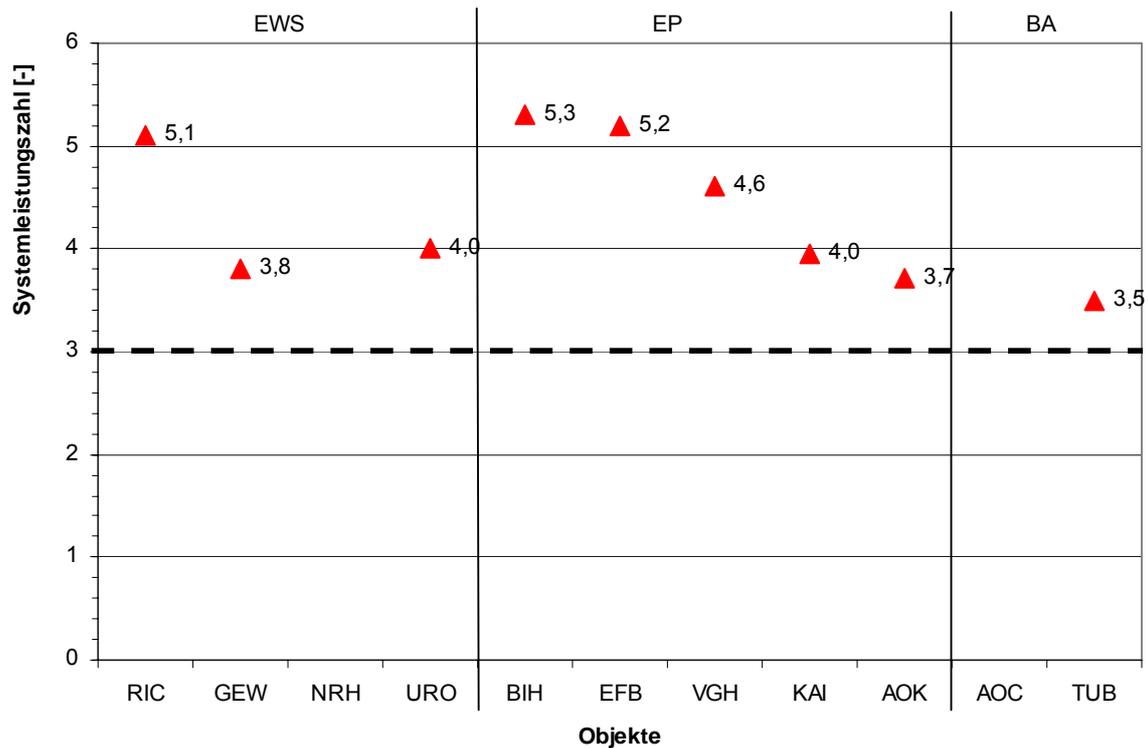
Die geplante bzw. prognostizierte **Jahressystem-Leistungszahl** wird aus der Nennleistung der Anlagen, der maximalen elektrischen Leistung der Wärmepumpe (WP) bzw. Kältemaschine (KM) und der primärseitigen Umwälzpumpe (UP) wie folgt ermittelt:

$$\text{Jahressystem – Leistungszahl} = \frac{\text{Nennleistung}_{WP \text{ bzw. } KM}}{\text{elektrische Antriebsleistung}_{WP \text{ bzw. } KM + UP}}$$

Die Jahressystem-Leistungszahl von Wärmepumpen-, freiem Kühl- und Kältemaschinenbetrieb sind in ihrer Größenordnung sehr unterschiedlich. Aus primärenergetischer Sicht gilt der Wärmepumpenbetrieb bei einer Systemarbeitszahl größer 3 als effizient. Im Kältemaschinenbetrieb (reversible Wärmepumpe) sollte die Arbeitszahl einen Wert größer 2,5 erreichen. Dem gegenüber ist der freie Kühlbetrieb besonders effizient, hier ist lediglich ein elektrischer Energieaufwand auf der Erzeugerseite für den Antrieb der Umwälzpumpen des Erdwärmespeichers erforderlich. Bei richtiger Dimensionierung und Betriebsweise sind im freien Kühlbetrieb Jahressystem-Leistungszahlen größer 20 realisierbar.

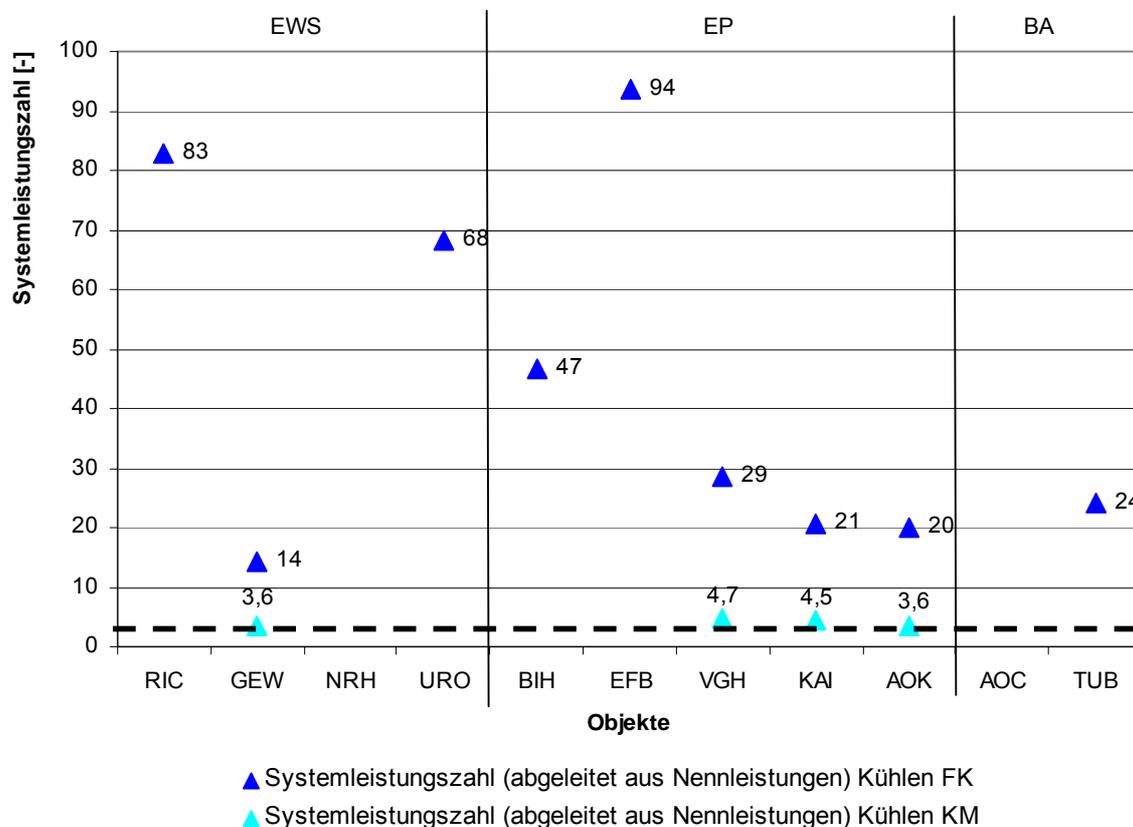
Die geplanten bzw. prognostizieren System-Leistungszahlen für den Heizfall liegen zwischen 3,3 und 5,3 und befinden sich alle im effizienten Bereich, siehe Abbildung 40.

Für den freien Kühlbetrieb werden Leistungszahlen von 14 bis 94 prognostiziert. Der Kältemaschinenbetrieb (reversible Wärmepumpe) wird ähnlich wie die Wärmepumpe im Heizbetrieb mit einer Leistungszahl von rund 4 geplant und befindet sich somit ebenfalls im effizienten Bereich, siehe Abbildung 41.



▲ Systemleistungszahl (abgeleitet aus Nennleistungen) Heizen

**Abbildung 40:** geplante Jahressystem-Leistungszahl Heizen - Wärmepumpe



**Abbildung 41:** geplante Jahressystem-Leistungszahl Kühlen – Freie Kühlung und Kältemaschine (reversible Wärmepumpe)

Der **Speichernutzungsgrad** wird aus dem Verhältnis der dem Speicher entzogenen Energie (Entzugsenergie) und der dem Speicher zugefügten Energie (Eintragsenergie) wie folgt ermittelt:

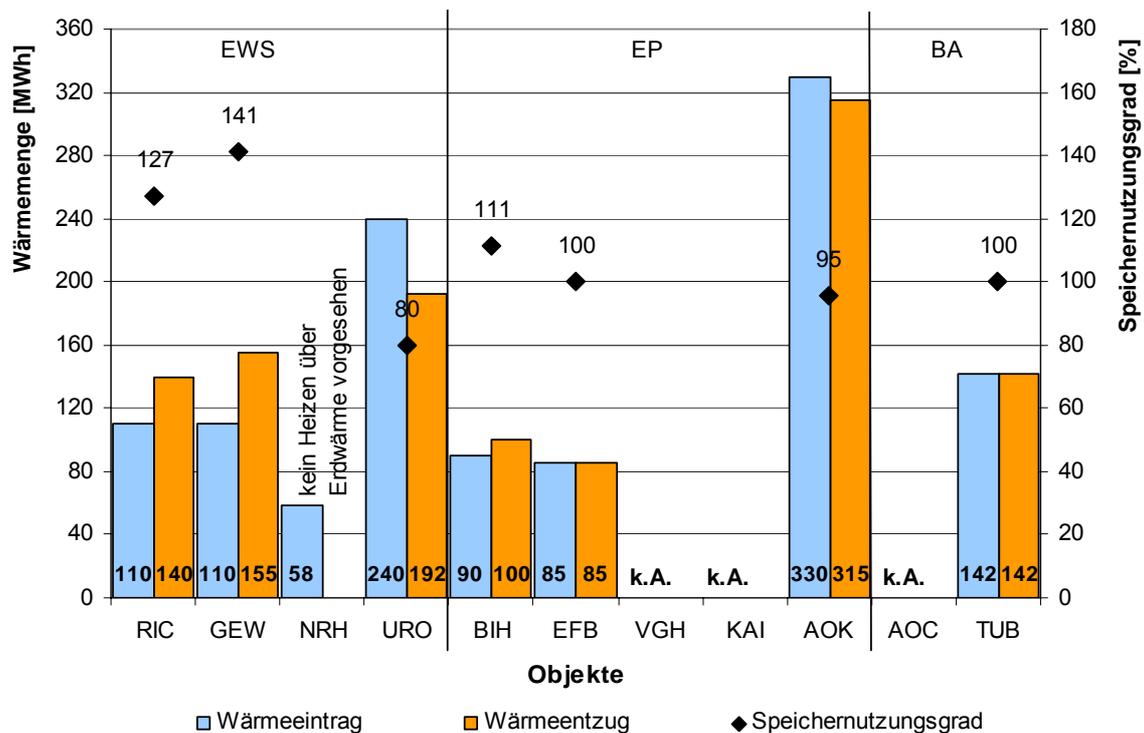
$$\text{Speichernutzungsgrad} = \frac{\text{Entzugsenergie}}{\text{Eintragsenergie}}$$

Bei Erdwärmespeichern kann der Nutzungsgrad mit der Zeit sinken oder ansteigen, weil Wärme an die Umgebung abgegeben oder aus der Umgebung nachströmen kann. Abhängigkeiten sind hier die anstehenden Bodenkennwerte und -parameter. Das aufgeführte Verhältnis gilt gleichermaßen für den Wärmespeicherzyklus als auch für den Kältespeicherzyklus.

Die in Abbildung 42 aufgeführten prozentualen Speichernutzungsgrade stellen das prognostizierte jährliche Mittel der evaluierten Anlagen dar. Zusätzlich sind die Energiemengen des Wärmeeintrags- und des Wärmeentzugs dargestellt. Der geplante prozentuale Speichernutzungsgrad der hier untersuchten Gebäude beträgt je nach Erdwärmespeicher 80 bis 141%

Bei einem Speichernutzungsgrad < 100% wird dem Speicher mehr Wärme zugeführt als entzogen. Hier kann dann der Fall vorliegen, dass aus der Umgebung Wärme nachströmt und sich das Erdreich zusätzlich passiv regeneriert. Andernfalls bestünde die Gefahr, dass das Erdreich im Laufe der Betriebsjahre auskühlt.

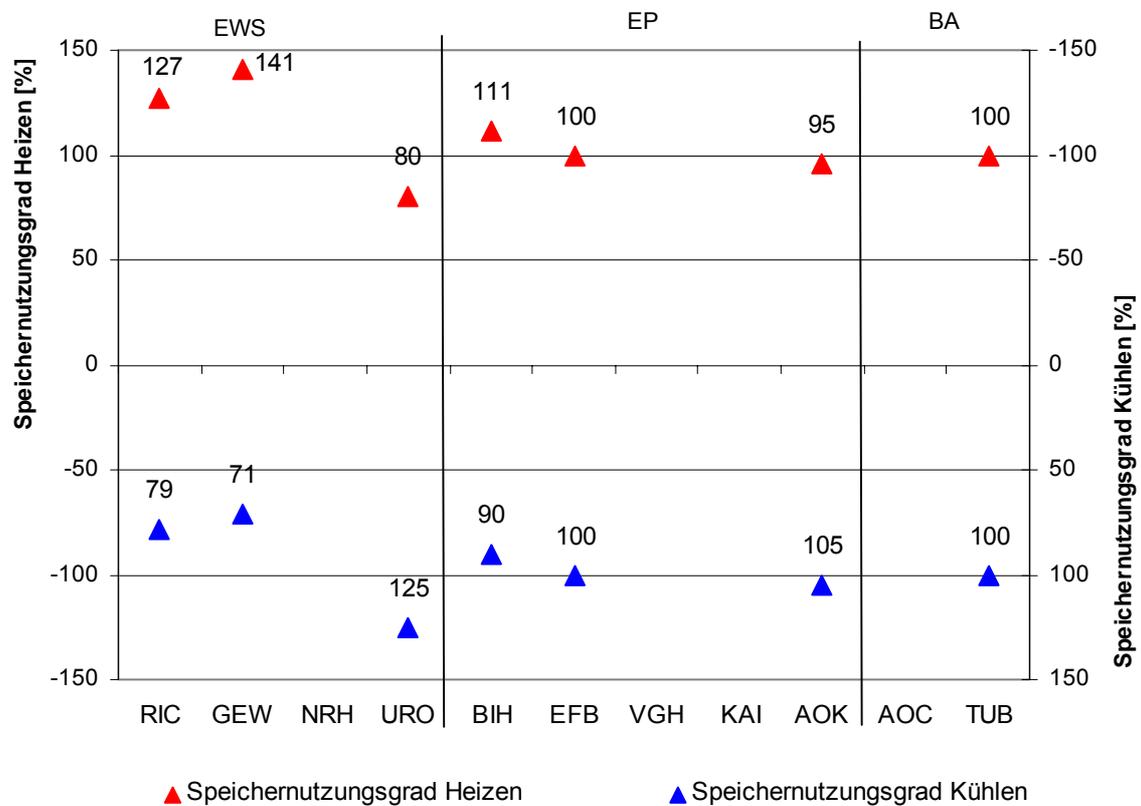
Bei einem Nutzungsgrad > 100% ist die Situation umgekehrt und die gespeicherte Wärme wird an das umliegende Erdreich abgegeben oder das Erdreich würde sich in den Betriebsjahren immer mehr aufwärmen.



**Abbildung 42:** prognostizierter prozentualer Speichernutzungsgrad der Erdwärmespeicher sowie jährlicher Wärmeeintrag und Wärmeentzug des Erdspeichers

In Abbildung 43 sind getrennt nach Wärme- und Kältezyklus die Speichernutzungsgrade abgebildet. Gemäß VDI 4640 Teil 3 sollte das Verhältnis des Speichernutzungsgrads für eine richtig dimensionierte Energieversorgungsanlage bei Wärmespeicherung > 50% und bei Kältespeicherung > 70% betragen. Bei den hier untersuchten Anlagen handelt es sich jedoch um saisonale Speicher, während es sich bei den Zielwerten in der VDI jedoch um einseitige Speicher handelt. Die VDI-Angaben können aber als Richtwerte gut herangezogen werden.

Im Vergleich zu den in der VDI 4640 vorgegebenen Speichernutzungsgraden, haben die Planungswerte die Vorgaben erreicht.



**Abbildung 43:** Verhältnis des prognostizierter Speichernutzungsgrad für Heizen und Kühlen der Erdwärmespeicher

## 5. PHASE II - FEINANALYSE

Im Mittelpunkt der Evaluierung der Phase II steht die Analyse der energetischen und wirtschaftlichen Effizienz der Gebäude hinsichtlich des Betriebs der geothermischen Erdwärmanlage.

Zur Bewertung und zum Vergleich der Anlagen werden auf Basis der Messwerte Kennzahlen, wie Primärenergieverbrauch der Anlagen und Komponenten, Arbeitszahlen der Anlagen, Speicherkapazität des Erdreichs, etc. gebildet.

Die ebenfalls in Phase II eingegliederte Potentialabschätzung zur Wetterprognosen-gestützten Regelung thermisch aktivierter Bauteile wird im Teil II des Forschungsberichtes behandelt und dokumentiert.

### 5.1. Methodik und Vorgehen bei der Auswertung (Phase II)

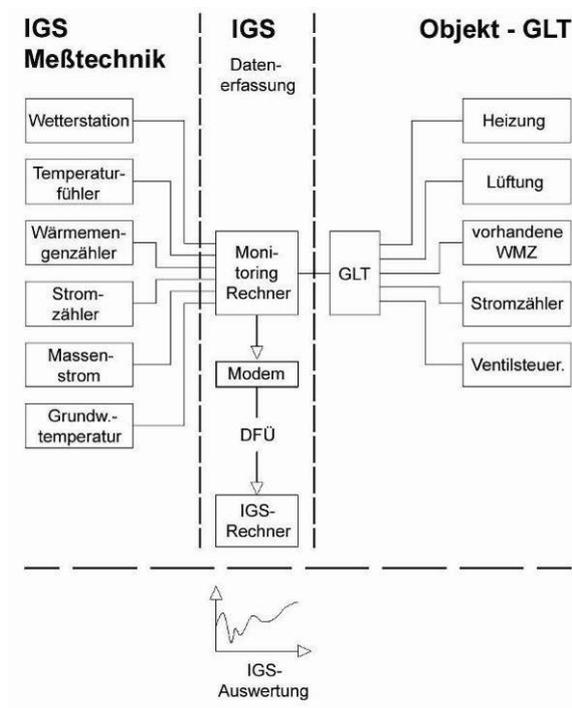
Durch die Vorauswahl und sorgfältige Anamnese in der Grobanalyse kann in PHASE II eine Auswahl der Gebäude zum Monitoring sowie der relevanten Messdaten erfolgen. Zur effektiven Betriebsüberwachung von Gebäude und Anlagen wurde im Vorfeld jeweils ein Monitoring-Konzept entwickelt und umgesetzt.

Für eine erfolgreiche Bilanzierung des Energiehaushaltes sollen durch die Messstrategie alle direkten und indirekten Einflussgrößen einbezogen und über einen größeren Zeitraum (mehrere Heiz- und Kühlperioden) gemessen, ausgewertet und dokumentiert werden. Als direkte Einflussgrößen sind dabei alle Betriebsgrößen der Anlagentechnik anzusehen, die im direkten Zusammenhang mit der Nutzung der Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich stehen. Hierzu zählen die Erfassung der Wärme- und Kälteerträge, der Regelungsabläufe, des Stromverbrauchs der einzelnen Anlagenabschnitte (Umwälzpumpen, Wärmepumpe und Kältemaschine) sowie die Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmeübertragungssysteme.

Äußere Wetterbedingungen, Grundwasser- und Erdreichtemperaturen und die Bedingungen im Gebäude selbst stellen indirekte Einflussgrößen auf den Betrieb der zu untersuchenden Anlagen dar.

Die Messungen der PHASE II sollen primär die Aufgabe erfüllen, eine gesicherte ganzheitliche Bilanzierung der untersuchten Anlagen zu ermöglichen. Dabei muss die Messtechnik aus Kosten- und Zeitgründen so auf die vorhandene Anlagentechnik aufgeschaltet werden, dass sie ohne direkten Eingriff in diese oder in die bauliche Struktur angebracht und vernetzt werden kann. Dies soll je nach Erfordernis durch den Einsatz mobiler und zum Teil drahtlos vernetzbarer digitaler Messtechnik erreicht werden.

Die gesamte Datenerfassung für ein Objekt soll dann größtenteils vor Ort durch einen Monitoring-Rechner erfolgen. Jeder dieser Monitoring-Rechner wird vom IGS via Fernzugriff ferngesteuert und gewartet. Die Datenerfassung und der Datenfluss vom Messgerät über den Rechner bis zur Auswertung sind in Abbildung 44 dargestellt. Zahlreiche Systemparameter, wie Betriebszustände, Schaltzeiten, Medien- und Raumtemperaturen als auch Energieverbräuche, können so über längere Zeiträume aufgezeichnet und analysiert werden.



**Abbildung 44:** Messdaten in einem Gebäude der Phase II

Die Auswertung der Daten erfolgt objektspezifisch. Dabei werden die folgenden Gesichtspunkte betrachtet und dargestellt:

- Energieeffizienz der Gesamtanlage und ihrer wichtigsten Komponenten
- Betriebsverhalten und Regellogik der Anlagen
- Speicherverhalten
- Einfluss äußerer Randbedingungen auf die Anlage.

In einem weiteren Auswertungsschritt werden Optimierungsansätze für jede der untersuchten Anlagen abgeleitet. Diese Optimierungsansätze fließen einerseits in die Ausarbeitung zukünftiger Planungswerkzeuge und andererseits in eine direkte Rückkopplung für den einzelnen Gebäudebetreiber ein (siehe Abbildung 45). Durch diese Rückkopplung an die Gebäudebetreiber können die Auswirkungen der Optimierungsansätze innerhalb der Messkampagne überwacht und beurteilt werden.

PHASE II gliedert sich somit in die folgenden Arbeitsschritte:

- **Einbau mobiler Messtechnik:** Erstellung von Messkonzepten, Planung, Einbau, Erprobung
- **Messung, Auswertung 1:** Messdatenerfassung, Auswertung, Kurzbilanzierung, Fehleranalyse, Fehlerbehebung
- **Messung, Auswertung 2:** , Messdatenerfassung, Auswertung, Bilanzierung, Optimierung
- **Dokumentation**

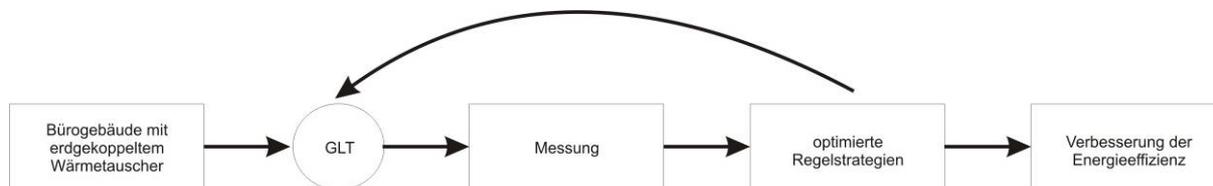


Abbildung 45: Ziel und Vorgehensweise Phase II

## 5.2. Voruntersuchung der Erdwärmesysteme

Für die Feinanalyse (Phase II) werden fünf Gebäude aus der Grobanalyse (Phase I) zur genauen messtechnischen Untersuchung ausgewählt. Anhand der nachfolgend aufgelisteten und aufgestellten Kriterien erfolgt die Auswahl der Anlagen:

- Jeder Speichertyp (Erdsonden, Energiepfähle, Bodenabsorber) soll mindestens einmal der effektiven Betriebsüberwachung unterstellt werden.
- Die Aufnahme der Messwerte setzt eine Gebäudeleittechnik voraus, welche die noch fehlenden Messwerte aufnehmen kann. Ein eigenes Messdatenerfassungssystem sieht das eingestellte Kostenbudget nicht vor.
- Die Anlage weist eine gute Revisionsplanung (Dokumentation) mit allen benötigten Auslegungsunterlagen auf.
- Die Installation der zusätzlichen Messtechnik soll schnell und unkompliziert realisierbar sein.

Nach vielen Gesprächen und Vorort Terminen werden für die Feinanalyse des Forschungsvorhabens folgende Anlagen ausgewählt:

Projekt 1	Gebäude RIC, Hamburg (RIC)
Projekt 2	Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen (GEW)
Projekt 5	EnergieForum Berlin (EFB)
Projekt 6	VGH Regionaldirektion, Lüneburg (VGH)
Projekt 10	VW-Bibliothek Berlin (TUB)

Nach Aufschaltung der zur Auswertung nötigen Messtechnik auf die Gebäudeleittechnik werden in einem ersten Schritt über eine Kurzbilanzierung die Anlagen bewertet. Dabei wird dauerlicherweise festgestellt, dass vier der fünf Anlagen zur saisonalen Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund nicht planungsgemäß funktionieren. Ursachen liegen meist nicht in der Planung und Auslegung der Anlagen, sondern vielmehr in der Ausführung und der Kombination mit anderen Systemen zum Heizen und Kühlen sowie dem Betrieb und fehlender Betriebsüberwachung.

Aufgrund eingeschränkter Funktionalität und fehlerhafter Betriebsweisen in den ersten Betriebsjahren sowie ungünstiger Systemkombinationen mussten daher fast alle im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Objekte erst in einen funktionsfähigen Regelbetrieb überführt werden.

Dabei wird in zwei Schritten vorgegangen. Anhand der aufgezeichneten Messdaten werden die Fehler analysiert und behoben. Anschließend erfolgt die Optimierung des Anlagenbetriebs. Anzumerken bleibt, dass die benötigten Zeiten zur Fehlerbehebung und thermischen

Regeneration des Erdreichs je nach Wirkungsfaktor zum Teil mehrere Jahre erfordern. So war es nicht möglich alle Anlagen innerhalb des dargestellten Messzeitraums in einen planungsgemäßen Betrieb zu überführen und die vorhandenen Optimierungspotentiale voll auszuschöpfen.

Ein wesentliches Problem der Anlagen zur thermischen Speicherung im Erdreich stellt deren mangelnde Abstimmung mit dem restlichen Anlagenbetrieb der Gebäude dar. Aufgrund der engen Zusammenhänge und Abhängigkeiten aller Systeme und Komponenten voneinander ist die Betrachtung einzelner Komponenten meist nicht ausreichend. Bei den Betriebsanalysen galt es deshalb, nicht nur die Anlagen zur thermischen Speicherung im Erdreich, sondern auch alle andern Anlagen zur Konditionierung des Gebäudes und deren gegenseitiger Beeinflussung zu untersuchen und wo möglich zu optimieren.

Im Anschluss werden für die fünf untersuchten Gebäude die wichtigsten Punkte der Fehleranalyse, Fehlerbeseitigung und Anlagenoptimierung dokumentiert.

### 5.2.1. Fehleranalyse und -beseitigung

Im Vergleich zu konventionellen Heiz- und Kühlsystemen stellen Erdwärmespeicher aufgrund ihrer Trägheit und des Zusammenspiels von Grund- und Spitzenlastkomponenten einen Sonderfall hinsichtlich der Aufdeckung von System- und Betriebsfehlern dar. Ohne gezielte Betriebsüberwachung werden Fehler aufgrund der Systemträgheit häufig erst deutlich verzögert – manchmal erst nach Jahren – bemerkt. Das Erdreich ist dann im ungünstigsten Fall schon deutlich unterkühlt oder überwärmt. Nach Behebung des Fehlers ist der Speicher für die entsprechende Betriebsart – Heizen oder Kühlen – möglicherweise für längere Zeit nicht nutzbar. Das Erdreich muss sich thermisch erst wieder regenerieren.

Durch das Monitoring wird bei den meisten Gebäuden der nicht auslegungsgemäße Betriebszustand der Anlagen messtechnisch nachgewiesen. Aus diesem Grund sind zu Beginn des Monitorings Fehleranalysen und Fehlerbeseitigungen notwendig, um die Gebäude in einen Regelbetrieb zu überführen. Erst dann waren die Betriebsdaten für die Zielsetzung des Vorhabens verwendbar und es konnte mit den eigentlichen Messungen und der Evaluierung begonnen werden.

Wesentliche Punkte der zuvor durchgeführten Mängel- und Fehlerbeseitigung waren u.a.:

- Hydraulikuntersuchung: Fehler im Einbau oder in der Regelung der Hydraulik, wie nicht ordnungsgemäß schließende Motorventile, falsch eingebaute Rückschlagklappen oder öffnende Ventile ohne Heiz- oder Kühlmedium
- Regelung der geothermischen Anlage
- Abstimmungen der einzelnen Übergabesysteme und Komponenten

Im Folgenden sollen die folgenreichsten Fehler- und Mängel sowie deren Behebung und Ergebnisse für die einzelnen Gebäude aufgeführt werden. Im Rahmen der Mängelauflistung sollen auch die Problemstellungen genannt werden, die u.a. durch Optimierungen oder Änderungen der Regelstrategien behoben werden mussten.

#### Projekt 1 – Gebäude RIC, Hamburg (RIC)

Mitte 2007 können erstmalig alle Messdaten aus der Gebäudeleittechnik (GLT) verwertet werden. Auf dieser Basis wird in der Heizperiode 2007/2008 eine Austrittstemperatur aus dem Erdreich von unter  $-2\text{ °C}$  in den Monaten November bis März festgestellt. Die Wärmepumpe ist für diese niedrigen Temperaturen nicht ausgelegt und arbeitet in diesem Bereich nicht effi-

zient. Bei Temperaturen  $< 0^{\circ}\text{C}$  kann zudem durch die Frostgefahr, die Hinterfüllung zerstört werden. Die Folge einer defekten Hinterfüllung ist eine schlechte Wärmeübertragung zwischen Erdreich und Sonde. Die Wärmepumpe wird seitdem bei Aus- und Eintrittstemperaturen  $< 0^{\circ}\text{C}$  manuell abgeschaltet.

Zudem wird bei dem Gebäude RIC festgestellt, dass der Plattenwärmetauscher (PWT) zur hydraulischen Trennung des Erdsondenkreises vom Heiz-/Kühlsystem des Gebäudes nicht richtig ausgelegt und für die geringe Temperaturspreizung im freien Kühlbetrieb zu klein dimensioniert ist. Lediglich 30% der geplanten Leistung werden erreicht. Diese Leistung ist jedoch zur Deckung des Kühlbedarfs des Gebäudes sowie zur Regeneration des Erdreichs zu klein. Sowohl Raumtemperaturen über den geplanten und gewünschten Werten als auch ein kontinuierliches Abkühlen des Erdreichs sind die Folge. Anfang 2009 wird der alte PWT gegen einen den Randbedingungen angepasster PWT ausgetauscht.

Die gewünschte Leistung wird nun bis zu einer gemittelten Außentemperatur von ca.  $20^{\circ}\text{C}$  erreicht. Bei höheren gemittelten Außentemperaturen fällt die Leistung des PWT auf einen Wert von 50% ab. Anhand der Messwerte ist zu erkennen, dass ab einer gemittelten Außentemperatur von  $20\text{-}21^{\circ}\text{C}$  die Austrittstemperatur aus den Erdwärmesonden (EWS) dauerhaft über der für die Auslegung des PWT definierten Temperatur ansteigt. Eine höhere Austrittstemperatur der EWS bedingt somit eine geringere Kühlleistung des PWT.

Des Weiteren wird eine falsch ausgelegte Umwälzpumpe im Erdsondenkreis (UP\_EWS) erkannt, welche im Betrieb unnötig Strom verbraucht. Die Höhe des Stromverbrauchs kann über das folgende Verhältnis abgeschätzt werden:

$$\text{Effizienz}_{UP\_EWS} = \frac{\text{Stromverbrauch}_{UP\_EWS}}{\text{Stromverbrauch}_{WP} + \text{Stromverbrauch}_{UP\_EWS}}$$

Zu Beginn des Monitorings liegt das Verhältnis bei 19 %. Ein optimales Verhältnis des Stromverbrauchs zwischen Wärmepumpe und Umwälzpumpe liegt bei  $\leq 10\%$ . Anfang 2008 findet der Austausch der Umwälzpumpe statt. Das Verhältnis konnte seitdem auf  $< 2\%$  gesenkt und der Stromverbrauch für die Umwälzpumpe um mehr als 50% reduziert werden.

## Projekt 2 - Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen (GEW)

Das Energiekonzept der Gelsenwasser AG sieht vor, dass im Heizfall ein kombinierter Heiz- und Kühlbetrieb stattfindet. Die vom Kondensator der Wärmepumpe bereitgestellte Wärme wird zur Beheizung des transparenten Hauses genutzt, dabei dienen Gebäudebereiche mit Kühlbedarf als Wärmequelle der Wärmepumpe. Kann der Heizbedarf nicht vollständig über die bei der Gebäudekühlung gewonnene Wärme gedeckt werden, wird zusätzlich dem Erdreich Wärme entzogen.

Da die benötigte Wärme hauptsächlich aus dem Gebäude stammt, statt aus dem Erdreich, konnte in den ersten Betriebsjahren dem Erdreich nur wenig Wärme entzogen werden.

Im Sommer wird zusätzlich ca. 85 % der Kälte durch einen reinen Kältemaschinen-Kühlbetrieb bereitgestellt. Die Planung sieht jedoch vor, dass ca. 68 % der Kälte aus dem freien Kühlbetrieb und nur 32 % aus dem Kältemaschinen-Kühlbetrieb kommen.

Der erhöhte reine Kältemaschinen-Kühlbetrieb sowie der geringe Wärmeentzug führen zu

- einem unplanmäßig erhöhten Stromverbrauch,
- einem schnellen Ansteigen der Erdreichtemperaturen,
- keiner Nutzbarkeit des Erdreichs im effizienten freien Kühlbetrieb.



Damit das Erdreich langfristig nicht stetig erwärmt wird, so dass eine Nutzung des freien Kühlbetriebs gar nicht mehr möglich ist, ist der Wärmeentzug im Verhältnis zum Wärmeeintrag deutlich zu steigern. Das Erdreich sollte soweit abgekühlt werden und die Bilanz zwischen Wärmeeintrag und -entzug in einem ausgewogenen Verhältnis gebracht werden, dass dauerhaft ein effizienter freier Kühlbetrieb realisiert werden kann.

Bei der Gelsenwasser AG wurde daher im Monitoring und der Optimierungsphase hauptsächlich die Steigerung des freien Kühlbetriebs sowie des Wärmeentzugs ins Auge gefasst.

### **Projekt 5 - EnergieForum Berlin (EFB)**

Das EnergieForum Berlin wird bereits seit der Planung 2002 vom IGS im Rahmen anderer Projekte (SolarBau:Monitor und EVA) begleitet. Durch das seit Betriebsbeginn stattfindende Monitoring und die damit verbundene Kontrolle, konnten anfängliche Regelungs- und Hydraulikprobleme rechtzeitig erkannt und größtenteils vermieden werden.

Im Internet können auf der Webseite von SolarBau:Monitor (<http://www.archiv.solarbau.de>) entsprechende Dokumente zur Fehleranalyse- und Beseitigung nach Inbetriebnahme des Gebäudes heruntergeladen werden.

### **Projekt 6 - VGH Regionaldirektion, Lüneburg (VGH)**

Das Gesamtsystem der VGH hat in den ersten Betriebsjahren nicht zuverlässig funktioniert. Ausführungsfehler und schlecht abgestimmte Regelstrategien für die einzelnen Systembausteine sind Ursachen dieser Probleme. So werden unter anderem einige Fehler in der Regelung, in der hydraulischen Verteilung (Einbau einer Klappe zur Rücklaufbeimischung) sowie Fehler in der Vorlauftemperaturregelung im System identifiziert.

Zu Beginn des Monitorings wird festgestellt, dass eine Umschaltung nur zwischen Heiz- und Kühlbetrieb stattfindet, eine Abschaltung der Anlage bei fehlender Anforderung findet nicht statt. Nach einer Umprogrammierung der internen Steuereinheit konnte der Fehler behoben werden. Eine Abschaltung der Anlage ist seitdem möglich.

In Zusammenarbeit mit der zuständigen Firma für die geothermische Energiezentrale wird eine auf das Gesamtsystem abgestimmte Betriebs- und Regelstrategie entwickelt und umgesetzt. Der planmäßige Heizbetrieb über die an das Erdreich gekoppelte Wärmepumpe funktioniert seit März 2007.

Aufgrund einer fehlerhaften Umsetzung von Änderungen zwischen der internen Regelung der geothermischen Energiezentrale und der Regelung im restlichen System kann die reversible Wärmepumpe nicht den regulären Betrieb aufnehmen. Diese ging überwiegend in den Störbetrieb. Eine freie Kühlung funktionierte nicht. Erst im November 2008 werden die festgelegten Regelungen in der internen Schaltung der geothermischen Energiezentrale umgesetzt. Seit Sommer 2009 funktioniert nun auch der planmäßige Kühlbetrieb.

Des Weiteren führt ein unkontrollierter bzw. gegen die planmäßige Regelung wirkender Umwälzpumpenbetrieb zu einem hohen Wärmeeintrag ohne Wärme bzw. Kälteabgabe an das Gebäude. Nach einer Anpassung des Betriebs der Umwälzpumpen an die Betriebszustände und an die Anforderungen des Systems kann die Erdwärmenutzung gesteigert werden.

Auch in der Lüftungsanlage werden Missstände aufgedeckt. So kann anhand der Messwerte der GLT festgestellt werden, dass während der Nacht und am Wochenende die Umwälzpumpen der Heizregister der RLT-Anlage im System der geothermischen Energiezentrale laufen und darüber hinaus mit Fernwärme versorgt werden. Planmäßig soll die Lüftungsanlage während dieser Zeit außer Betrieb sein. Nach einer Prüfung und Umstellung der Betriebszeiten der Lüftungsanlage kann der planmäßige Betrieb realisiert werden.



### Projekt 10 - VW-Bibliothek, Berlin (TUB)

Bei der VW-Bibliothek findet in den ersten Betriebsjahren eine erhebliche Erwärmung des Erdreichs statt. Infolge dessen steht im Sommer 2006 keine Kühlleistung für den freien Kühlbetrieb zur Verfügung und der Bodenabsorber wird außer Betrieb genommen. Wesentliche Teile der Gebäudekühlung werden durch nachträglich installierte alternative Systeme sichergestellt (siehe auch Kapitel 5.3.2).

Auch bei der VW-Bibliothek werden zu Beginn des Monitorings technische und hydraulische Mängel im System Bodenabsorber und Betonkernaktivierung (BKT) behoben.

Als Folge einer nicht funktionierenden Sorptionsanlage mit hohen Zulufttemperaturen und fehlender Befeuchtung der Zuluft, ergeben sich über die Planungsgrößen hinausgehende Wärmelasten im Gebäude. Eine Reduzierung dieser Mängel wird u.a. durch Korrekturen bei den Lüftungsklappen, nachträgliche Wärmeisolierung von Trennblechen und dem Austausch defekter Sprühdüsen erreicht.

#### 5.2.2. Optimierungsmaßnahmen

Nach Abschluss der Fehleranalyse werden die Anlagen in den Optimierungsprozess überführt. Die nachfolgende Auflistung der Optimierungsmaßnahmen in den einzelnen Gebäuden stellt einen Überblick der typischsten Maßnahmen dar. Generell können aber für die Optimierung allgemein gültige Punkte festgehalten werden.

Um dem Erdreich möglichst viel Wärme zu entziehen muss die Einspeisung von Fernwärme o. ä. ausschließlich auf die Abdeckung von Spitzen beschränkt werden. Weiterhin wird im Rahmen der Optimierungsmaßnahmen bei den meisten Gebäuden zunächst die Empfehlung ausgesprochen, dass eine Nachtabsenkung der statischen Heizung erforderlich ist, damit der Wärmebedarf des Gebäudes nicht wie mehrheitlich zum größten Teil über die statische Heizung, sondern verstärkt über die Betonkerntemperierung gedeckt werden kann.

Zudem wird festgestellt, dass bei einigen Gebäuden die Volumenströme nicht den Auslegungswerten entsprechen und daher angepasst werden müssen. Anhaltspunkte hierfür sind die sehr geringen Temperaturspreizungen zwischen Ein- und Austrittstemperatur der Erdwärmesysteme sowie zwischen Vor- und Rücklauftemperatur des Verdampfers. Weiterhin werden größtenteils die geplanten Kühlleistungen nicht erreicht. Ursache ist neben der geringen Leistungsabnahme auf der Kondensatorseite und somit eine sehr geringe Auslastung der Wärmepumpe, meist auch ein zu hoher oder geringer Volumenstrom im Erdwärme- und Verdampferkreis. Für einen optimalen Wärmeübergang sollte der Volumenstrom im Erdwärmekreis so eingestellt werden, dass die Rohrströmung einer Reynoldszahl  $R_e > 2300$  (Übergangsbereich zwischen laminar zu turbulent) entspricht. Bei geringeren Fluidtemperaturen ist aufgrund der höheren Viskosität der meisten verwendeten Fluide ein größerer Volumenstrom erforderlich, um eine turbulente Strömung zu erreichen. Es sollte daher darauf geachtet werden, dass ggf. der Volumenstrom den Jahreszeiten angepasst wird. Ein angepasster Volumenstrom kann neben einer Verbesserung des Wärmeübergangs zwischen Wärmeträger und Erdreich auch eine Reduzierung des Energieverbrauchs der Umwälzpumpe und somit eine Optimierung der Systemarbeitszahl bewirken.

### Projekt 1 – Gebäude RIC, Hamburg (RIC)

Die Optimierungsmaßnahmen beim Gebäude RIC können sich im Rahmen des Forschungsvorhabens nur auf eine Überarbeitung des Regelungskonzepts der Vorlauf (VL)-Temperaturen für den Heiz- und Kühlfall beschränken. So wird u.a. empfohlen und umgesetzt:

- Die VL-Temperatur in die Betonkernaktivierung (BKT) sollte nach oben hin begrenzt werden. Eine konstante VL-Temperatur von max. 30 °C ab einer gemittelten Außentemperatur von 0 °C sollte ausreichend sein, um das Gebäude zu beheizen. Weiter steigende VL-Temperaturen können zu Unbehaglichkeit bei den Nutzern führen.
- Aufgrund des trägen Systems sollte eine einheitliche Regelung der BKT erfolgen. Eine zuvor eingestellte Nachtabenkung bzw. Anhebung im Sommerbetrieb kann entfallen.

### **Projekt 2 - Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen (GEW)**

Neben dem deutlich höheren Wärmeeintrag in das Erdreich im Sommer als der Wärmeentzug im Winter, geht die an das Erdreich gekoppelte Kältemaschine viel zu früh in Betrieb. Das Erdreich schafft es in der Regel nicht, bis zur nächsten Kälteanforderung das deutlich höhere Temperaturniveau aus dem Rückkühlkreis der Kältemaschine auf das für die freie Kühlung erforderliche Temperaturniveau herunter zu kühlen. Die im Vergleich zum Kältemaschinenbetrieb deutlich effizientere Betriebsweise der freien Kühlung kommt so kaum zum Einsatz.

Im Laufe des Jahres 2007 können die Optimierungsmaßnahmen zur Reduzierung des Kältebedarfs des Gebäudes und zur Anpassung der Feigabezeiten der Kältemaschine an die tatsächlichen Randbedingungen umgesetzt werden. So wird unter anderem die nächtliche Gebäudekühlung durch eine natürliche Lüftung statt einer Kühlung über die Lüftungsanlage ersetzt. Darüber hinaus wird für den Kältemaschinenbetrieb die Freigabegrenze der Austrittstemperatur aus der Erdsondenanlage von 16 °C auf 18 °C angehoben und somit die Laufzeit im effizienteren freien Kühlbetrieb ausgebaut. Die Monitoringergebnisse 2007 dokumentieren den Erfolg dieser Maßnahmen (Kapitel 5.3). Der Wärmeeintrag in das Erdreich aber auch die Betriebszeiten der Kältemaschine werden gegenüber dem Jahr 2006 deutlich reduziert.

Zur Reduzierung von Strom- und Energiekosten wird bei der Gelsenwasser AG auch das Lüftungskonzept überarbeitet. Bei entsprechenden Außen- und Raumtemperaturen sind eine natürliche Lüftung und eine Auskühlung der Büros über die Fassadenklappen auch am Wochenende durchgehend möglich. Außerhalb der Büronutzungszeiten am Wochenende erscheint allerdings ein Luftaustausch in den Büros als auch die strikte Einhaltung der Sollwerte der Raumtemperaturen nicht zwingend erforderlich. Ein durchgehender Betrieb des Abluftventilators erscheint daher am Wochenende nicht sinnvoll. Um den Elektroenergieverbrauch zu reduzieren, wird daher eine Beschränkung des Abluftventilatorbetriebs und eine natürliche Lüftung und Kühlung über die Fassadenklappen beispielsweise auf die Nachtstunden umgesetzt. Um wirklich Energie zu sparen, muss jedoch auch darauf geachtet werden, dass das Heiz- und Kühlsystem des Gebäudes auch einen leichten Anstieg der Temperaturen am Wochenende zulässt. Anstelle der Raumkühlung über die natürliche Lüftung kommt es sonst möglicherweise zu einer ungewollten Kühlung über das Erdreich

Nachtauskühlung und Nachtbetrieb des Außenluft-Ventilators erscheint in den Wintermonaten bei kalten Außentemperaturen nicht sinnvoll. Um eine übermäßige Auskühlung der Büros und einen unnötigen Wärmeverbrauch zur Wiederaufheizung zu vermeiden, sollte ein Auffahren der Fassadenklappen und ein Betrieb des Abluft-Ventilators bei sehr kalten Außentemperaturen z.B. im Winter nachts unterbunden werden.

### **Projekt 5 - EnergieForum Berlin (EFB)**

Zur Erhaltung der Dauerhaftigkeit der Anlage wird empfohlen, dem Erdreich mehr Wärme zu entziehen. Seit der Heizperiode 2007/2008 wird dem Erdreich doppelt soviel Wärme entzogen wie zugeführt. Erste Erfolge lassen sich anhand der Kühlperiode 2008 ablesen. Die Austritts-



temperatur in der Kühlperiode 2008 lag bei vergleichbaren Witterungsbedingungen um ca. 2 K unterhalb der Temperatur vom Vorjahr (siehe Kapitel 5.3.2).

### Projekt 6 - VGH Regionaldirektion, Lüneburg (VGH)

Eine mangelhafte Abstimmung von Gebäudenutzung, GLT-Regelung und Energiezentrale haben die Funktionsfähigkeit der Anlage erheblich eingeschränkt bzw. blockiert. Die geforderte Wärmeleistung wird in den ersten Betriebsjahren über die Nachheizung der Fernwärme abgedeckt.

Für das System Erdwärmenutzung wird im Rahmen des Forschungsprojektes ein neues Regelungskonzept entwickelt. Wesentliche regelungstechnische Änderungen sind:

- Zukünftig wird die BKT mit einer konstanten Vorlauf(VL)-Temperatur von 24 °C und der Erhitzer der RLT-Anlage mit einer VL-Temperatur zwischen 24 und 37 °C in Abhängigkeit der Außentemperatur betrieben. Zuvor sieht die Regelung VL-Temperaturen von konst. 23°C bei der RLT-Anlage und 37°C bei der BKT vor.
- Erweiterung der Soll-VL-Temperatur im Kühlbetrieb der RLT-Anlage von konstant 12 °C auf einen Temperaturbereich zwischen 18°C und 6°C in Abhängigkeit der momentanen Außentemperatur, so dass zum Beginn der Kühlperiode freier Kühlbetrieb möglich ist.
- Berücksichtigung eines Totbands und Abschaltung der Energiepfehanlage im BKT-Betrieb bei einer mittleren Außentemperatur zwischen 18 und 22°C und im RLT-Anlagen-Betrieb bei einer momentanen Außentemperatur zwischen 18 und 22°C.
- Erweiterung des freien Kühlbetriebs auf die Zuluftkühlung der raumlufttechnischen Anlagen.
- Zur Anhebung des Deckungsanteils der Erdwärme an der Raumheizung wird empfohlen, die Vorlauftemperatur der BKT auf 26°C zu erhöhen. In einem Probetrieb sollte überprüft werden, ob die Nutzer die Räume aufgrund der höheren Deckentemperatur nicht als zu warm empfinden.

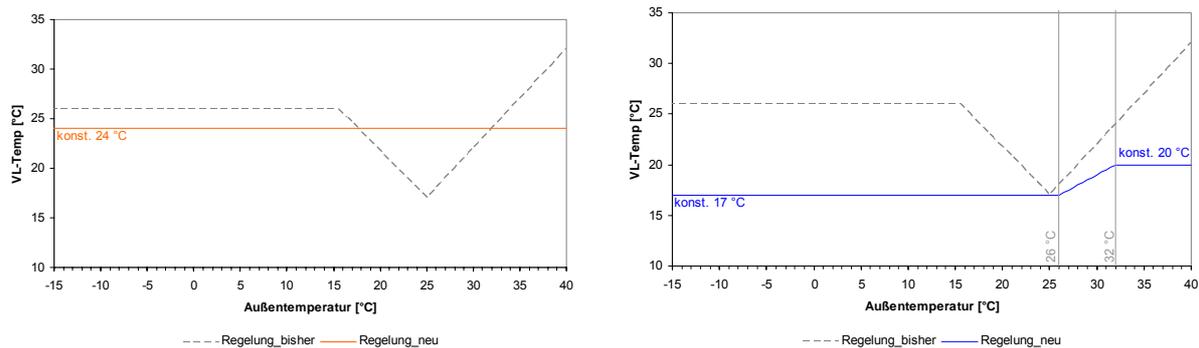
### Projekt 10 - VW-Bibliothek, Berlin (TUB)

Gute Erfolge der durchgeführten Betriebsoptimierungen lassen sich am Beispiel der Bodenabsorberanlage der Volkswagenbibliothek in Berlin zeigen. Sowohl der Wärmeentzug als auch die Effizienz der Anlage werden hier deutlich gesteigert (siehe Kapitel 5.3). Aus den anfänglichen Monitoringergebnissen können im Gebäudebetrieb angepasste Regelstrategien umgesetzt werden. Diese sind u.a.

- verbesserte regelungstechnische Abstimmung von Betonkernaktivierung und statischer Heizung,
- vollständiges und dauerhaftes Öffnen der BKT Ventile zur Steigerung des Deckungsanteils Erdwärme am Wärmebedarf der Bibliothek
- Lüftung in den frühen Morgenstunden über die Fenster in den Sheddächern und über die Fenster im Eingangsbereich, um in den Sommermonaten die fehlende Kühlleistung des Bodenabsorbers und die hohen internen Lasten besser abpuffern zu können.

### Regelung Betonkernaktivierung

Zu Beginn des Monitorings 2006 wird zunächst ein datumsbezogener Wechsel zwischen Kühl- auf Heizbetrieb mit entsprechend unterschiedlichen Soll-Vorlauftemperaturen der BKT eingerichtet. Zuvor erfolgte die Umstellung der BKT zwischen Heiz- und Kühlbetrieb über die Regelung der VL-Temperatur in Abhängigkeit der momentanen Außentemperatur (Abbildung 46). Speziell in der Übergangszeit mit kalten Temperaturen in der Nacht und warmen Temperaturen am Tag kommt es bei einer solchen Regelung zu einem ständigen Wechsel zwischen Heiz- und Kühlbetrieb.



**Abbildung 46:** Heiz- (links) und Kühlkurve (rechts) BKT, Stand Ursprung und 1. Optimierung

Um den Betrieb der BKT und des Bodenabsorbers besser an den Heiz- und Kühlbedarf des Gebäudes anzupassen und Probleme bei der datumsbezogenen Umstellung zwischen Heizen und Kühlen zu vermeiden, wird die BKT 2007 auf eine automatische Betriebsweise in Abhängigkeit des 72 Stunden-Mittels der Außentemperatur mit gleitender Vorlauftemperatur im Heizbetrieb zur Vermeidung eines Überheizens der Bibliothek umgestellt. Um den ständigen Wechsel zwischen Heiz- und Kühlbetrieb in der Übergangszeit zu vermeiden, sollte im Bereich des 72h-Mittels der Außentemperatur von 10 bis 15°C ein Totband eingeführt werden (Abbildung 47).

Im Betriebsjahr 2008 geht der Deckungsanteil der Erdwärme am Wärmebedarf der Bibliothek jedoch zurück, stattdessen wird dieser über die statische Heizung und somit über die Fernwärme gedeckt. Es wird empfohlen die Regelung der statischen Heizung noch einmal zu überprüfen und gegebenenfalls eine Absenkung der VL-Temperatur vorzunehmen. Die VL-Temperaturregelung der Betonkernaktivierung sollte jedoch beibehalten werden, bei Bedarf ist auch hier eine Senkung des VL-Temperaturniveaus möglich. Zu beachten ist, dass eine Senkung der VL-Temperatur der Betonkernaktivierung Einfluss auf alle Bereiche mit Betonkernaktivierung hat und ohne erneute Anpassung der Regelung der statischen Heizung der Deckungsanteil der Erdwärme wieder reduziert wird.

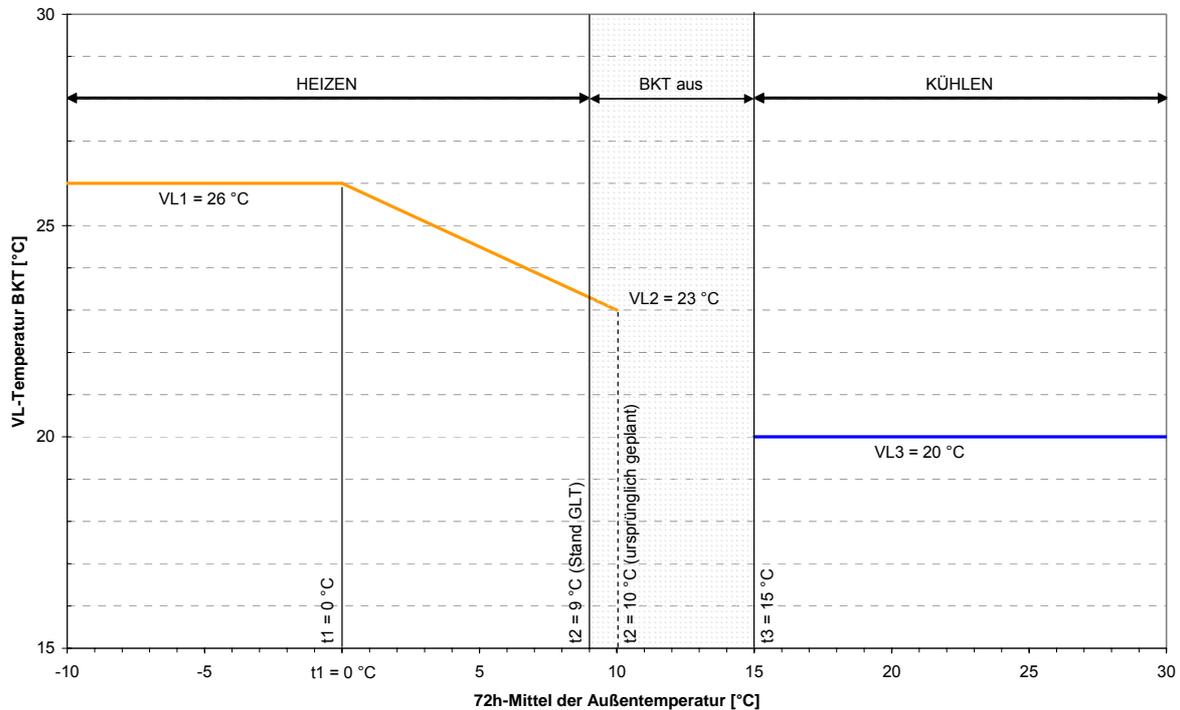


Abbildung 47: Heiz- und Kühlkurve BKT, Stand Endfassung Dezember 2008

### 5.3. Monitoringergebnisse

Bei den im Rahmen dieses Forschungsprojektes messtechnisch genauer betrachteten Gebäuden handelt es sich ausschließlich um Neubauten, die seit 2002 in Betrieb gegangen sind. Die Erfahrungen aus der Projektbegleitung zeigen, dass es möglich und sinnvoll ist, Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund in innovative Energiekonzepte von Büro- und Verwaltungsgebäuden zu integrieren. Es bedarf allerdings einer Einregulierungsphase, während der das direkte Zusammenspiel zwischen Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund, dem Gebäude, weiteren Anlagen zur thermischen Konditionierung und nicht zuletzt den Nutzern optimiert wird. Fehlende Erfahrungen bei ausführenden Firmen und den Betreibern der Anlagen verlängern diese Einregulierungsphase häufig deutlich.

Die betrachteten Anlagen sind zum Teil schon mehrere Jahre in Betrieb, bevor sie im Rahmen der Projektbegleitung näher analysiert werden. Bei den untersuchten Gebäuden und Anlagen sind Fehler daher zum Teil lange im Verborgenen geblieben und werden erst durch das Monitoring aufgedeckt und soweit möglich behoben. Die Messergebnisse spiegeln diese Zeiten der Fehlererkennung und -behebung sowie der anschließenden Betriebsoptimierung wieder und variieren von Jahr zu Jahr teilweise recht stark. Bei einigen Anlagen liegt das Temperaturniveau im Erdreich bereits außerhalb des für den ganzjährigen Betrieb erforderlichen Bereichs.

Bei der Betrachtung der Monitoringergebnisse sollte immer wieder die Verbindung zu den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 berücksichtigt werden. Die Maßnahmen zur Fehlerbehebung sowie Optimierung, die zu Veränderungen in den Effizienzen als auch Wärmemengen der Erdwärmespeicher geführt haben, werden bei den Monitoringergebnissen nur noch kurz aufgeführt.

In einer ersten Zusammenstellung erfolgen die Dokumentation der hydraulischen Einbindung der jeweiligen Systeme sowie die Kurzdarstellung der Messergebnisse.



### 5.3.1. Mess- und Anlagenkonzepte

Bei der Bestimmung von Energieerträgen und Energieeffizienz eines Erdwärmesystems, wird der Energiefluss der Erdwärme und -kälte vom Erdreich bis zum Verbraucher nachvollzogen. Erforderliche Messgrößen sind dabei der Wärmeeintrag und -entzug auf Seiten des Erdreichs, die dem Gebäude als Nutzenergie bereitgestellte Wärme bzw. Kälte sowie der erforderliche Elektroenergieaufwand für Umwälzpumpen, Wärmepumpe und gegebenenfalls Kältemaschine.

Neben den Energiemengen werden im Rahmen des Betriebsmonitorings und der -optimierung auch Volumenströme, Klappen- und Ventilstellungen, Schalt- und Betriebszustände von Energieerzeugern und Umwälzpumpen sowie an charakteristischen Punkten Temperaturen erfasst.

Zusätzlich zu den in den Abbildung 48 bis Abbildung 52 aufgeführten Wärme- und Kältemengenzählern (WMZ und KMZ) wurden bei weiteren in das Erdwärmesystem oder ins Gebäudekonzept eingebundenen Erzeugern Energiemessungen durchgeführt, um auch hier eine lückenlose Bilanzierung und eine eindeutige Effizienzbewertung zu erhalten.

Die Umsetzung des Messkonzepts sieht vor, dass eine Unterscheidung sowohl bei der thermischen Energie als auch bei der Elektroenergie nach Wärmepumpen-, freiem Kühl- und Kältemaschinenbetrieb möglich ist. So können neben dem Gesamtsystem auch die einzelnen Betriebsarten bilanziert und deren Effizienz bewertet werden.

Um Kosten und Aufwand für zusätzliche Messtechnik zu begrenzen, wird zur Analyse und Überprüfung des Anlagenbetriebs soweit möglich die Messtechnik und die Datenerfassung der Gebäudeautomation genutzt.

Für die Analyse werden Momentanwerte mit 15-minütigem Messintervall gewählt. Das Messintervall hat sich als guter Kompromiss zwischen Aussagekraft und Datenverarbeitbarkeit erwiesen.

#### Projekt 1 – Gebäude RIC, Hamburg (RIC)

Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Gebäuden erfolgt die Bereitstellung der Wärmeenergie beim Gebäude RIC parallel durch drei Erzeuger auf einen Verteiler.

Für die Bilanzierung wird der Energieverbrauch über die Fernwärme monatlich über den Anschlusszähler abgelesen. Aus der Differenz des WMZ\_R3, des WMZ\_R2 (Abbildung 48) und der Ablesung der Fernwärme können die Energiemengen der Abluftwärmepumpen ermittelt werden.

Eine genaue Differenzierung der Nutzenergieverbräuche der einzelnen Übergabesysteme Betonkernaktivierung, Luftboxen und Foyer findet nicht statt.

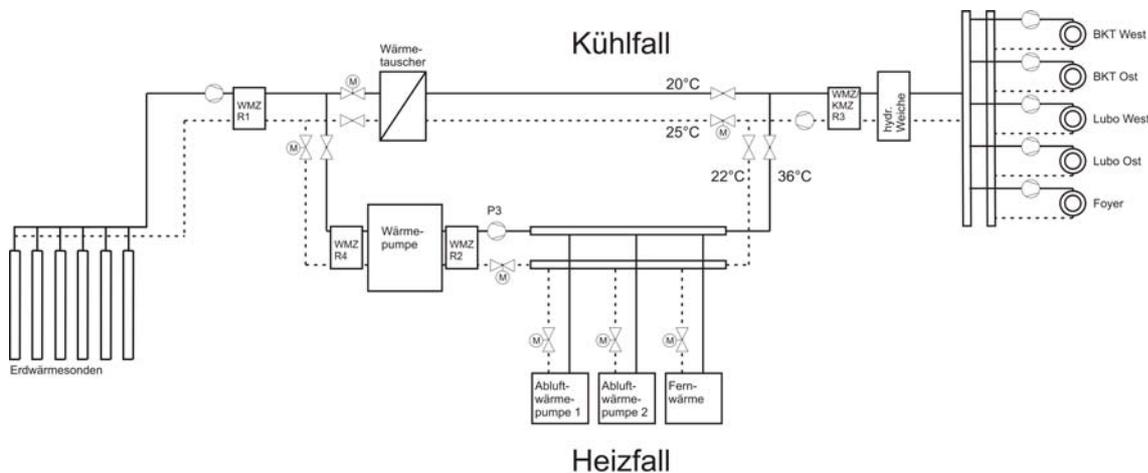


Abbildung 48: vereinfachtes hydraulisches Schema Gebäude RIC, Hamburg

Tabelle 7: Übersicht Messergebnisse Gebäude RIC, Hamburg

Wärme- und Kältebilanz Gebäude RIC, Hamburg		2005	2006	2007	2008	2009
<b>Gebäude</b>						
Jahresgesamtwärmeverbrauch	[MWh]	keine Messdaten vorhanden	keine Messdaten vorhanden	671,6	673,9	660,7
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]			67,7	67,9	66,6
Jahresgesamtkälteverbrauch	[MWh]	keine Messdaten vorhanden	keine Messdaten vorhanden	64,5	73,7	76,9
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]			6,5	7,4	7,8
<b>Erdwärmesystem</b>						
Wärmeentzug	[MWh]	keine Messdaten vorhanden	keine Messdaten vorhanden	176,1	155,2	38,2
Wärmeeintrag	[MWh]			64,4	73,7	76,9
Wärmebereitstellung	[MWh]			214,2	192,7	45,0
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]			21,6	19,4	4,5
Kältebereitstellung	[MWh]			64,5	73,7	76,9
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]			6,5	7,4	7,8
geothermischer Deckungsanteil Heizen	[%]	32,0	29,0	7,0		
geothermischer Deckungsanteil Kühlen	[%]	100,0	100,0	100,0		

## Projekt 2 - Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen (GEW)

Die Erdwärmeanlage der Gelsenwasser AG wird in den drei Betriebszuständen kombinierter Heiz- und Kühlobetrieb, freier Kühlobetrieb und reiner Kältemaschinenbetrieb betrieben. In Abbildung 49 werden schematische die Betriebszustände der kombinierten Wärmepumpe und Kältemaschine dargestellt.

Im kombinierten Heiz- und Kühlobetrieb wird die vom Kondensator der Wärmepumpe bereitgestellte Wärme zur Beheizung des transparenten Hauses genutzt. Als Wärmequelle dienen der Wärmepumpe Gebäudebereiche mit Kühlbedarf. Kann der Heizbedarf nicht vollständig über die bei der Gebäudekühlung gewonnene Wärme gedeckt werden, wird zusätzlich dem Erdreich Wärme entzogen. Ist hingegen der Kühlergiebedarf größer als der Heizenergiebedarf erfolgt eine Vorkühlung und somit ein Wärmeeintrag in das Erdreich. In den Betriebszuständen freier Kühlobetrieb und reiner Kältemaschinenbetrieb wird dem Gebäude keine Heizenergie zur Verfügung gestellt. Beim freien Kühlobetrieb werden die Gebäudekühlung und der Wärmeeintrag in das Erdreich über einen freien Umwälzbetrieb und einen trennenden Wärmetauscher realisiert. Reicht das Temperaturniveau und die Kühlleistung des Erdreichs nicht

aus, funktioniert die Wärmepumpe als Kältemaschine. Die kondensatorseitig erzeugte Wärme wird vollständig in das Erdreich eingetragen.

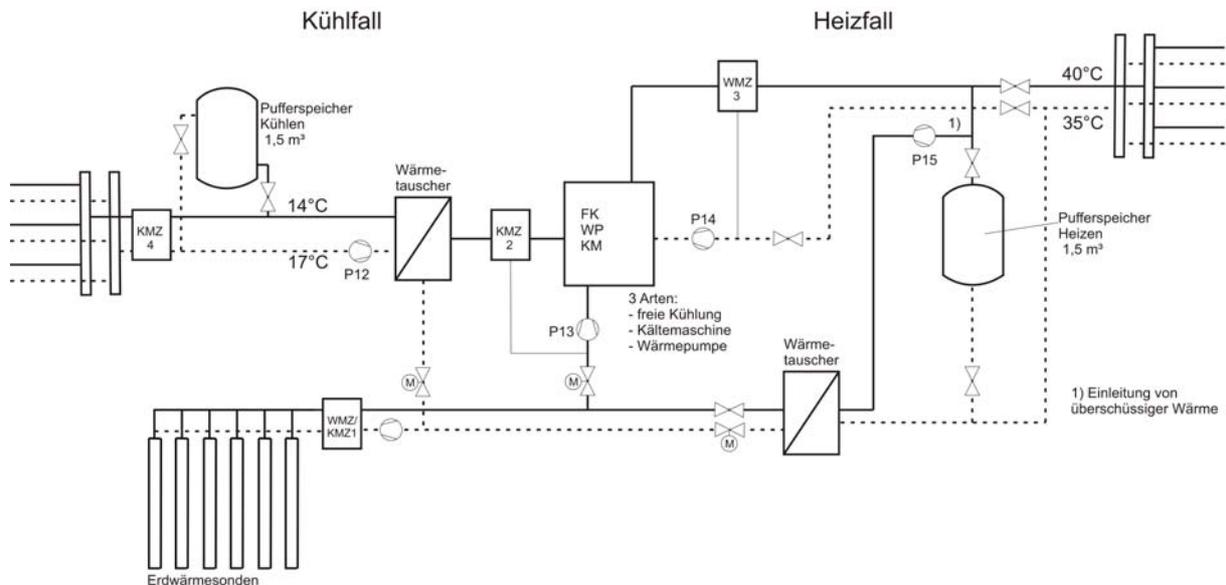


Abbildung 49: vereinfachtes hydraulisches Schema Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen

Tabelle 8: Übersicht Messergebnisse Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen

Wärme- und Kältebilanz Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen		2005	2006	2007	2008	2009
<b>Gebäude</b>						
Jahresgesamtwärmeverbrauch	[MWh]	keine Messdaten vorhanden	keine Messdaten vorhanden	588,1	614,8	680,2
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]			95,0	99,3	109,9
Jahresgesamtkälteverbrauch	[MWh]	keine Messdaten vorhanden	keine Messdaten vorhanden	573,6	487,6	471,5
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]			92,7	78,8	76,2
<b>Erdwärmesystem</b>						
Wärmeentzug	[MWh]	keine Messdaten vorhanden	keine Messdaten vorhanden	193,5	269,0	327,7
Wärmeeintrag	[MWh]			402,8	403,5	373,6
Wärmebereitstellung	[MWh]	keine Messdaten vorhanden	keine Messdaten vorhanden	588,1	614,8	680,2
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]			95,0	99,3	109,9
Kältebereitstellung	[MWh]	keine Messdaten vorhanden	keine Messdaten vorhanden	105,0	85,5	92,2
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]			17,0	13,8	14,9
geothermischer Deckungsanteil Heizen	[%]	keine Messdaten vorhanden	keine Messdaten vorhanden	32,0	29,0	7,0
geothermischer Deckungsanteil Kühlen	[%]			100,0	100,0	100,0

### Projekt 5 - EnergieForum Berlin (EFB)

In Abbildung 50 ist die Verschaltung der geothermischen Wärmepumpe und des Wärmetauschers für den „freien Kühlbetrieb im EnergieForum Berlin schematisch dargestellt. Im Heizfall werden die vier Speicher über eine Speicherladepumpe beladen und versorgen dann die Betonkernaktivierung.

Im freien Kühlbetrieb ist die Energiepfahlanlage über einen Wärmetauscher direkt an die Betonkerntemperierung gekoppelt.

Zusätzlich zu den in Abbildung 50 aufgeführten Wärmemengenzählern werden sowohl die Wärmemengen der Energieversorgungsanlagen Fernwärme und Abluftwärmepumpe als auch der Wärmeverbraucher der statische Heizung, dynamische Heizung und Fußbodenheizung im Atrium erfasst.

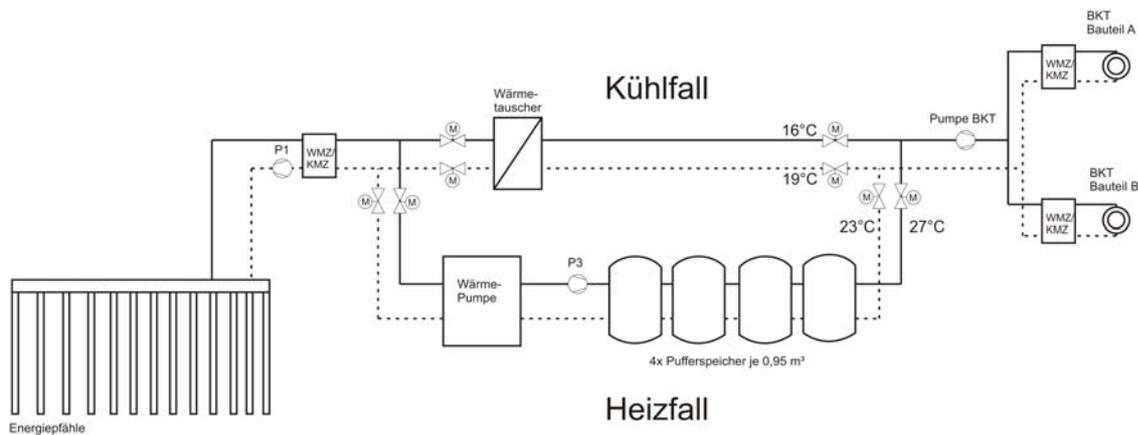


Abbildung 50: vereinfachtes hydraulisches Schema EnergieForum Berlin

Tabelle 9: Übersicht Messergebnisse EnergieForum Berlin

Wärme- und Kältebilanz Energieforum Berlin	2005	2006	2007	2008	2009
<b>Gebäude</b>					
Jahresgesamtwärmeverbrauch [MWh]	968,2	997,8	967,7	971,6	986,2
je m <sup>2</sup> NGF [kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]	66,0	68,0	66,0	66,3	67,3
Jahresgesamtkälteverbrauch [MWh]	29,0	50,1	57,3	55,5	49,8
je m <sup>2</sup> NGF [kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]	2,0	3,4	3,9	3,8	3,4
<b>Erdwärmesystem</b>					
Wärmeentzug [MWh]	63,0	94,6	109,3	122,2	142,4
Wärmeeintrag [MWh]	40,7	63,7	71,5	63,4	53,2
Wärmebereitstellung [MWh]	82,7	122,0	141,4	159,6	170,3
je m <sup>2</sup> NGF [kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]	5,6	8,3	9,6	10,9	11,6
Kältebereitstellung [MWh]	29,0	50,1	57,3	55,5	49,8
je m <sup>2</sup> NGF [kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]	2,0	3,4	3,9	3,8	3,4
geothermischer Deckungsanteil Heizen [%]	8,5	12,2	14,6	16,4	17,3
geothermischer Deckungsanteil Kühlen [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

### Projekt 6 - VGH Regionaldirektion, Lüneburg (VGH)

Die Energiepfähle bei der VGH Regionaldirektion in Lüneburg werden über die Geozent Energiezentrale betrieben. Die geothermische Zentrale steuert intern die verschiedenen Betriebsarten. Umgesetzt werden der freie Kühlbetrieb über das Erdreich, der Wärmepumpenbetrieb sowie der Betrieb über die Kältemaschine. Abbildung 51 zeigt das vereinfachte Schema des Systems Erdwärmenutzung mit der eingebundenen Geozent Energiezentrale.

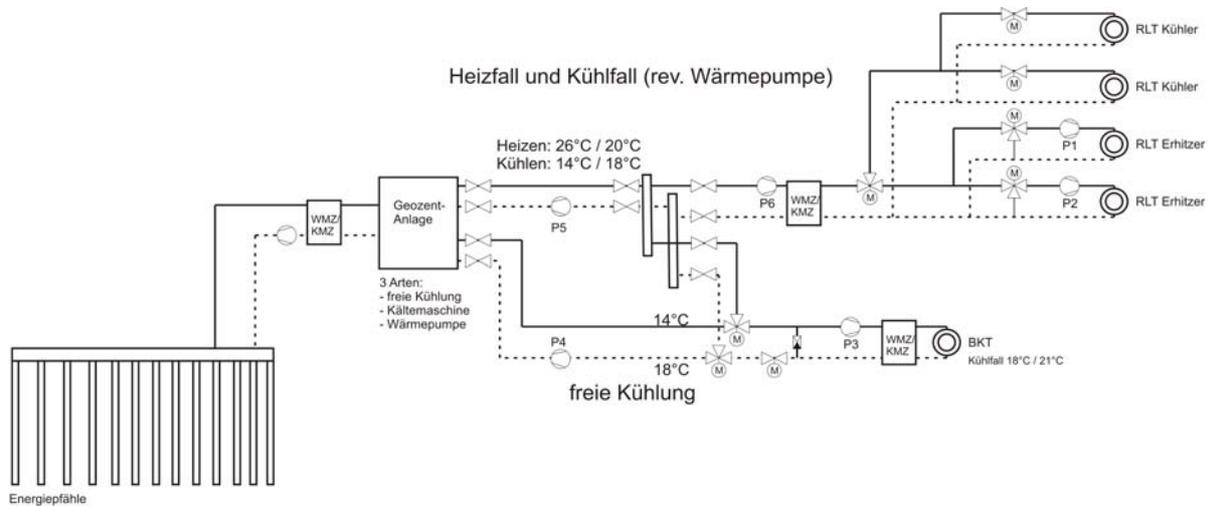


Abbildung 51: vereinfachtes hydraulisches Schema VGH Regionaldirektion, Lüneburg

Tabelle 10: Übersicht Messergebnisse VGH Regionaldirektion, Lüneburg

Wärme- und Kältebilanz VGH Regionaldirektion, Lüneburg		2005	2006	2007	2008	2009
<b>Gebäude</b>						
Jahresgesamtwärmeverbrauch	[MWh]	keine Messdaten vorhanden	329,1	313,8	339,5	378,9
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]		83,2	79,3	85,8	95,8
Jahresgesamtkälteverbrauch	[MWh]		16,3	2,7	6,7	19,4
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]		4,1	0,7	1,7	4,9
<b>Erdwärmesystem</b>						
Wärmeentzug	[MWh]	keine Messdaten vorhanden	9,5	25,4	77,5	76,6
Wärmeeintrag	[MWh]		24,5	5,2	12,2	23,6
Wärmebereitstellung	[MWh]		25,9	43,1	97,4	90,5
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]		6,5	10,9	24,6	22,9
Kältebereitstellung	[MWh]		0,0	0,0	0,0	0,0
je m <sup>2</sup> NGF	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]		0,0	0,0	0,0	0,0
geothermischer Deckungsanteil Heizen	[%]	7,9	13,7	29,0	23,9	
geothermischer Deckungsanteil Kühlen	[%]	100,0	100,0	100,0	100,0	

### Projekt 10 - VW-Bibliothek, Berlin (TUB)

Die Grundversorgung der VW-Bibliothek mit Kälte sollte wie im Heizfall über das Erdreich erfolgen. Aufgrund der hohen Erdreichtemperaturen wurde jedoch eine Kältemaschine zur Einspeisung in den Strang BKT seit Mai 2006 in Betrieb genommen (Abbildung 52). Diese werden ebenfalls über Kältemengenzähler zur Bilanzierung erfasst.

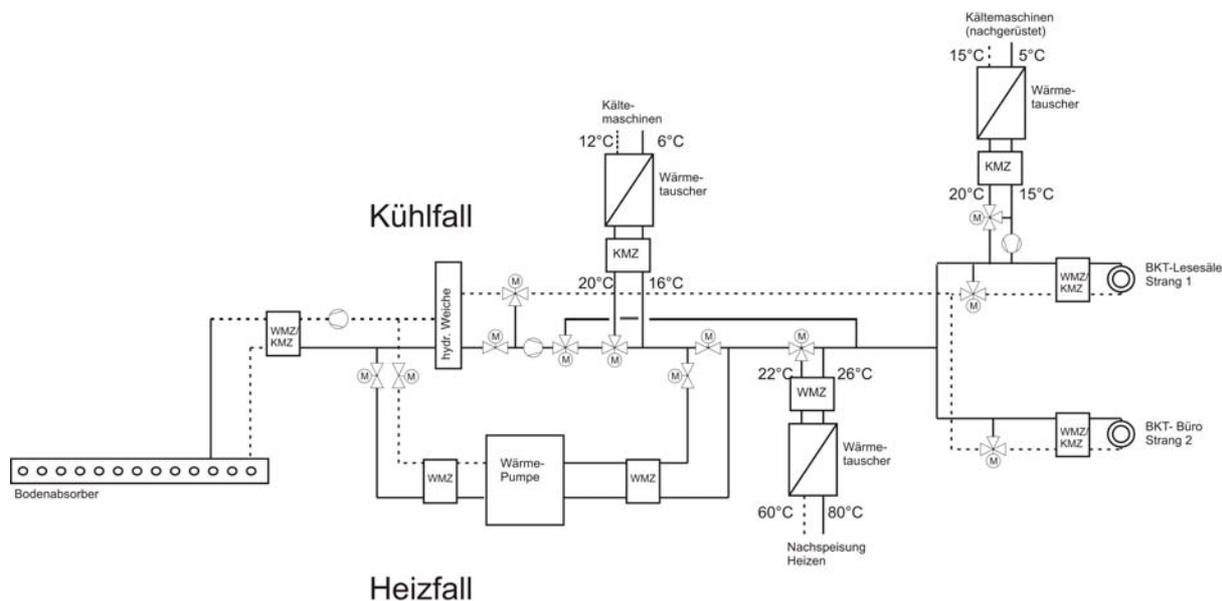


Abbildung 52: vereinfachtes hydraulisches Schema VW-Bibliothek, Berlin

Tabelle 11: Übersicht Messergebnisse VW-Bibliothek, Berlin

Wärme- und Kältebilanz VW-Bibliothek, Berlin		2005	2006	2007	2008	2009
<b>Gebäude</b>						
Jahresgesamtwärmeverbrauch	[MWh]	1938,4	2498,1	1579,4	1554,5	1498,4
	je m <sup>2</sup> NGF [kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]	65,6	84,6	53,5	52,6	50,7
Jahresgesamtkälteverbrauch	[MWh]	470,8	539,8	637,1	521,3	541,9
	je m <sup>2</sup> NGF [kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]	15,9	18,3	21,6	17,7	18,3
<b>Erdwärmesystem</b>						
Wärmeentzug	[MWh]	48,7	89,0	147,0	103,0	118,0
Wärmeeintrag	[MWh]	175,9	40,6	0,8	0,0	0,0
Wärmebereitstellung	[MWh]	60,4	114,6	188,8	133,0	151,5
	je m <sup>2</sup> NGF [kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]	2,0	3,9	6,4	4,5	5,1
Kältebereitstellung	[MWh]	175,9	40,6	0,8	0,0	0,0
	je m <sup>2</sup> NGF [kWh/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a]	6,0	1,4	0,0	0,0	0,0
geothermischer Deckungsanteil Heizen	[%]	3,1	4,6	12,0	8,6	10,1
geothermischer Deckungsanteil Kühlen	[%]	37,4	7,5	0,1	0,0	0,0

### 5.3.2. Wärmeeintrag und –entzug sowie Erdreichtemperaturen

Im Folgenden werden die Wärmeeintrags- und –entzugsmengen im Messzeitraum 2005 bis 2009 der einzelnen Anlagen aus der Feinanalyse dargestellt und dokumentiert werden. Entsprechend zu den Bilanzen sollen die vorherrschenden Erdreichtemperaturen über die Ein- und Austrittstemperaturen abgebildet werden.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens und der Evaluierung der Gebäude und Erdwärmesysteme ist bei allen Gebäuden festzustellen, dass die Bilanz der Erdwärmanlage zwischen Wärmeeintrag und -entzug unausgeglichen ist. Die in Abbildung 54 bis Abbildung 62 dargestellten Diagramme verdeutlichen diese Unausgeglichenheit, wobei der grüne Pfeil den zeitli-

chen Horizont der Betriebsoptimierung kennzeichnet. Auch zum Ende des Projekts kann eine ausgeglichene Bilanz nur bedingt bei den Gebäuden erreicht werden.

Tabelle 12 zeigt die aufsummierten Wärmemengen je Heiz- (HP) bzw. Kühlperiode (KP) über den Betrachtungszeitraum.

**Tabelle 12:** periodische Wärmeentzugs- und -eintragungsmengen der Erdwärmespeichersysteme, Messzeitraum 2005 bis 2009

			Heizen	Kühlen	Heizen								
			Winter	Sommer	Winter								
		[MWh]	2004 / 2005	2005	2005 / 2006	2006	2006 / 2007	2007	2007 / 2008	2008	2008 / 2009	2009	2009 / 2010
Erdwärmesonden	RIC	[MWh]	-	-	-	69,4	182,4	64,5	151,0	73,7	71,1	76,9	34,6
	GEW	[MWh]	-	-	114,9	509,5	154,4	364,3	219,0	403,0	338,4	372,5	121,4
Energiepfahl	EFB	[MWh]	43,2	40,7	85,2	63,7	80,8	71,5	126,7	63,4	140,1	53,2	55,6
	VGH	[MWh]	-	2,0	10,6	24,5	16,0	5,2	52,4	12,2	80,4	23,7	33,7
Bodenabsorber	TUB	[MWh]	36,7	175,9	44,0	38,0	137,0	0,8	123,0	0,0	113,0	0,0	52,0

\*) Werte nur bis Dezember 2009

### Projekt 1 – Gebäude RIC, Hamburg (RIC)

Bisher ist der jährliche Wärmeentzug aus dem Erdreich zu Heizzwecken im Winter deutlich größer als der Wärmeeintrag infolge des freien Kühlbetriebs im Sommer, siehe Abbildung 53. Langfristig besteht bei diesem unausgewogenen Verhältnis von Wärmeeintrag und -entzug die Gefahr der Unterkühlung des Erdreichs. Schon im Winter 2006/2007 liegen die Austrittstemperaturen aus dem Erdreich in den Monaten November bis März dauerhaft unter -2 °C, siehe Abbildung 64.

Im Oktober 2008 liegen die Ein- und Austrittstemperaturen der Erdsonden wieder unter 0°C. Im Dezember 2008 wird vom IGS die Empfehlung ausgesprochen, das Erdsondenfeld manuell außer Betrieb zu nehmen, um Frostschäden zu vermeiden. Die Empfehlung wird von den Betreibern des Gebäudes RIC umgehend umgesetzt.

Durch das Abschalten der Erdsondenanlage im Winter 2008/2009 sowie im November 2009 kann eine relativ ausgeglichene Bilanz zwischen Wärmeeintrag und -entzug entstehen. Eine Regeneration und die Vermeidung einer weiteren Unterkühlung des Erdreichs sind abzuwarten und im weiteren Verlauf zu beobachten.

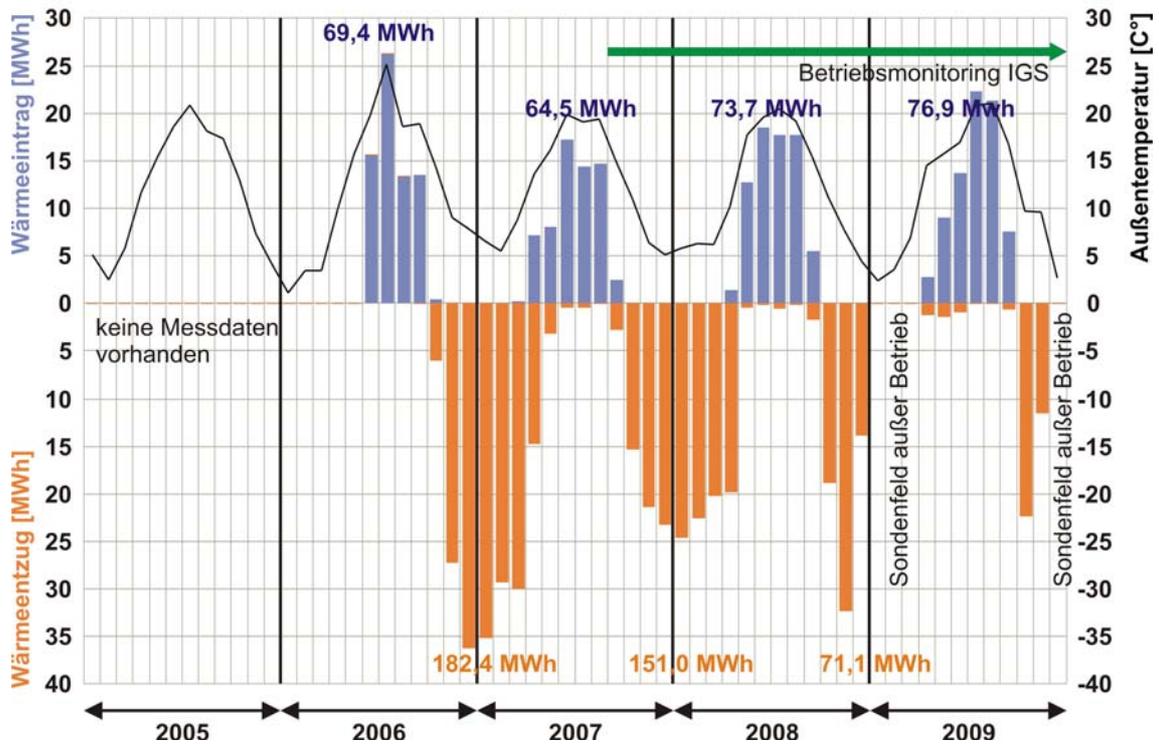


Abbildung 53: Monatlicher Wärmeentzug und -eintrag Erdsondenfeld und Monatsmittel der Außentemperatur Gebäude RIC 2005 bis 2009

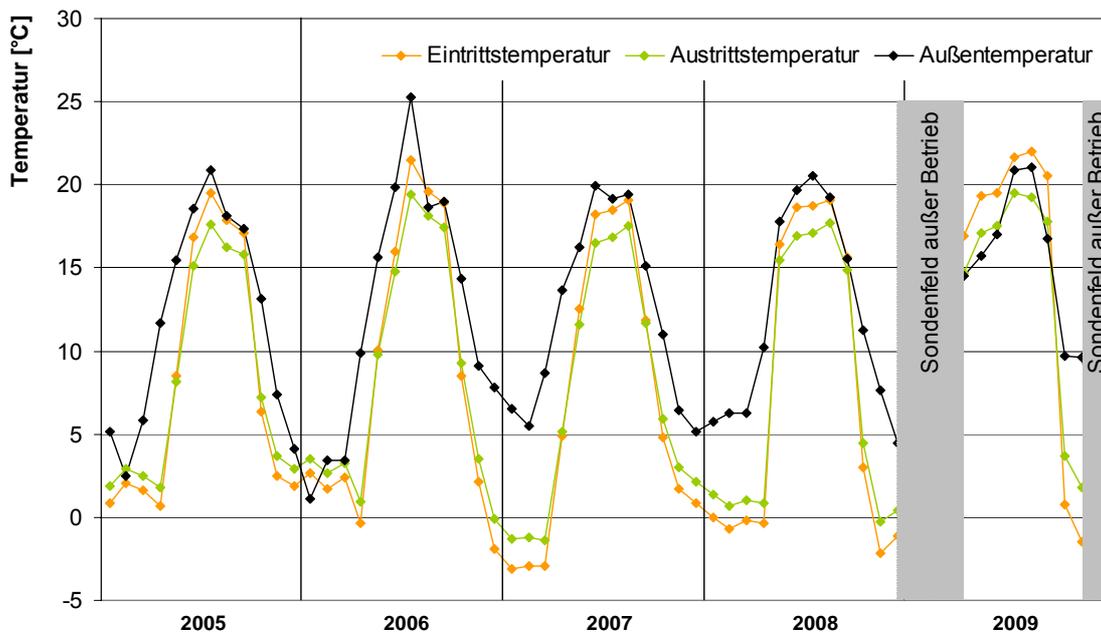


Abbildung 54: Monatliche Ein- und Austrittstemperaturen sowie Monatsmittel der Außentemperatur Gebäude RIC 2005 bis 2009 (grauer Bereich = keine Messdaten, da Sondenfeld außer Betrieb)



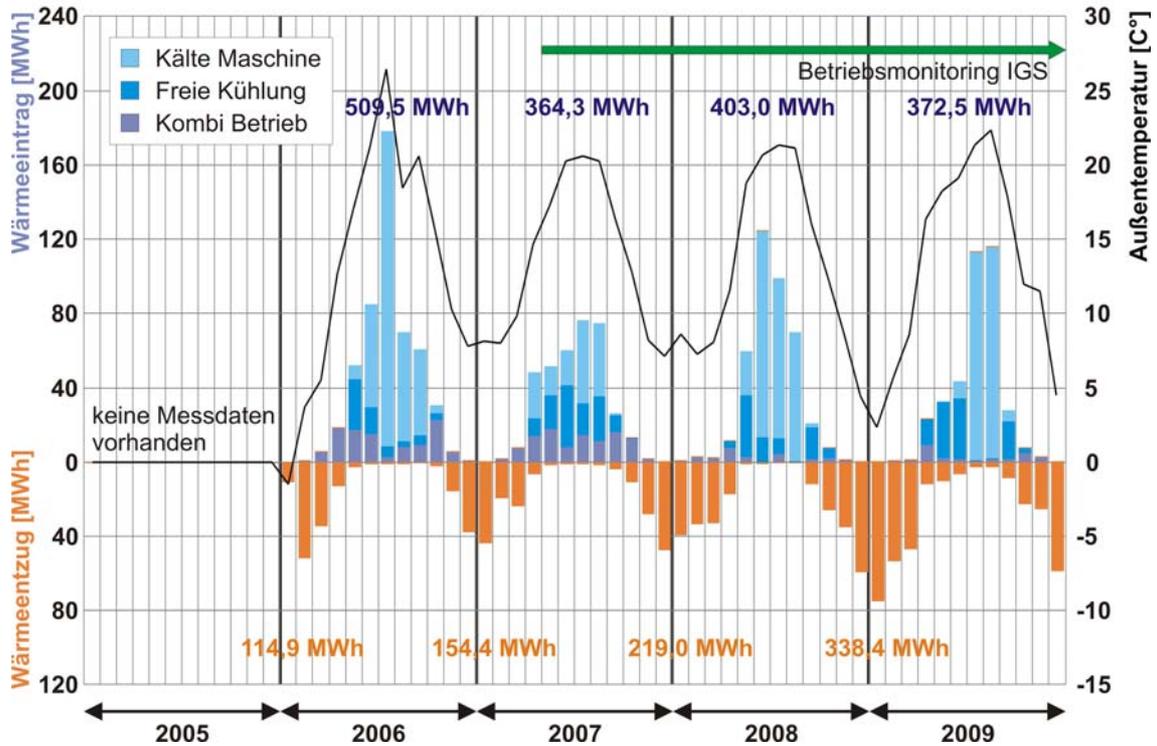
## Projekt 2 - Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen (GEW)

Bereits 2007 wird die Regelung der Anlage der Gelsenwasser AG soweit verändert und optimiert, dass eine Reduzierung des Kältemaschinenbetriebs zugunsten einer Ausweitung des effizienteren freien Kühlbetriebs möglich und der reine Kältemaschinenbetrieb reduziert wird.

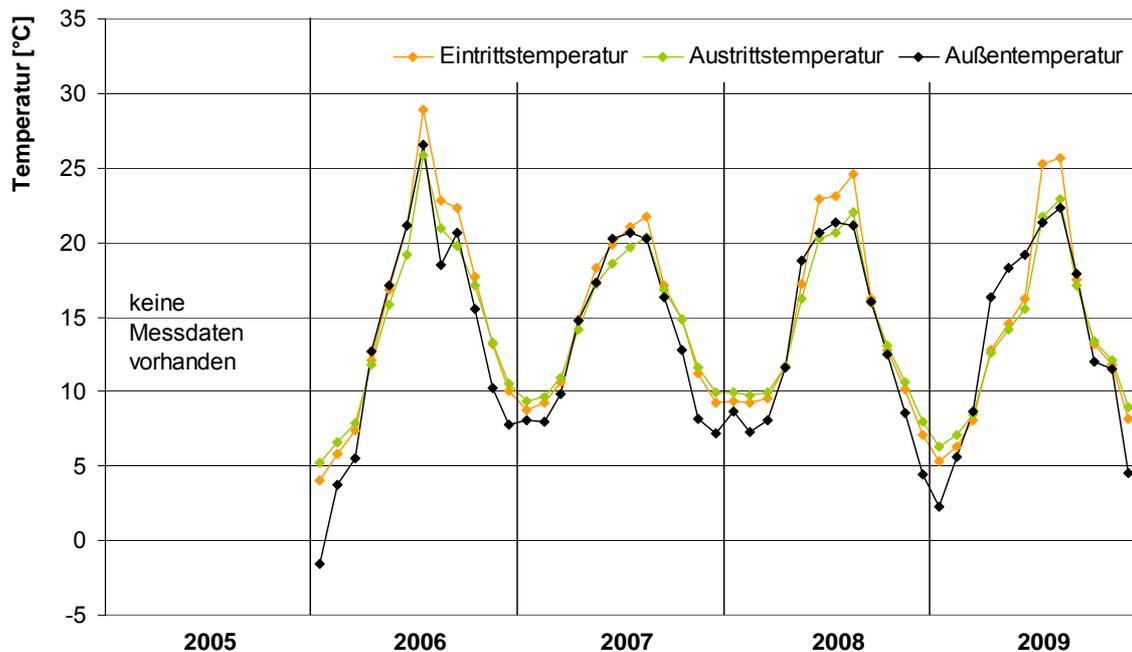
2008 erreichen die Betriebsstunden im freien Kühlbetrieb vergleichbare Werte wie im Vorjahr. Entsprechend einer Reduzierung der Betriebsstunden im kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb haben sich die Betriebsstunden im Kältemaschinenbetrieb allerdings fast verdreifacht. Der Anstieg der Betriebsstunden im Kältemaschinenbetrieb anstelle eines weiteren Ausbaus der effizienteren freien Kühlung ist vermutlich auf eine Erwärmung des Speichers infolge des nach wie vor größeren Wärmeeintrags im Verhältnis zum Wärmeentzug zurückzuführen. Übersteigt das Temperaturniveau im Erdreich den für den freien Kühlbetrieb nutzbaren Bereich, erfolgt die Gebäudekühlung über die an das Erdreich gekoppelte Kältemaschine.

Wie aus der Aufteilung von Wärmeeintrag und -entzug nach Betriebsarten in Abbildung 55 ersichtlich, ist in den ersten Monaten 2009 im kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb kaum Wärmeüberschuss (Wärmeeintrag in das Erdreich) mehr vorhanden. Dem Erdreich wird mehr Wärme entzogen. 2009 konnte zudem der Ausbau des freien Kühlbetriebs soweit optimiert werden, dass zu Beginn und zum Ende der Kühlperiode ausschließlich die freie Kühlung zum Einsatz kommt und nur in der Mitte der Kühlperiode auf die Kältemaschine zurückgegriffen werden muss. Hauptkriterium hierfür sind die zu hohen Speicher- und Außentemperaturen, siehe Abbildung 56.

In der Planung wird von einem Verhältnis zwischen „freiem Kühlbetrieb“ und reinem Kältemaschinenbetrieb der Erdsondenanlage von 68 zu 32 % ausgegangen. Im realen Betrieb 2006 liegt das Verhältnis allerdings bei 15 % „freie Kühlung“ und 85 % reinem Kältemaschinenbetrieb. Bis 2009 kann das Verhältnis auf 30 % freie Kühlung und nur noch 70 % Kältemaschinenbetrieb gesteigert werden.



**Abbildung 55:** Monatlicher Wärmeentzug und -eintrag aus und in das Erdsondenfeld sowie Außentemperatur, aufgeteilt nach Kältemaschinenbetrieb und freier Kühlung, Gelsenwasser AG, 2005 bis 2009



**Abbildung 56:** Monatliche Ein- und Austrittstemperaturen sowie Monatsmittel der Außentemperatur, Gelsenwasser AG, 2005 bis 2009

## Projekt 5 - EnergieForum Berlin (EFB)

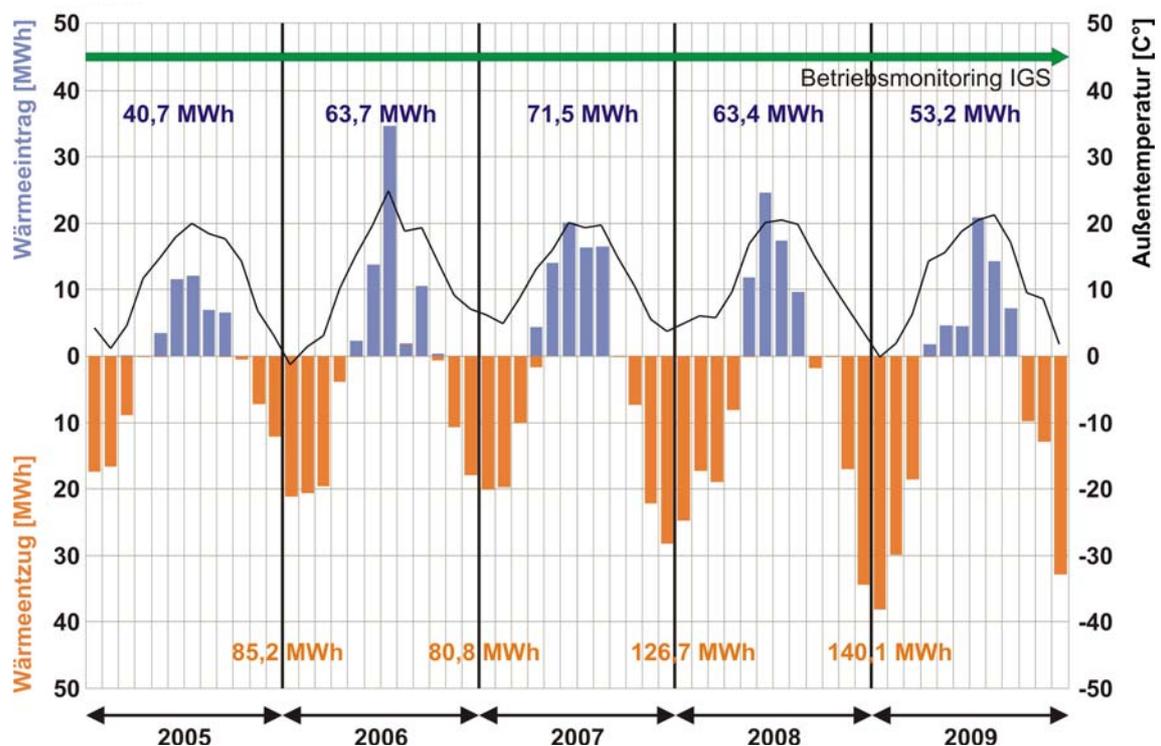
Auch beim EnergieForum ist die Energiebilanz des Erdreichwärmespeichers, auch in den vorangegangenen Jahren, nicht ausgeglichen. Ursachen hierfür sind über dem Planungsniveau liegende Erdreichtemperaturen sowie eine geringer als erwartete thermische Regeneration des Erdreichs in der Heizperiode.

Durch betriebsbedingte Umstellungen des Kühlbetriebs der Betonkernaktivierung kann der Wärmeeintrag ins Erdreich seit der Kühlperiode 2006 gesteigert werden, siehe Abbildung 57.

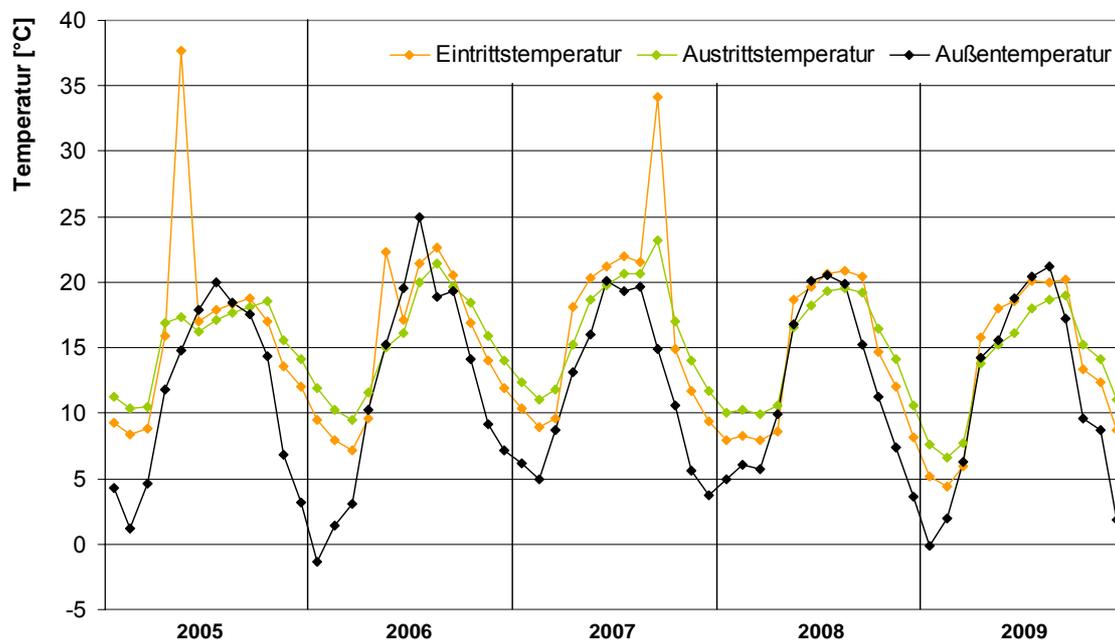
Trotz einer relativ ausgeglichenen Bilanz zwischen Wärmeentzug (80,81 MWh) und Wärmeeintrag (71,5 MWh) im Zeitraum Winter 2006/2007 und Sommer 2007 tritt eine Erwärmung des Erdreichs auf. Zu vermuten ist, dass eine Wärmequelle in der näheren Umgebung des Gebäudes vorliegt.

Zur Erhaltung der Dauerhaftigkeit der Anlage wird empfohlen, dem Erdreich mehr Wärme zu entziehen. Seit der Heizperiode 2007/2008 wird dem Erdreich doppelt soviel Wärme entzogen wie zugeführt.

Im Energiekonzept wird von Austrittstemperaturen aus dem Erdreich von 13 - 14°C in der Kühlperiode ausgegangen. Seit Inbetriebnahme ist ein stetiger Anstieg zu verzeichnen, siehe Abbildung 58. In der Kühlperiode 2008 liegen die Austrittstemperaturen aus dem Erdreich zwischen 16 °C und 20°C. Im Vergleich zu den Austrittstemperaturen 2007 sind in 2008 die Temperaturen um fast 2 K gesunken. Da in beiden Jahren die Witterungsverhältnisse relativ identisch sind, kann daraus geschlossen werden, dass der erhöhte Wärmeentzug in der Heizperiode 2007/2008 erste Erfolge zeigt.



**Abbildung 57:** Monatlicher Wärmeentzug und -eintrag aus und in die Energiepfähle sowie Außentemperatur EnergieForum Berlin, 2005 bis 2009



**Abbildung 58:** Monatliche Ein- und Austrittstemperaturen sowie Monatsmittel der Außentemperatur EnergieForum Berlin, 2005 bis 2009

### Projekt 6 VGH – Regionaldirektion, Lüneburg (VGH)

Aufgrund anlagentechnischer und regelungstechnischer Mängel ist die Energiepfahlanlage der VGH Lüneburg in der Vergangenheit nur sehr eingeschränkt funktionsfähig.

Zu Beginn des Monitorings im Frühjahr 2007 ist ein kontinuierlicher und kontrollierter Wärmeentzug und -eintrag nicht erkennbar, siehe Abbildung 59. In der Jahresbilanz 2006 wird überwiegend Wärme in das Erdreich eingetragen und nur wenig Wärme entzogen. Erdreichtemperaturen sowie Angaben zum Betrieb der freien Kühlung liegen nicht vor. Das tatsächliche Temperaturniveau in der Energiepfahlanlage ist ebenfalls nicht bekannt, da die Fühler zur Messung der Ein- und Austrittstemperaturen bis Anfang 2007 falsch positioniert waren. Abbildung 60 zeigt den Temperaturverlauf nach Instandsetzung der Temperaturfühler des Erdwärmesystems.

Nach Abschluss der Fehleranalyse und Optimierung der Regelstrategien kann in der Heizperiode 2007/2008 erstmals ein planmäßiger Heizbetrieb gefahren und seit dem eine stetige Steigerung des Wärmeentzugs über die Wärmepumpe verzeichnet werden.

Im Gegensatz zum Heizbetrieb funktioniert der Kühlbetrieb im Sommer 2007 aufgrund interner technischer Mängel der kombinierten Wärmepumpe/Kältemaschine nicht. Die reversible Wärmepumpe befindet sich während dieser Zeit überwiegend im Störbetrieb. Auch die Betriebsweise der freien Kühlung kommt nicht zum Einsatz. Die erneute Überprüfung der Regelung für den Kühlbetrieb erfordert im Herbst 2008 die Wiederholung der Übertragung der Regelalgorithmen auf die geothermische Energiezentrale. Die Anlage läuft seit Sommer 2009 nun auch in einem planmäßigen Kühlbetrieb.

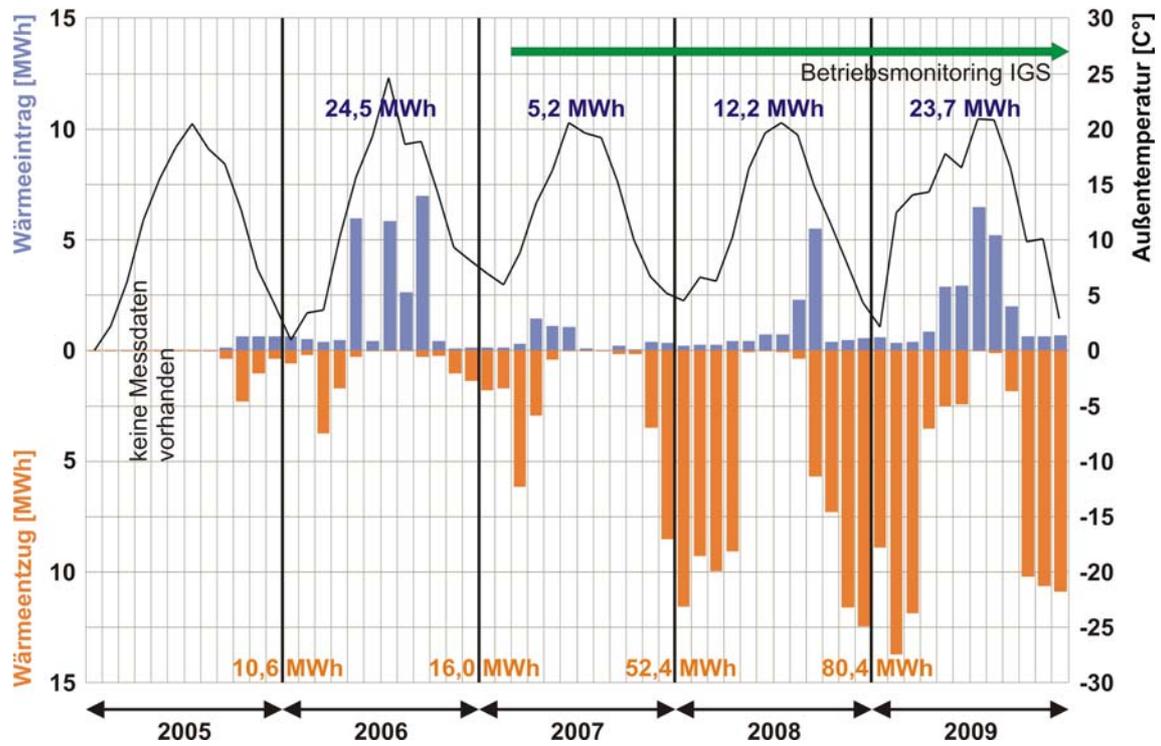


Abbildung 59: Monatlicher Wärmeentzug und -eintrag aus und in die Energiepfähle sowie Außentemperatur, VGH Lüneburg, 2005 bis 2009

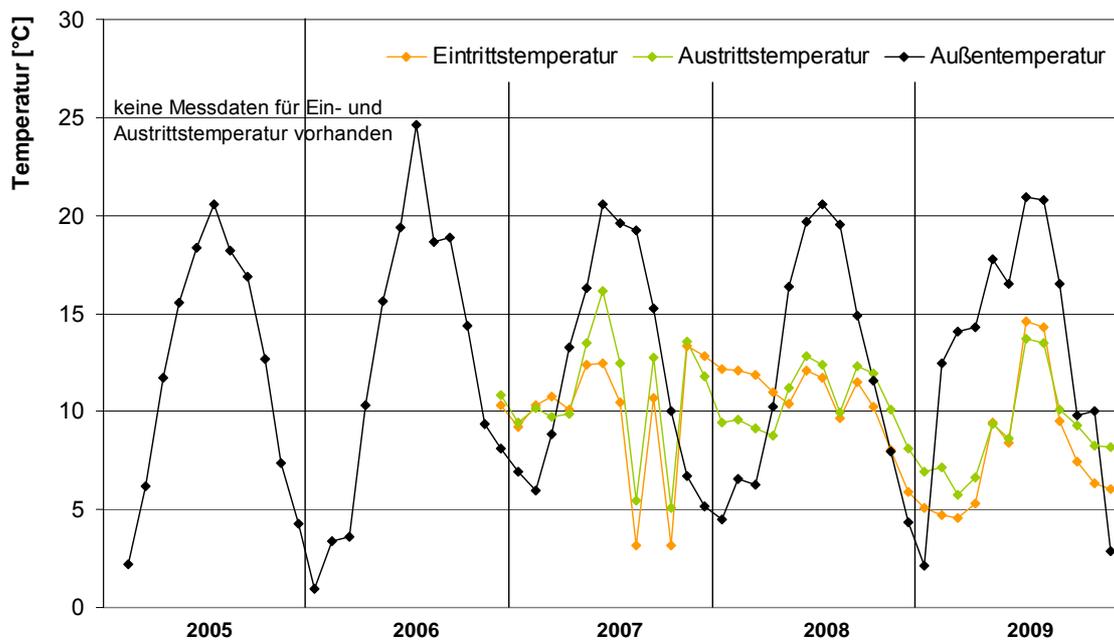


Abbildung 60: Monatliche Ein- und Austrittstemperaturen in das Sondenfeld sowie Monatsmittel der Außentemperatur, VGH Lüneburg, 2005 bis 2009

### Projekt 10 - VW-Bibliothek, Berlin (TUB)

System- sowie Betriebsfehler der Bodenabsorberanlage und der Betonkerntemperierung der VW-Bibliothek führen seit Inbetriebnahme zu einer erheblichen Erwärmung des Erdreichs. Infolge dessen steht im Sommer 2006 keine Kühlleistung für den freien Kühlbetrieb mehr zur Verfügung. Der Bodenabsorber wird außer Betrieb genommen. Wesentliche Teile der Gebäudekühlung werden durch nachträglich installierte alternative Systeme (Kompressionskältemaschinen) sichergestellt. Ein Wärmeeintrag in das Erdreich und somit die Nutzung des freien Kühlbetriebes des Bodenabsorbers ist jedoch nach wie vor nicht möglich, siehe Abbildung 61.

Die langsame Abkühlung des Erdreichs bewirkt die Steigerung der jährlich entzogenen Wärmemenge auf das Dreifache der ersten Betriebsjahre. Anfang 2007 kühlt sich das Erdreich in 1 bis 2 m unter dem Bodenabsorber erstmalig wieder auf 15 °C ab, siehe Abbildung 62. Insgesamt ist das Erdreich aber noch nicht so weit abgekühlt, dass im Sommer 2010 dauerhaft ein freier Kühlbetrieb über den Bodenabsorber möglich wäre.

Ein Temperaturanstieg im ohnehin schon recht warmen Erdreich (trotz Anlagenstillstand seit 2006) und eine geringe Abkühlung bei hohem Wärmetzug im Winter lassen vermuten, dass im Bereich des Bodenabsorbers Wärme aus der Umgebung nachströmt. Teil III des Forschungsendberichts beinhaltet die hierzu durchgeführten Simulationen, Untersuchungen und Analysen zu den Temperaturverhältnissen und mögliche Temperaturverschleppungen infolge Grundwasserströmungen im Erdreich.

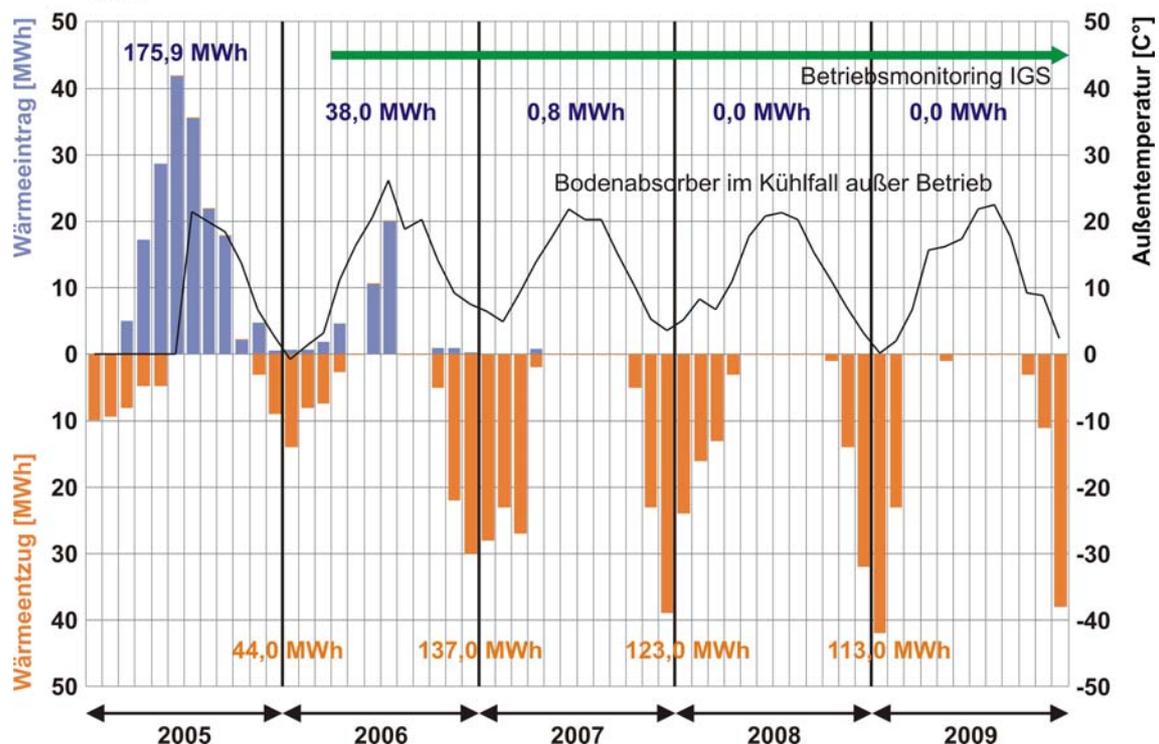


Abbildung 61: Monatlicher Wärmeentzug und -eintrag aus und in die Energiepfähle sowie Außentemperatur, TU Bibliothek Berlin, 2005 bis 2009

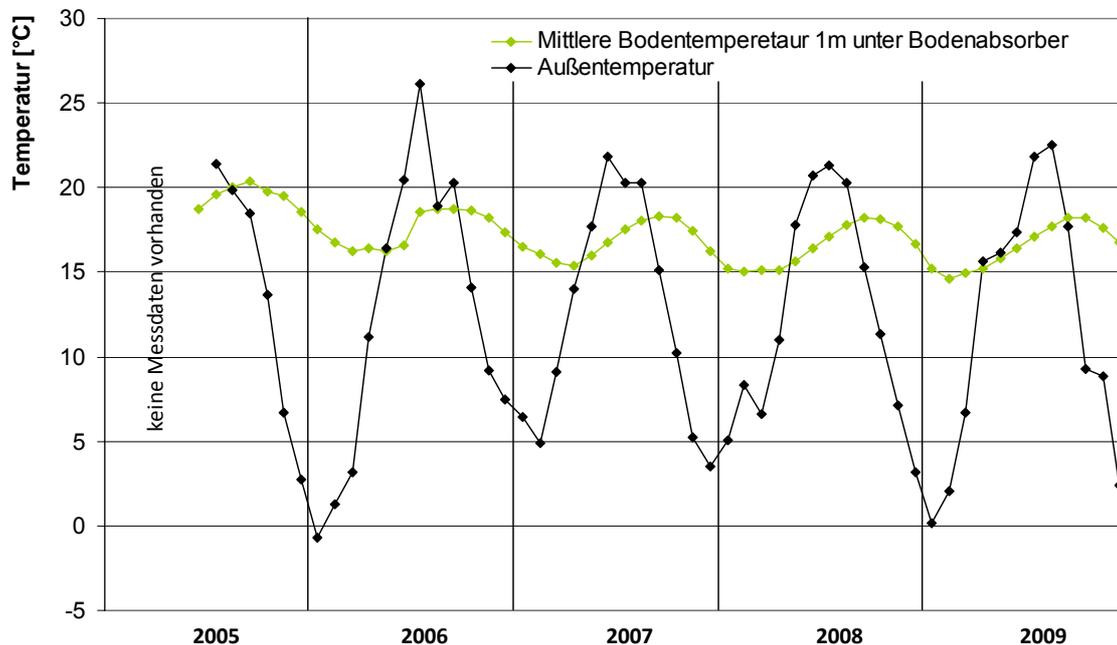


Abbildung 62: Monatliche Erdreichtemperaturen 1 m unter dem Bodenabsorber sowie Monatsmittel der Außentemperatur, TU Bibliothek Berlin, 2005 bis 2009

### 5.3.3. Gebäude- und Anlagenperformance

In diesem Kapitel wird die Gebäude- und Anlagenperformance der untersuchten Gebäude dargestellt. Neben dem Deckungsanteil Erdwärme, den Jahresenergieerträgen und der Jahressystemarbeitszahl werden auch die Auslastung und der Speichernutzungsgrad abgebildet.

#### 5.3.3.1. Deckungsanteil Erdwärmesystem

Der prozentuale Anteil der Erdwärme und -kälte an der Wärme- und Kältebereitstellung für ein Gebäude oder eine Gebäudezone ist an sich kein Anlagenkennwert. Dieser Wert ermöglicht jedoch eine erste Einschätzung des Zusammenspiels und der Abstimmung des Erdwärmesystems mit weiteren Heiz- und Kühlsystemen. Denn nicht immer liegen die Ursachen für ein nicht optimal funktionierendes Erdwärmesystem beim System selbst. Oftmals wird die Erdwärme- und -kältenutzung auch durch andere Systeme behindert oder sogar außer Kraft gesetzt.

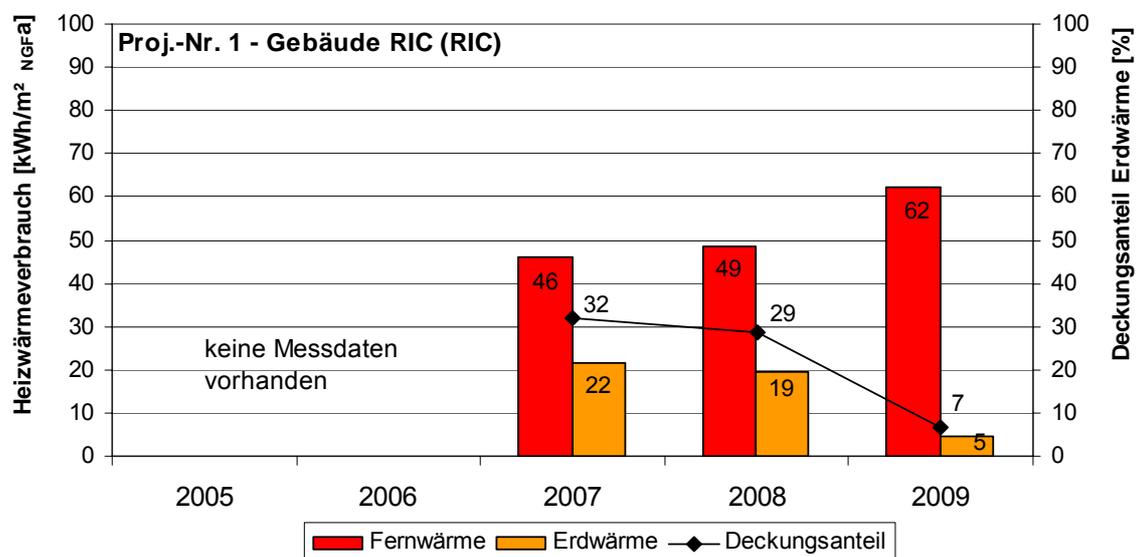
Die jährlichen Deckungsanteile der einzelnen Erdwärmespeicher bezogen auf die NGF der Gebäude sind abhängig von Witterung und Nutzung der Gebäude. Bei sehr kalten Wintern steigt der Anteil an Fernwärme, da die Erdwärme die geforderte Leistung meist nicht mehr alleine bereitstellen kann.

Der Deckungsanteil Erdwärme zur Kühlung der Gebäude wird nicht gesondert in Diagrammen dargestellt, da bei allen betrachteten Gebäuden, bis auf die TU Bibliothek aufgrund des erwärmten Erdreichs und des dadurch unterbundenen Wärmeintrags, der Deckungsanteil für die Kühlung der Gebäude 100% beträgt. Die untersuchten fünf Gebäude verfügen alle neben dem Erdreich größtenteils über keine weiteren Kälteerzeuger.

Des Weiteren wird für die Hauptverwaltung der Gelsenwasser AG (Projekt 2) keine Deckungsanteil für den Heizfall berechnet, da das Gebäude ausschließlich über Geothermie (100%) versorgt wird.

### Projekt 1 – Gebäude RIC, Hamburg (RIC)

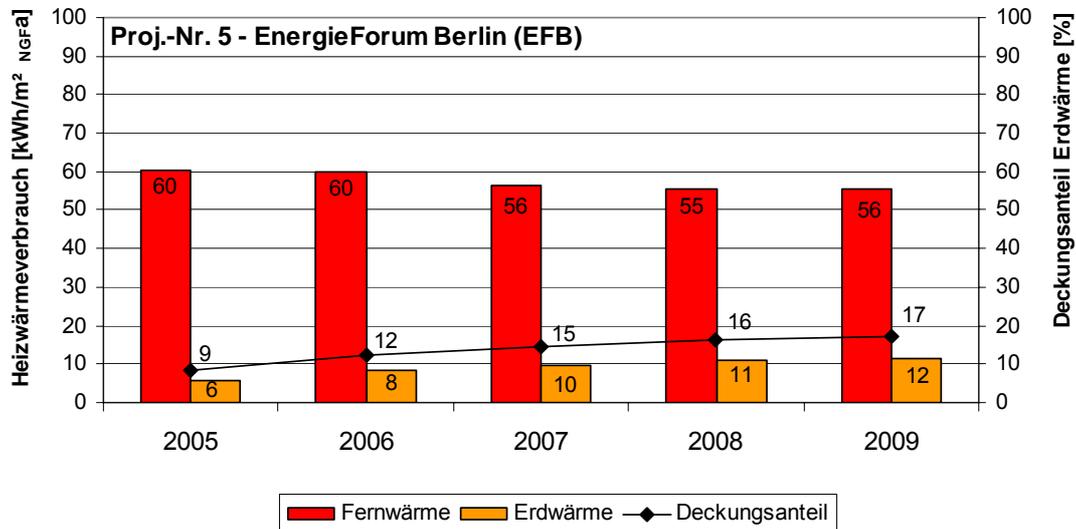
Der Deckungsanteil der Erdwärme an der Wärmebereitstellung beim Gebäude RIC beträgt zu Beginn des Monitorings 2007 noch 32%. In den laufenden Jahren nimmt aufgrund der Außerbetriebnahme des Erdsondenfeldes in der Heizperiode 2007/2008 und 2008/2009 der Deckungsanteil bis auf 7% ab, siehe Abbildung 63.



**Abbildung 63:** Jährlicher Energieverbrauch Fernwärme und Erdwärme mit Deckungsanteil Erdwärme am Gesamtheizenergieverbrauch beim Gebäude RIC, 2005 bis 2009

### Projekt 5 - EnergieForum Berlin (EFB)

Beim EnergieForum kann durch die Erhöhung des Wärmetzuges sowie einer stärkeren Nachtabsenkung der statischen Heizung ein im Laufe der Jahre des Messzeitraums stetig steigender Deckungsanteile der Erdwärme an der Wärmebereitstellung des Gebäudes erzielt werden. 2005 wird ein Deckungsanteil von nur 6% erreicht, 2009 beträgt der Deckungsanteil bereits 17%, siehe Abbildung 64. Bedingt durch immer kältere Winter (siehe Außentemperatur in Abbildung 58) und einer höheren Mietauslastung ist der Heizwärmeverbrauch an Fernwärme demgegenüber in den letzten drei Jahren nicht gesunken.

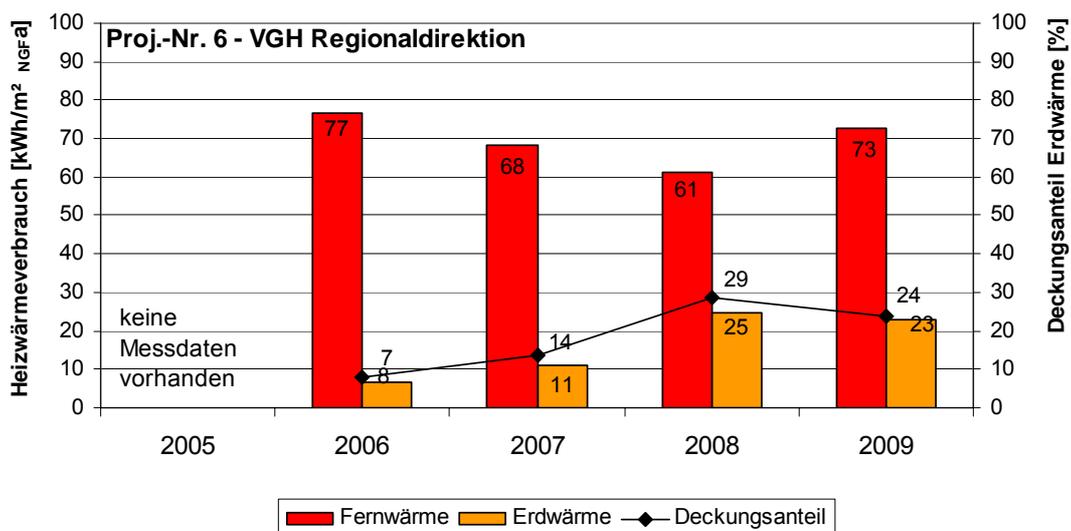


**Abbildung 64:** Jährlicher Energieverbrauch Fernwärme und Erdwärme mit Deckungsanteil Erdwärme am Gesamtheizenergieverbrauch beim EnergieForum, 2005 bis 2009

### Projekt 6 - VGH – Regionaldirektion, Lüneburg (VGH)

Nach fast vier Jahren kontinuierlicher Messungen, Analysen und Betriebsoptimierungen können bei der VGH Regionaldirektion Lüneburg signifikante Erfolge bei der Verbesserung der Energieeffizienz aufgezeigt werden.

Der Fernwärmeverbrauch zur Beheizung des Gebäudes kann im Jahr 2008 gesenkt werden, so dass insgesamt 29 % der Wärmemenge über die Erdwärmeanlage gedeckt werden. Die Hauptursache für die Verdopplung des Deckungsanteils gegenüber 2007 liegt in der Realisierung des planmäßigen Heizbetriebs, siehe Abbildung 65. Bedingt durch den kalten Winter 2008/2009 ist der Deckungsanteil 2009 auf 24% gesunken.

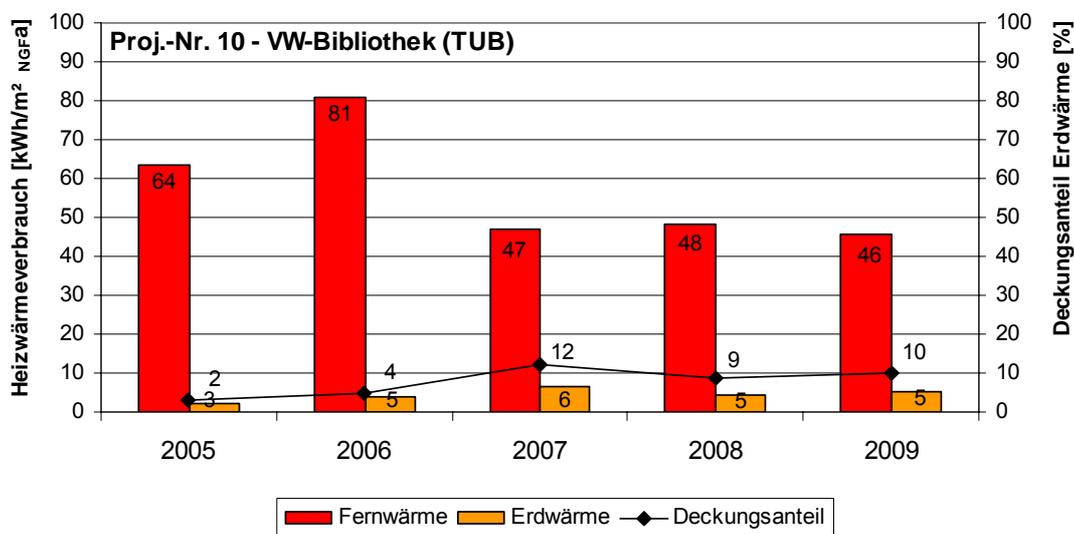


**Abbildung 65:** Jährlicher Energieverbrauch Fernwärme und Erdwärme mit Deckungsanteil Erdwärme am Gesamtheizenergieverbrauch bei der VGH, 2005 bis 2009

### Projekt - 10 VW-Bibliothek, Berlin (TUB)

Durch eine verbesserte regelungstechnische Abstimmung von Betonkernaktivierung und statischer Heizung kann bereits 2006 der Wärmepumpeanteil zur Wärmeversorgung der Heizflächen im Gebäude der VW-Bibliothek von 3 % im Jahr 2005 auf 5 % gesteigert werden, siehe Abbildung 66.

Seit den Optimierungsmaßnahmen und Änderungen in den Regelungen wird nochmals eine deutliche Verdopplung des Deckungsanteils Erdwärme erzielt. Ab 2007 können die Verbräuche Erdwärme (rund 5 kWh/m<sup>2</sup>a) und Fernwärme (rund 10 kWh/m<sup>2</sup>a) sowie ein Deckungsanteil von rund 10% auf ihrem Niveau gehalten werden.



**Abbildung 66:** Jährlicher Energieverbrauch Fernwärme und Erdwärme mit Deckungsanteil Erdwärme am Gesamtheizenergieverbrauch bei der TU Bibliothek, 2005 bis 2009

Ein Vergleich mit den in der Planung zugrunde gelegten Deckungsanteilen (siehe Kapitel 4.3.2) zu den im Messzeitraum 2005 bis 2009 ermittelten Deckungsanteilen der Erdwärme am Wärmebedarf der Gebäude zeigt Abbildung 67. Dabei ist zu erkennen, dass bis auf das EFB (Energieforum Berlin) und die GEW (Gelsenwasser AG) die anderen Gebäude trotz Optimierungsmaßnahmen nicht den Planungswert für die Deckung des Wärmebedarfs über das Erdreich erreichen. Die VGH (VGH Regionaldirektion, Lüneburg) und die TUB (VW-Bibliothek Berlin) erzielen ca. die Hälfte des geplanten Deckungsanteils, das Gebäude RIC bedingt durch die Abschaltung der Erdsonden in 2009 sogar nur 20% des geplanten Anteils.

Dagegen konnte beim EFB (EnergieForum Berlin) der Deckungsanteil an der Wärmebereitstellung sogar um 1/3 des Planungswertes gesteigert werden.

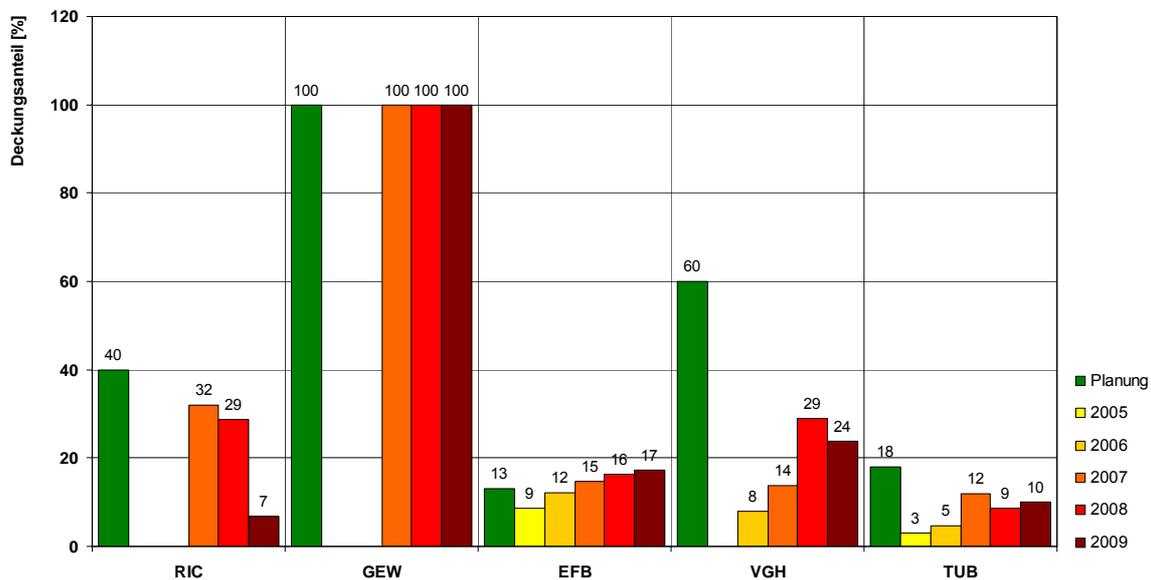


Abbildung 67: Deckungsanteil-Vergleich Planung zu Ist-Werte

### 5.3.3.2. Jahresenergieerträge

Erdwärmespeicher werden mit dem Ziel eines über die Jahre gleich bleibenden Temperaturniveaus im Erdreich und eines dauerhaft stabilen Betriebs für annähernd gleich große Erträge von Wärmeentzug und -eintrag geplant. Die im Rahmen des Monitorings erfassten Energieerträge schwanken von Jahr zu Jahr, vor allem infolge der durchgeführten Systemoptimierungen aber auch infolge des Wittereinflusses und des daraus resultierenden variierenden Bedarfs.

Für die Erdwärmespeicher sind die Jahresenergieerträge bezogen auf den Meter Erdwärmesonde oder Energiepfahl bzw. auf den Quadratmeter Absorberfläche hinsichtlich Wärmeentzug und -eintrag in Abbildung 68 und Tabelle 13 dargestellt.

Insgesamt entsprechen die entzogenen Wärmemengen in etwa den Planungswerten. Der Wärmeeintrag weicht dagegen zum Teil erheblich von den Planungswerten ab. Ursachen hierfür sind Fehler im gegenwärtigen Betrieb oder ein für den freien Kühlbetrieb zu hohes Temperaturniveau im Erdreich infolge von Betriebsfehlern unmittelbar nach Inbetriebnahme. Zur Erzielung eines über die Jahre gleich bleibenden Temperaturniveaus ist bei den meisten Anlagen daher ein gegenüber dem Wärmeeintrag höherer Wärmeentzug erforderlich.

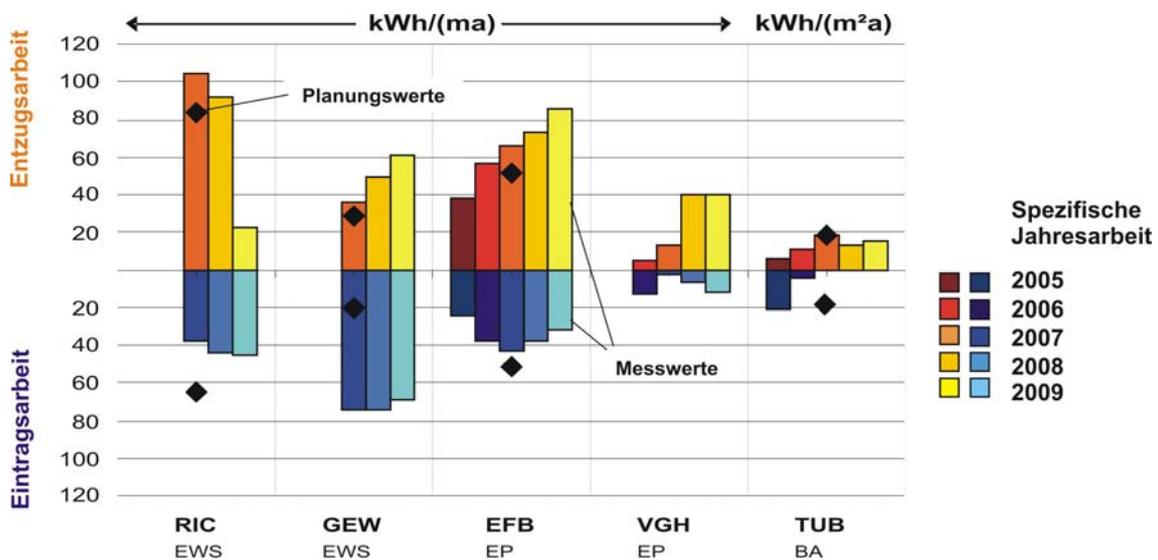


Abbildung 68: Entzugs- und Eintragsarbeit bezogen auf die Speichergröße

Tabelle 13: Entzugs- und Eintragsarbeit bezogen auf die Speichergröße, Messzeitraum 2005 bis 2009

Entzugs- und Eintragsarbeit			2005	2006	2007	2008	2009
RIC	Planung Entzug	[kWh/ma]			83,0		
	spez. Entzugsarbeit	[kWh/ma]			104,6	92,2	22,7
	Planung Eintrag	[kWh/ma]			65,0		
	spez. Eintragsarbeit	[kWh/ma]			38,3	43,8	45,7
GEW	Planung Entzug	[kWh/ma]			29,0		
	spez. Entzugsarbeit	[kWh/ma]			35,8	49,8	60,7
	Planung Eintrag	[kWh/ma]			20,0		
	spez. Eintragsarbeit	[kWh/ma]			74,6	74,7	69,2
EFB	Planung Entzug	[kWh/ma]			51,0		
	spez. Entzugsarbeit	[kWh/ma]	37,8	56,8	65,6	73,3	85,5
	Planung Eintrag	[kWh/ma]			51,0		
	spez. Eintragsarbeit	[kWh/ma]	24,4	38,2	42,9	38,1	31,9
VGH	Planung Entzug	[kWh/ma]			k.A.		
	spez. Entzugsarbeit	[kWh/ma]		4,9	13,2	40,2	39,8
	Planung Eintrag	[kWh/ma]			k.A.		
	spez. Eintragsarbeit	[kWh/ma]		12,7	2,7	6,3	12,3
TUB	Planung Entzug	[kWh/m <sup>2</sup> a]			18,0		
	spez. Entzugsarbeit	[kWh/m <sup>2</sup> a]	6,0	11,0	18,2	12,8	14,6
	Planung Eintrag	[kWh/m <sup>2</sup> a]			18,0		
	spez. Eintragsarbeit	[kWh/m <sup>2</sup> a]	21,8	5,0	0,1	0,0	0,0

Aus den gemessenen auf die Sonden- / Pfahlänge bzw. die Absorberfläche bezogenen Jahresenergieerträgen werden durch Mittelung über die Betriebsstunden mittlere spezifische Entzugs- und Eintragsleistungen entsprechend Abbildung 69 und Tabelle 14 abgeleitet.

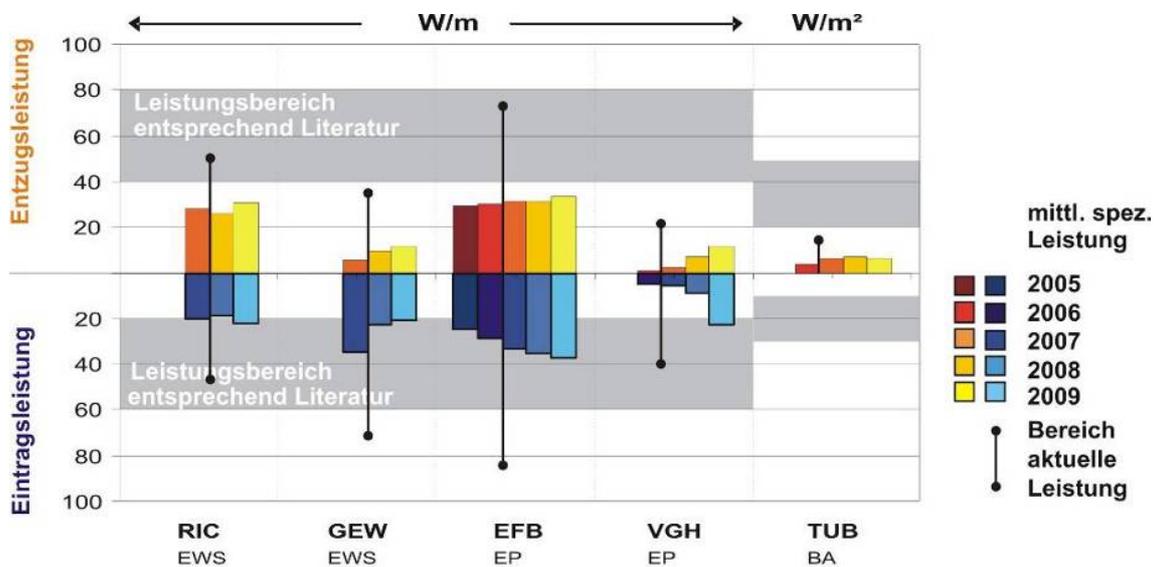


Abbildung 69: Mittlere Entzugs- und Eintragsleistung bezogen auf die Speichergröße

Tabelle 14: Mittlere Entzugs- und Eintragsleistung bezogen auf die Speichergröße, Messzeitraum 2005 bis 2009

Entzugs- und Eintragsleistung			2005	2006	2007	2008	2009
RIC	Leistungsspanne	[W/m]	53 bis - 48				
	spez. Entzugsleistung	[W/m]			28,1	25,9	30,9
	spez. Eintragsleistung	[W/m]			19,9	18,9	21,9
GEW	Leistungsspanne	[W/m]	37 bis - 67				
	spez. Entzugsleistung	[W/m]			5,5	9,3	11,3
	spez. Eintragsleistung	[W/m]			34,8	22,6	21,0
EFB	Leistungsspanne	[W/m]	78 bis - 85				
	spez. Entzugsleistung	[W/m]	29,1	29,9	31,6	31,4	33,1
	spez. Eintragsleistung	[W/m]	24,6	29,0	33,6	35,0	37,2
VGH	Leistungsspanne	[W/m]	26 bis - 42				
	spez. Entzugsleistung	[W/m]		0,8	2,2	7,0	11,6
	spez. Eintragsleistung	[W/m]		4,8	5,6	8,6	22,7
TUB	Leistungsspanne	[W/m²]	10 bis 0				
	spez. Entzugsleistung	[W/m²]		3,5	6,4	6,6	6,5
	spez. Eintragsleistung	[W/m²]		10,3	0,0	0,0	0,0

\*) Leistungsspanne: + = Entzug und - = Eintrag

Zusätzlich zu den aus Messwerten abgeleiteten mittleren spezifischen Leistungen sind in Abbildung 69 Leistungsbereiche gekennzeichnet, wie sie in der Literatur und von Herstellern von Erdwärmespeichern angegeben werden. Ein Vergleich dieser Werte mit den Monitoringergebnissen zeigt, dass die Eintragsleistungen zum Teil die Werte aus der Literatur widerspiegeln, die Entzugsleistungen in der Regel aber deutlich darunter liegen. Der Rückschluss, dass die Speicher theoretisch nicht in der Lage sind, die geplante Wärmeentzugsleistung aufzubringen, wäre jedoch falsch. Zurückzuführen ist die Differenz viel mehr auf den gegenüber dem Heizenergiebedarf höheren Kühlenergiebedarf in den vermessenen Büro- und Verwaltungsgebäuden. Die Auslegung von Erdwärmespeichern zum Heizen und Kühlen erfolgt daher in der Regel für den Wärmeeintrag, entsprechend überdimensioniert sind die Speicher für den Wärmeentzug.

Für den innerstädtischen Bereich hat das Monitoring gezeigt, dass bei weniger tiefen Systemen, wie Energiepfählen aber vor allem horizontalen Absorbern, die als saisonale Speicher genutzt werden, in der Regel ein gegenüber dem Wärmeeintrag höherer Wärmeentzug erforderlich ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass die höhere Bebauungsdichte und der hohe Versiegelungsgrad die oberflächennahen Schichten im innerstädtischen Bereich stärker erwärmen, bzw. die Abkühlung geringer ausfällt. Bei einer ausgeglichenen Bilanz zwischen Wärmeentzug und -eintrag ist das Temperaturniveau der Wärmesenke in der Regel für den freien Kühlbetrieb im Sommer eher zu hoch.

In Tabelle 15 sind die im Messzeitraum erfassten geothermischen Ergiebigkeiten sowie mittlere Eintrags- und Entzugsleistungen noch einmal nach Erdwärmesystemen sortiert aufgelistet. Leistungssteigerungen sind im Wesentlichen auf System- und Betriebsoptimierungen zurückzuführen.

**Tabelle 15:** Im Rahmen des Forschungsprojekts erfasste geothermische Ergiebigkeit und mittlere Entzugs- und Eintragsleistungen der Erdwärmespeichersysteme, Messzeitraum 2005 bis 2009

		EWS	EP	BA
<b>Geothermische Ergiebigkeit (Energieertrag)</b>				
Entzug	kWh/(m bzw. m <sup>2</sup> ·a)	20 - 105	5 - 85	5 - 20
Eintrag	kWh/(m bzw. m <sup>2</sup> ·a)	40 - 75	5 - 45	-
<b>Mittlere Leistung</b>				
Entzug	W/m bzw. m <sup>2</sup>	5 - 30	≤ 35	5
Eintrag	W/m bzw. m <sup>2</sup>	20 - 35	5 - 40	-

### 5.3.3.3. Jahressystemarbeitszahl

Eine Aussage zur Anlageneffizienz ist anhand der Energieerträge und mittleren Entzugs- sowie Eintragsleistungen nicht möglich. Hierzu wird die Jahres-Systemarbeitszahl als Quotient aus bereitgestellter thermischer Energie zur aufgebrauchten elektrischen Energie inklusive der Umwälzpumpe des Erdwärmespeichers herangezogen.

Z.B. für den Heizfall über Wärmepumpe:

$$\text{Jahres - Systemarbeitszahl} = \frac{\text{Jahressumme\_Wärmebereitstellung}}{\text{Jahressumme\_elektrische Antriebsenergie}_{WP+UP}}$$

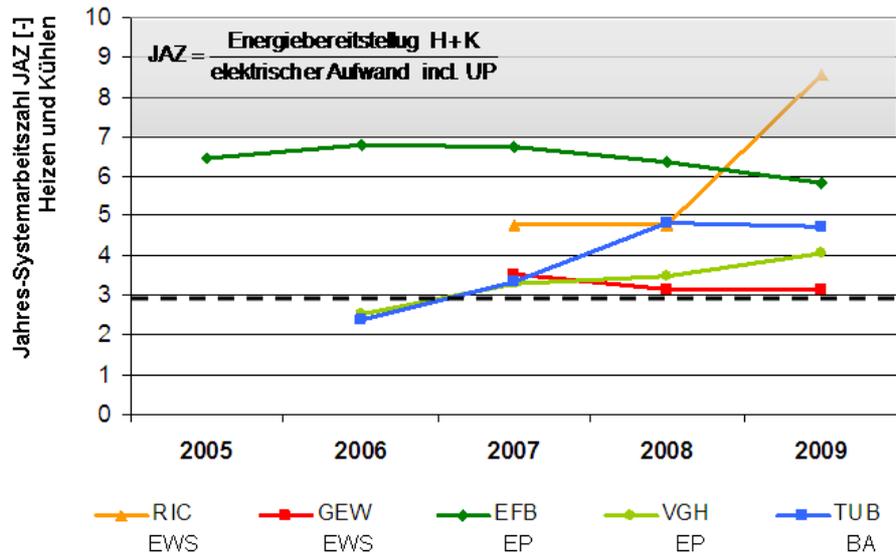
Eine Unterscheidung des elektrischen Energieaufwands als auch der bereitgestellten Kälteenergie nach den Betriebsarten freie Kühlung oder Kältemaschinenbetrieb ist im Rahmen des durchgeführten Monitorings nicht bei allen dargestellten Anlagen möglich. Im Folgenden wird daher das Verhältnis aus der Summe der bereitgestellten thermischen Energie aller Betriebsarten (Heizen und Kühlen) zur insgesamt aufgebrauchten elektrischen Energie gebildet.

$$\text{Jahres - Systemarbeitszahl} = \frac{\text{Jahressumme\_}(Wärmebereitstellung + Kältebereitstellung)}{\text{Jahressumme\_}(elektrische Antriebsenergie_{WP+KM+UP})}$$

Der so berechnete Quotient wird nachfolgend als Jahres-Systemarbeitszahl bezeichnet. In Summe ergeben sich für den Heiz- und Kühlbetrieb je nach Anteil freier Kühlung Jahres-Systemarbeitszahlen von 7 bis zu 10.

Zu Beginn des Monitorings liegen die Jahres-Systemarbeitszahlen bei 40% der Gebäude unter 3, was unter primärenergetischen Gesichtspunkten einen nicht effizienten Anlagenbetrieb

darstellt (siehe Kapitel 4.3.2). Im Rahmen des Monitorings können die Systeme und der Betrieb soweit optimiert werden, dass 2007 alle Anlagen Jahres-Systemarbeitszahlen zwischen 3 und 7 liegen, siehe Abbildung 70.



**Abbildung 70:** Jahressystemarbeitszahl der untersuchten Anlagen, 2005 bis 2009

Größere Sprünge in Bezug auf die Jahres-Systemarbeitszahl (RIC, VGH, TUB) sind vor allem auf die Systemoptimierungen bzw. Hydraulikänderungen zurückzuführen (siehe Kapitel 5.2).

Beim Gebäude RIC führt der Austausch der Umwälzpumpe im Erdsondenkreis sowie der Austausch auf einen den Randbedingungen angepassten Plattenwärmetauscher zu einer Steigerung der Systemarbeitszahl von 5 auf fast 9 im Jahr 2009, begünstigt durch den hohen Anteil des freien Kühlbetriebs. Aufgrund des stark abgekühlten Erdreichs wird in der Heizperiode 2009 die Wärmepumpe außer Betrieb genommen. Somit weist die Wärmepumpe einen kurzzeitigen Betrieb und Anteil an der Arbeitszahl auf. Sobald das Verhältnis von freiem Kühlbetrieb und Wärmepumpenbetrieb zukünftig wieder ausgewogener ist, wird eine Jahres-Systemarbeitszahl von 9 daher nicht zu halten sein.

Ursachen für leichte Schwankungen beim EnergieForum in Berlin (EFB) sind beispielsweise auf ein in Abhängigkeit vom Wetter variierender Bedarf sowie variierende Untergrundtemperaturen zurückzuführen. Bei stark abfallenden Erdreichtemperaturen im Heizbetrieb steigt der zu überwindende Temperaturhub der Wärmepumpe und die Jahresarbeitszahl wird kleiner.

Entscheidenden Einfluss auf die Jahressystemarbeitszahl hat darüber hinaus auch der Anteil des sehr effizienten freien Kühlbetriebs im Verhältnis zum Wärmepumpen- und Kältemaschinenbetrieb. So fällt die Jahressystemarbeitszahl in einem Jahr mit kaltem Winter und mildem Sommer in der Regel etwas niedriger aus als die eines Jahres, in dem aufgrund der Witterungsbedingungen im Vergleich weniger geheizt aber mehr gekühlt werden muss (siehe Tabelle 16).

**Tabelle 16:** Jahressystemarbeitszahlen getrennt nach Heizen und Kühlen sowie Gesamtjahresarbeitszahl für die Erdwärmespeicher, 2005 bis 2009

Jahres-Arbeitszahl		2005	2006	2007	2008	2009
RIC	Heizen [-]			3,9	3,7	3,5
	Kühlen FK [-]			21,6	21,9	64,1
	<b>Gesamt [-]</b>			<b>4,8</b>	<b>4,8</b>	<b>8,6</b>
GEW	Heizen [-]				3,2	3,3
	Kühlen FK [-]				3,1	2,7
	Kühlen KM [-]				3,0	2,9
	<b>Gesamt [-]</b>			<b>3,5</b>	<b>3,1</b>	<b>3,2</b>
EFB	Heizen [-]	5,3	5,1	5,1	4,9	4,6
	Kühlen FK [-]	18,5	29,8	30,6	36,0	53,0
	<b>Gesamt [-]</b>	<b>6,5</b>	<b>6,8</b>	<b>6,8</b>	<b>6,4</b>	<b>5,8</b>
VGH	Heizen [-]		2,7	3,4	3,9	3,7
	Kühlen FK/KM [-]		2,4	8,4	2,6	10,7
	<b>Gesamt [-]</b>		<b>2,6</b>	<b>3,3</b>	<b>3,5</b>	<b>4,1</b>
TUB	Heizen [-]			3,3	4,8	4,8
	Kühlen FK [-]			-	-	-
	<b>Gesamt [-]</b>		<b>2,4</b>	<b>3,4</b>	<b>4,8</b>	<b>4,8</b>

Die im Vergleich zu anderen Anlagen niedrigen Jahressystemarbeitszahlen bei der Gelsenwasser AG mit einem nahezu optimierten Betrieb hängen mit der Zielsetzung zusammen. Die Beheizung und Kühlung des Gebäudes erfolgt hier im Gegensatz zu den anderen Gebäuden im Prinzip monovalent über das Erdwärmesystem. Lediglich die Zuluft wird im Sommer über ein unabhängiges System auf Raumtemperaturniveau gehalten. Um auch an extremen Sommertagen die Kühllasten aus dem Gebäude abführen zu können, ist neben einem Plattenwärmetauscher auch eine an das Erdreich gekoppelte Kältemaschine in das System integriert. Da die Erdsondenanlage der Gelsenwasser AG also nicht wie die anderen Systeme hauptsächlich zur Grund- sondern auch zur Spitzenlastdeckung ausgelegt ist, laufen Wärmepumpe und Kältemaschine einen Großteil der Betriebszeit im weniger effizienten Teillastbetrieb.

Dass eine gezielte Qualitätssicherung und ein Betriebsmonitoring schon von der Inbetriebnahme an zu einem technisch optimalen Betrieb führen können, zeigen die Ergebnisse des EnergieForums. Hier werden während des gesamten Monitoringzeitraums Jahressystemarbeitszahlen von knapp 7 erreicht. Beim Großteil der anderen untersuchten Anlagen besteht weiteres Optimierungspotential hinsichtlich des freien Kühlbetriebs. Infolge fehlerhafter Betriebsweise und überwärmtem Erdreich sowie nicht auf die geringen Temperaturdifferenzen zwischen Wärmesenke und Gebäudekühlsystem abgestimmten Anlagenkomponenten kann der freie Kühlbetrieb hier bisher nicht (TUB) oder nur sehr eingeschränkt (GEW und VGH) genutzt werden.

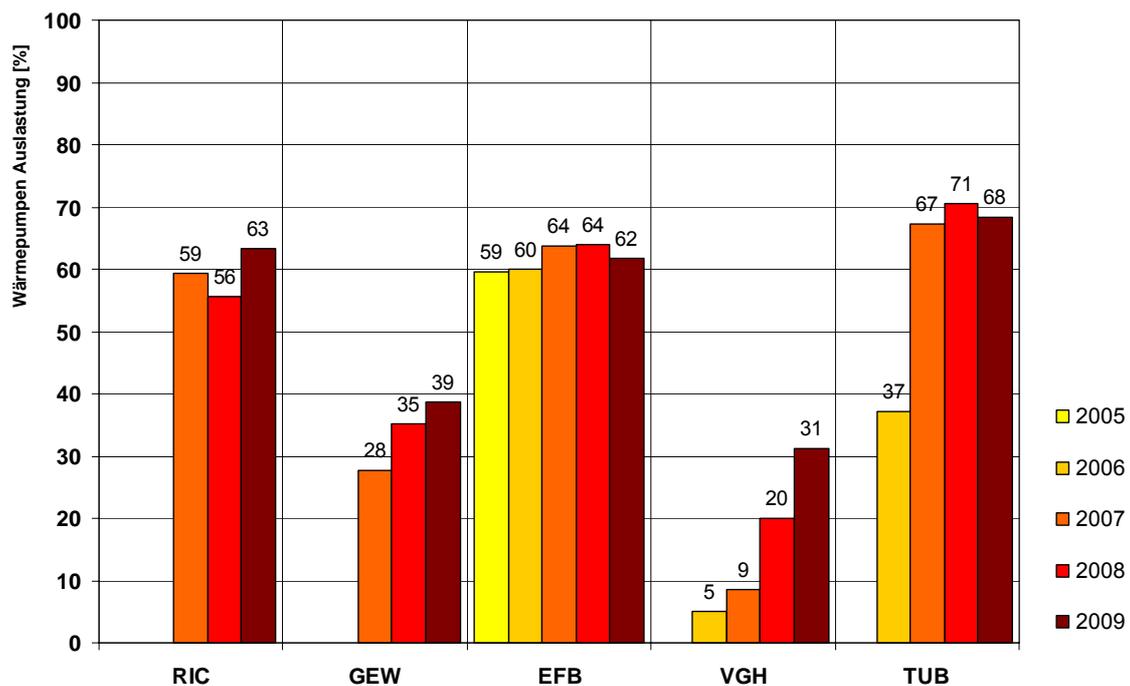
#### 5.3.3.4. Auslastung

Für den Wärmepumpen- und den Kältemaschinenbetrieb entspricht die Anlagenauslastung dem Verhältnis der mittleren Heiz- bzw. Kühlleistung innerhalb eines Messzeitraums zur jeweiligen Nennleistung. Eine entsprechende Berechnung der Anlagenauslastung ist für den freien Kühlbetrieb nicht möglich, da die maximal verfügbare Leistung in Abhängigkeit der Jahreszeit und der Betriebsdauer stark variiert.

$$\text{Auslastung WP} = \frac{\text{Jahressumme Wärmebereitstellung}}{\text{Jahresbetriebsstunden WP} \times \text{Nennleistung WP}}$$

Tendenziell sind Erdwärmesysteme bei gut ausgelastetem Betrieb effizienter als in Teillast. Aus diesem Grund werden sie zumeist eher knapp und zur Grundlastdeckung ausgelegt. Eine geringe Auslastung ist daher häufig schon ein Hinweis auf Optimierungsbedarf. Abbildung 71 zeigt für die fünf untersuchten Gebäude die berechneten Werte der Auslastung für die einzelnen Jahre. Alle Anlagen sind bis auf die Gelsenwasser AG (GEW) für die Grundlastdeckung ausgelegt und erreichen daher Auslastungen > 50%. Die erdgekoppelte Wärmepumpe der Gelsenwasser AG ist für den Spitzenlastfall ausgelegt und erreicht demgegenüber nur eine Auslastung von max. 40% innerhalb des Messzeitraums.

Bei der VGH Regionaldirektion in Lüneburg (VGH) ist gut zu erkennen, dass die Umsetzung des planmäßigen Heizbetriebs die Auslastung der Wärmepumpe um ein vielfaches gesteigert hat.



**Abbildung 71:** Auslastung der Anlage im Wärmepumpenbetrieb

In Abbildung 72 und Abbildung 73 werden informativ die mittleren jährlichen Eintrags- bzw. Entzugsleistungen der Erdwärmespeicher über den Betriebsstunden für den Messzeitraum 2005 bis 2009 der untersuchten fünf Gebäude dargestellt. Bei den Messwerten der Anlagen der VGH Regionaldirektion Lüneburg (VGH) und der Gelsenwasser AG (GEW) handelt es sich bei den Betriebsstunden im Kühlfall um die Summe aus freiem Kühlbetrieb und Kältemaschinenbetrieb. Durch den Kältemaschinenbetrieb wird das Speichertemperaturniveau schneller durch die höheren Rücklauftemperaturen angehoben als im freien Kühlbetrieb.

Aufgrund der Optimierungen sind bisher keine konkreten Abhängigkeiten zwischen Leistung und Betriebsstunden zu verzeichnen.

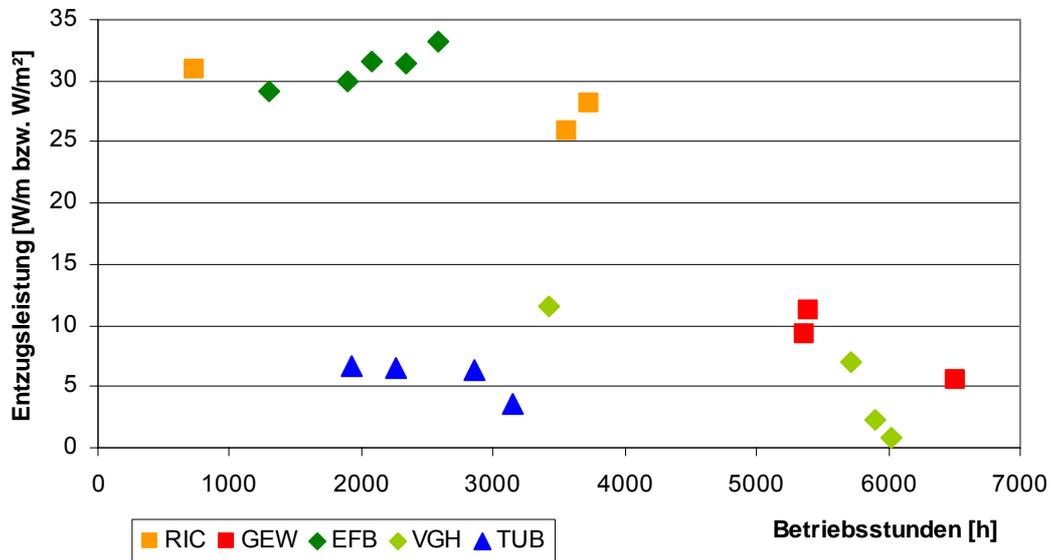


Abbildung 72: Mittlere jährlichen Entzugsleistung bezogen auf die Speichergröße über den Betriebsstunden, Messzeitraum 2005 bis 2009

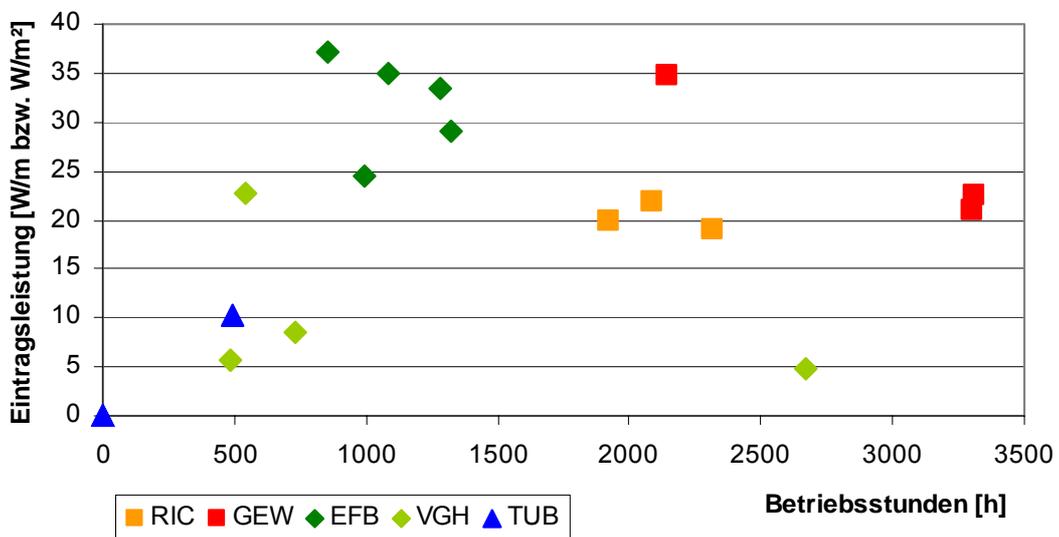


Abbildung 73: Mittlere jährlichen Eintragsleistung bezogen auf die Speichergröße über den Betriebsstunden, Messzeitraum 2005 bis 2009

### 5.3.3.5. Speichernutzungsgrad

Wie bereits bei den Planungswerten (Kapitel 4.3.2) wird auch bei den Messwerten der Speichernutzungsgrad aus dem Verhältnis Entzug zu Eintrag bestimmt.

$$\text{Speichernutzungsgrad} = \frac{\text{Entzugsenergie}}{\text{Eintragsenergie}}$$

In Abbildung 74 bis Abbildung 78 sind für die untersuchten Anlagen der Speichernutzungsgrad sowie die ein- und ausgespeicherten Wärmemengen dargestellt. Innerhalb des Forschungsvorhabens stellt sich bei keiner Anlage ein eingeschwungener Zustand ein. Gründe hierfür sind die über die gesamte Monitoringzeit durchgeführten Optimierungen, aber auch unterschiedliche Witterungsbedingungen. Beim EnergieForum Berlin (EFB) beeinflusst zusätzlich die Nutzung und Belegung der Mietflächen die Energiebedarfsmengen und somit das Erdwärmesystem.

Im optimalen bzw. eingeschwungenen Fall eines Erdreichspeicher mit einer ausgeglichener Energiebilanz sollte der Speichernutzungsgrad bei 100% liegen.

Der Speichernutzungsgrad des Erdreichs der Anlage des Gebäudes RIC nimmt über die Laufzeit des Forschungsvorhabens ab, da in den Wintermonaten aufgrund von Austrittstemperaturen  $< 0^{\circ}\text{C}$  die Anlage außer Betrieb genommen werden muss. In den Sommermonaten kann dagegen der Wärmeeintrag gesteigert werden.

Für die VW Bibliothek in Berlin (TUB) wird ab 2007 kein Speichernutzungsgrad ermittelt, da das Temperaturniveau des Bodenabsorbers keinen Wärmeeintrag im Sommer zulässt. Erst nach einer Regeneration des Erdreichs ist die sommerliche Kühlung wieder möglich.

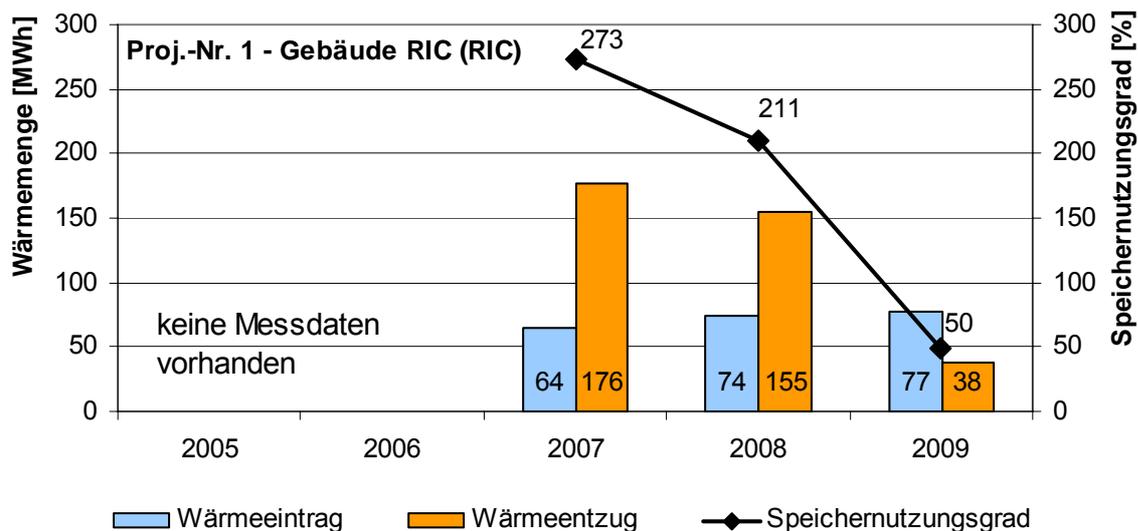


Abbildung 74: Speichernutzungsgrad Gebäude RIC, 2005 bis 2009

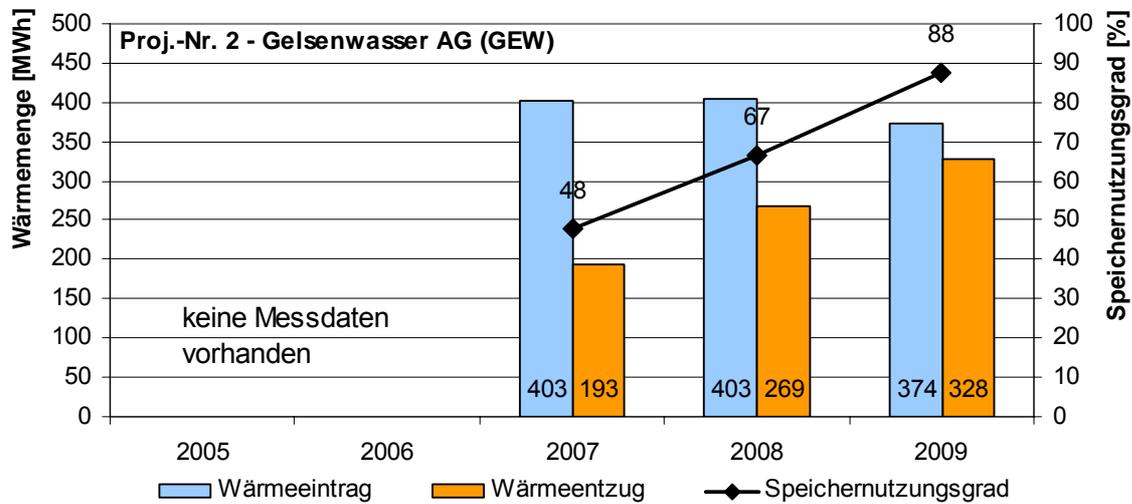


Abbildung 75: Speichernutzungsgrad Gelsenwasser AG Gelsenkirchen, 2005 bis 2009

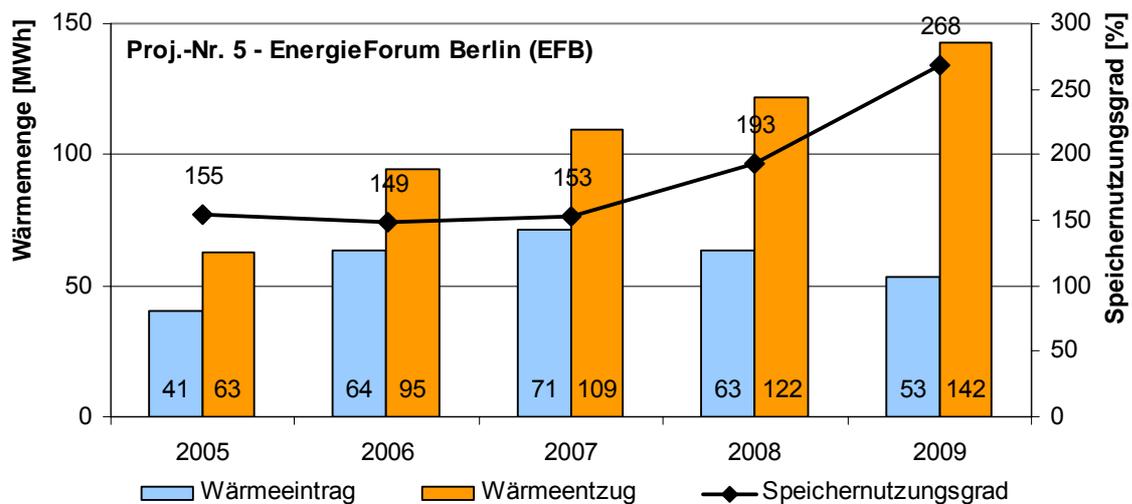


Abbildung 76: Speichernutzungsgrad EnergieForum Berlin, 2005 bis 2009

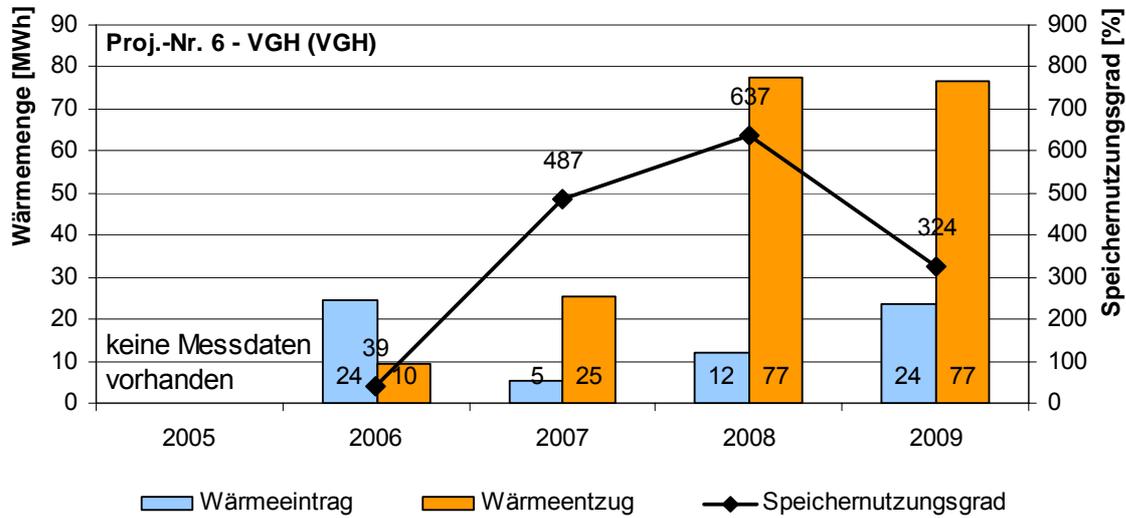


Abbildung 77: Speichernutzungsgrad VGH Regionaldirektion Lüneburg, 2005 bis 2009

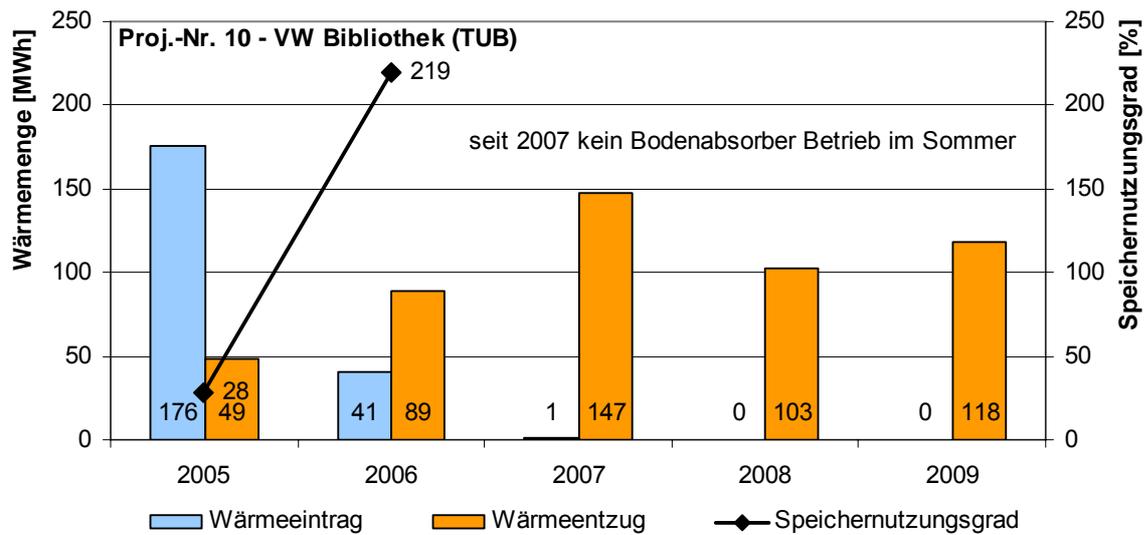


Abbildung 78: Speichernutzungsgrad VW-Bibliothek Berlin, 2005 bis 2009





Zum Vergleich werden die im Rahmen von WKSP untersuchten Gebäude mit Erdwärmenutzung mit den Bürogebäuden aus dem Forschungsprojekt EVA (FKZ 0327346A) verglichen. Das EVA- Projekt untersucht im Rahmen des Forschungsprogramms Energieoptimiertes Bauen (EnOB) in den Jahren 2004 bis 2006 insgesamt 19 Bürogebäude – überwiegend errichtet in den letzten 10 Jahren – hinsichtlich ihrer Energieeffizienz und ihres Nutzerkomforts. Die sich ergebenden Mittelwerte des Energieverbrauchs werden mit den Verbrauchswerten der WKSP Gebäude aus dem Jahr 2009 gegenübergestellt.

Unterschiedliche Nutzungsprofile und Randbedingungen der Gebäude werden nicht berücksichtigt. So können z.B. die Betriebs- und Nutzungszeiten als auch die Gebäude- und Büroausstattung variieren. Unterschiede in der Bausubstanz, Betriebsführung und im Nutzerkomfort, welche den Energieverbrauch erheblich beeinflussen, werden in der Gegenüberstellung ebenfalls nicht berücksichtigt.

### Jahres-Wärmeverbrauch

Der ermittelte Jahres-Wärmeverbrauch beinhaltet den Nutzwärmeverbrauch des Gebäudes zuzüglich der Verteil- und Speicherverluste. Dabei erfolgt die Aufteilung nach den jeweiligen Wärmeerzeugern, wie z.B. Wärmepumpe, Fernwärme, BHKW, etc. Enthalten ist auch der jährliche Wärmebedarf der DEC Anlagen bei den Projekten Gelsenwasser AG Gelsenkirchen (GEW) und VW-Bibliothek Berlin (TUB).

Die spezifischen Kennwerte für den Wärmeverbrauch liegen für die betrachteten Gebäude (WKSP und EVA) zwischen 34 und 157 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>), siehe Abbildung 80. Bezüglich der Lüftungsstrategie bewegen sich bei den Gebäuden ohne Erdwärmesystem alle mechanisch belüfteten im oberen Verbrauchsbereich und die meisten natürlich belüfteten Gebäude im unteren Verbrauchsbereich. Der Mittelwert aller betrachteten Gebäude liegt bei 76 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>). Gebäude mit Erdwärmesystem liegen bei einem Mittel von 63 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>) und weisen somit einen geringeren Endenergieverbrauch Wärme als Gebäude ohne Erdwärmenutzung (74 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>)) auf. Für den Vergleich wird das Gebäude der Gelsenwasser AG (GEW) außer Betracht gelassen, da im Wärmeverbrauchskennwert auch die Energie für die Kälteerzeugung mit bilanziert wird.

Aspekte wie eine standort- und anforderungsoptimierte Fassade oder der Einsatz von Flächensystemen spielt bei der Integration von Erdwärmesystemen in ein Gebäude eine wesentliche Rolle und spiegelt sich in einem meist geringeren Nutzenergiebedarf gegenüber den vergleichbaren Gebäuden wieder.

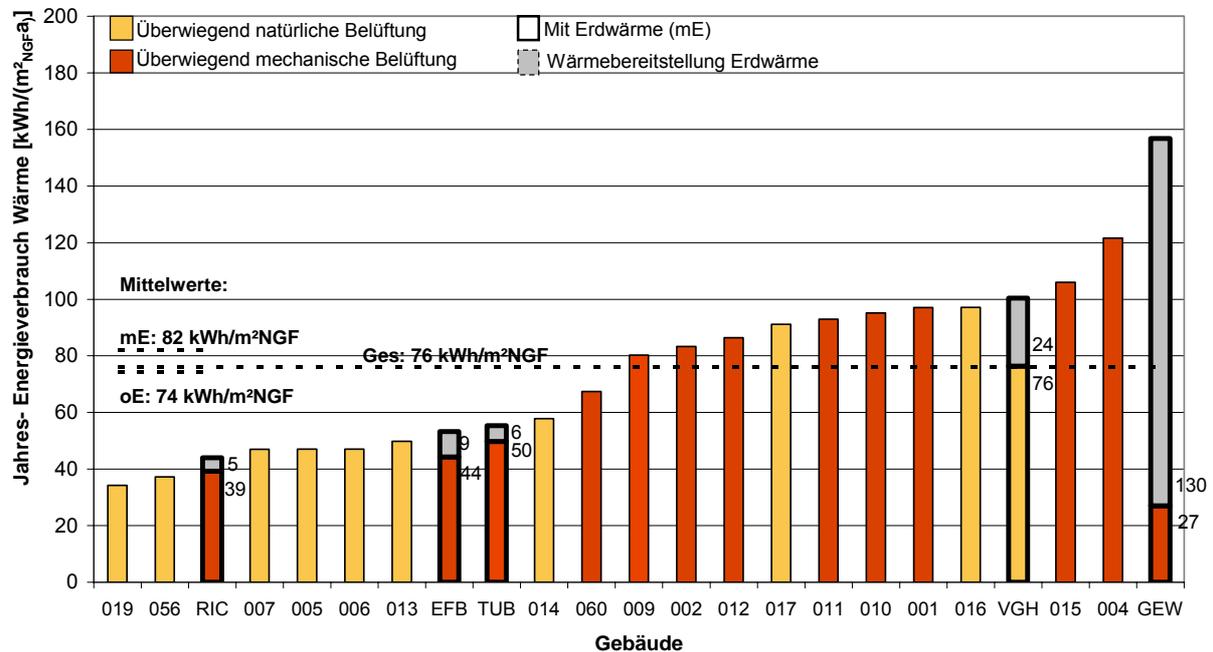


Abbildung 80: Jahres-Wärmeverbrauch im Vergleich

### Jahres-Stromverbrauch

In den nachfolgend dargestellten Jahres-Stromverbrauchskennwerten werden alle Verbraucher des Gebäudes erfasst (siehe oben definierte Bezugsgrenzen). Bei der Gelsenwasser AG in Gelsenkirchen wird zusätzlich eine Stromgutschrift für das BHKW berücksichtigt.

Die Spanne der spezifischen Kennwerte für den Stromverbrauch reicht von 33 bis 128 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>). Der Mittelwert aller aufgeführten Gebäude liegt für den spezifischen Jahresstromverbrauch bei 75 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>).

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen der Bürogebäude in Bezug auf Komfort, technische Ausstattung und Betriebsweise sind aus Abbildung 81 keine Unterschiede zwischen Gebäuden mit konventionellen Systemen und Erdwärmesystemen zu erkennen. Der Stromverbrauch der einzelnen Gebäude mit und ohne Erdwärmesystem verteilt sich über die gesamte Breite der Verbrauchskennwerte, wobei der Mittelwert für Gebäude mit Erdwärme bei 68 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>) und bei Gebäuden ohne Erdwärme bei 72 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>) liegt.

Bezüglich des Lüftungssystems ergibt sich eine ähnliche Verteilung wie beim Wärmeverbrauch, siehe Abbildung 80. Gebäude ohne mechanische Lüftung haben im Durchschnitt einen geringen Stromverbrauch.

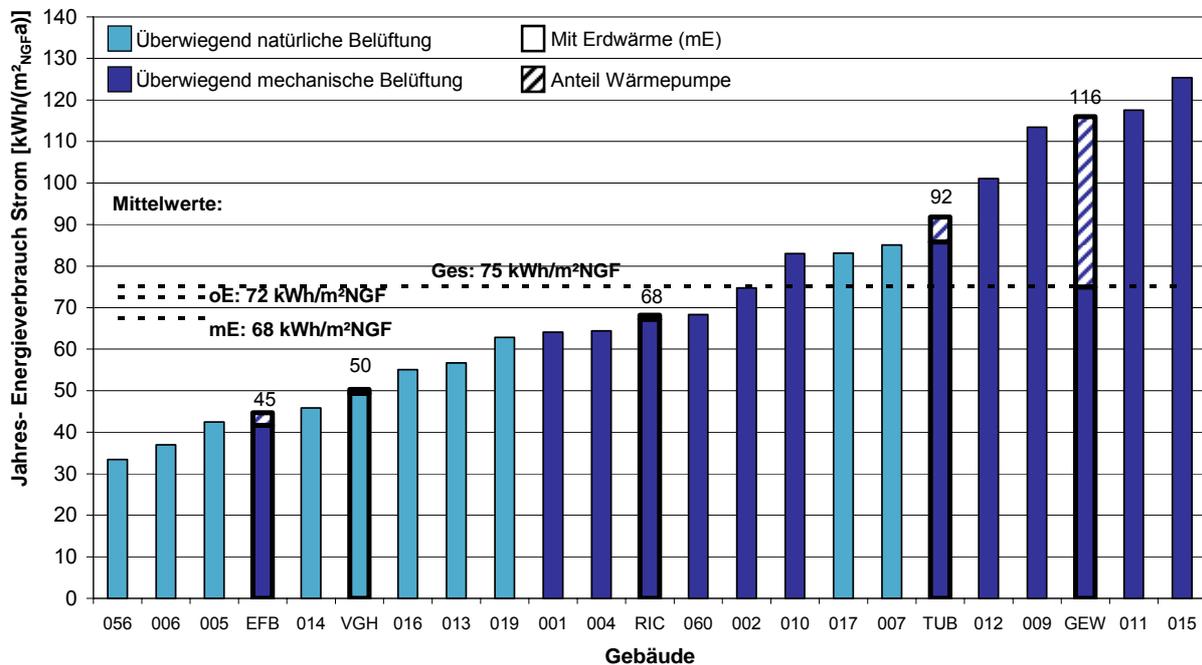


Abbildung 81: Jahres-Stromverbrauch im Vergleich

### Jahres-Primärenergieverbrauch

Für eine ökologisch Beurteilung des Gesamtenergieverbrauchs der Gebäuden mit Erdwärme- und Erdkältenutzung, werden die intern ermittelten Endenergieverbrauchswerte für Strom und Wärme unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Primärenergie-Faktoren zu Jahres-Primärenergieverbräuchen zusammengefasst.

Abbildung 82 zeigt die spezifischen Jahres-Primärenergieverbrauchswerte der Vergleichsgebäude sowie der Gebäude mit Erdwärmesystem. Die Spanne der Kennwerte aller Gebäude reicht von 116 bis 413 kWh<sub>PE</sub>/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>). Der Mittelwert aller aufgeführten Gebäude liegt für den spezifischen Primärenergieverbrauch bei 261 kWh<sub>PE</sub>/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>). Bei den Gebäuden, die über Erdwärme geheizt und gekühlt werden, liegt die Spanne zwischen 152 und 343 kWh<sub>PE</sub>/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>). Es ergibt sich hier ein Mittelwert von 236 kWh<sub>PE</sub>/(m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>).

Durch die Nutzung von Erdwärme wird von den im Forschungsprojekt untersuchten Gebäuden, nach einer Überführung in einen planmäßigen Betriebszustand, die technisch mögliche Energieeffizienz erreicht. Der spezifische Jahres-Primärenergieverbrauch der Gebäude mit Erdwärmesystem liegt bis auf ein Gebäude unterhalb des Mittelwertes des Jahres-Primärenergieverbrauchs aller aufgeführten Gebäude. Der Mittelwert der Gebäude mit Endwärmesystem ist rund 20% geringer als der der Gebäude mit konventionellen Heiz- und Kühlsystemen.

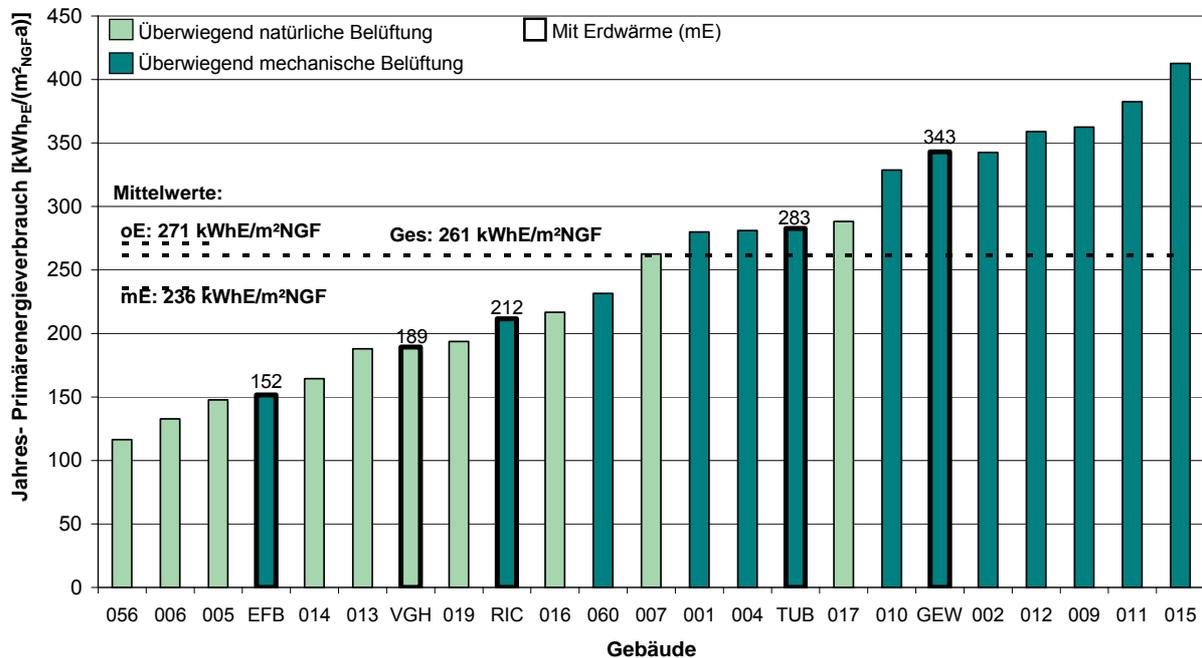


Abbildung 82: Jahres-Primärenergieverbrauch im Vergleich

### 5.3.4.2. CO<sub>2</sub>-Emission

Als Indikator für die Umweltbelastung wird der Energieverbrauch in das CO<sub>2</sub>-Äquivalents  $m_{CO_2}$  umgerechnet. Die Kohlendioxid-Emissionen werden mit Hilfe von CO<sub>2</sub>-Äquivalentkennzahlen und dem Endenergieverbrauch ermittelt (siehe Tabelle 17). Damit werden auch die anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen für die vorgelagerten Prozessketten wie beispielsweise die Förderung, die Verarbeitung und der Transport erfasst.

Die für das Projekt ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilowattstunde Erdwärme- bzw. -kältebereitstellung sind im Wesentlichen abhängig von der Anlagen- und Betriebseffizienz.

Tabelle 17: CO<sub>2</sub>-Äquivalent verschiedener Energieträger [Quelle: GEMIS Version 4.5 [12]]

Energieart	Treibhausgase CO <sub>2</sub> -Äquivalent [g/kWh <sub>E</sub> ]
Erdgas	244
Heizöl leicht	302
Fernwärme / Nahwärme *)	219
Strom-Mix	633

\*) Nahwärme mit 70% KWK- Anteil (Stromgutschrift für Kohlestrom)

Tabelle 18 zeigt die Berechnungsergebnisse der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Erdwärmeanlagen in Bezug auf die Wärme- und Kältebereitstellung der erfassten Jahre. In einem weiteren Schritt werden die Ergebnisse mit einem Referenzsystem verglichen. Dabei wird für den Vergleichsfall die Wärme über eine Fernwärmeanschluss bezogen und die Kälte über eine luftgekühlte Kompressionskältemaschine (Jahresarbeitszahl 2,5) bereitgestellt. Aufgrund der durchgeführten Anlagen- und Betriebsoptimierungen im Rahmen des Forschungsprojekts ergeben sich für die betrachteten Jahre unterschiedlich hohe CO<sub>2</sub>-Emissionswerte. Zusätzlich werden die Emissionswerte durch die klimatischen Randbedingungen und entsprechenden Bedarfsänderungen (z.B. Flächenleerstand) beeinflusst.

In absoluten Zahlen ergeben sich je Gebäude und Optimierungsfortschritt insgesamt für die Jahre 2005 bis 2009 CO<sub>2</sub> Reduktionen von minimal 1,9 t bis maximal 71,2 t pro Jahr im Vergleich zu dem o.g. Referenzsystem. Dies entspricht einer Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen zwischen 16 und maximal 70 %.

**Tabelle 18:** Jahres-CO<sub>2</sub>-Emission Erdwärme und –kälte sowie CO<sub>2</sub>-Minderungen gegenüber einer Referenzversorgung (Fernwärme, konventionelle Kälteerzeugung mit luftgekühlter Kompressionskältemaschine (Arbeitszahl 2,5)), 2005 bis 2009

CO <sub>2</sub> -Emission		2005	2006	2007	2008	2009
<b>RIC</b>	CO <sub>2</sub> -Emission Erdwärme / -kälte [kg/a]			36.923	35.207	8.989
	CO <sub>2</sub> - Emission Fernwärme / Kompressionskälte [kg/a]			65.709	63.098	29.845
	Verminderter Ausstoß CO <sub>2</sub> [kg/a]			28.786	27.891	20.856
	gegenüber Fernwärme / Kompressionskälte			44%	44%	70%
<b>GEW</b>	CO <sub>2</sub> -Emission Erdwärme / -kälte [kg/a]			204.048	215.585	231.089
	CO <sub>2</sub> - Emission Fernwärme / Kompressionskälte [kg/a]			275.288	257.073	276.198
	Verminderter Ausstoß CO <sub>2</sub> [kg/a]			71.240	41.488	45.109
	gegenüber Fernwärme / Kompressionskälte			26%	16%	16%
<b>EFB</b>	CO <sub>2</sub> -Emission Erdwärme / -kälte [kg/a]	10.913	16.066	18.591	21.402	23.826
	CO <sub>2</sub> - Emission Fernwärme / Kompressionskälte [kg/a]	26.417	40.802	47.094	50.842	51.856
	Verminderter Ausstoß CO <sub>2</sub> [kg/a]	15.504	24.736	28.503	29.440	28.030
	gegenüber Fernwärme / Kompressionskälte	59%	61%	61%	58%	54%
<b>VGH</b>	CO <sub>2</sub> -Emission Erdwärme / -kälte [kg/a]		10.447	8.718	18.799	17.116
	CO <sub>2</sub> - Emission Fernwärme / Kompressionskälte [kg/a]		10.079	10.610	24.156	25.777
	Verminderter Ausstoß CO <sub>2</sub> [kg/a]		-368	1.892	5.357	8.661
	gegenüber Fernwärme / Kompressionskälte		-4%	18%	22%	34%
<b>TUB</b>	CO <sub>2</sub> -Emission Erdwärme / -kälte [kg/a]		40.738	35.822	17.418	20.072
	CO <sub>2</sub> - Emission Fernwärme / Kompressionskälte [kg/a]		36.697	43.746	30.653	34.927
	Verminderter Ausstoß CO <sub>2</sub> [kg/a]		-4.041	7.924	13.235	14.855
	gegenüber Fernwärme / Kompressionskälte		-11%	18%	43%	43%

Abbildung 83 und Abbildung 84 zeigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen getrennt nach Wärme und Kälteerzeugung bezogen auf die jeweils gelieferte Wärme- oder Kältemenge. Zusätzlich sind in den Diagrammen die jeweiligen konventionellen Systeme dargestellt.

$$CO_2 \text{ Emission}_{\text{Heizen}} = \frac{\text{Jahressumme}_{\text{elektrischeAntiebsenergie}_{\text{WP+UP}}} \times CO_2 \text{ Äquivalent}_{\text{Strommix}}}{\text{Jahressumme}_{\text{Wärmeenergie}}}$$

$$CO_2 \text{ Emission}_{\text{Kühlen}} = \frac{\text{Jahressumme}_{\text{elektrischeAntiebsenergie}_{\text{KM+UP}}} \times CO_2 \text{ Äquivalent}_{\text{Strommix}}}{\text{Jahressumme}_{\text{Kühlenergie}}}$$

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen im betrachteten Messzeitraum für die Gebäude mit Erdwärmesystem im Heizfall zwischen 120 und 270 g/kWh<sub>Heizen</sub> und im Kühlfall zwischen 10 und 265 g/kWh<sub>Kühlen</sub>. Ursachen für die Schwankungen der Werte bei der Energiepfehanlage der VGH Lüneburg und den verhältnismäßig hohen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Erdsondenanlage der Gelsenwasser AG (GEW) resultieren aus dem Defekt der Kompressionskälte (VGH) und der Spitzenlast-Auslegung des erdgekoppelten Systems (GEW).

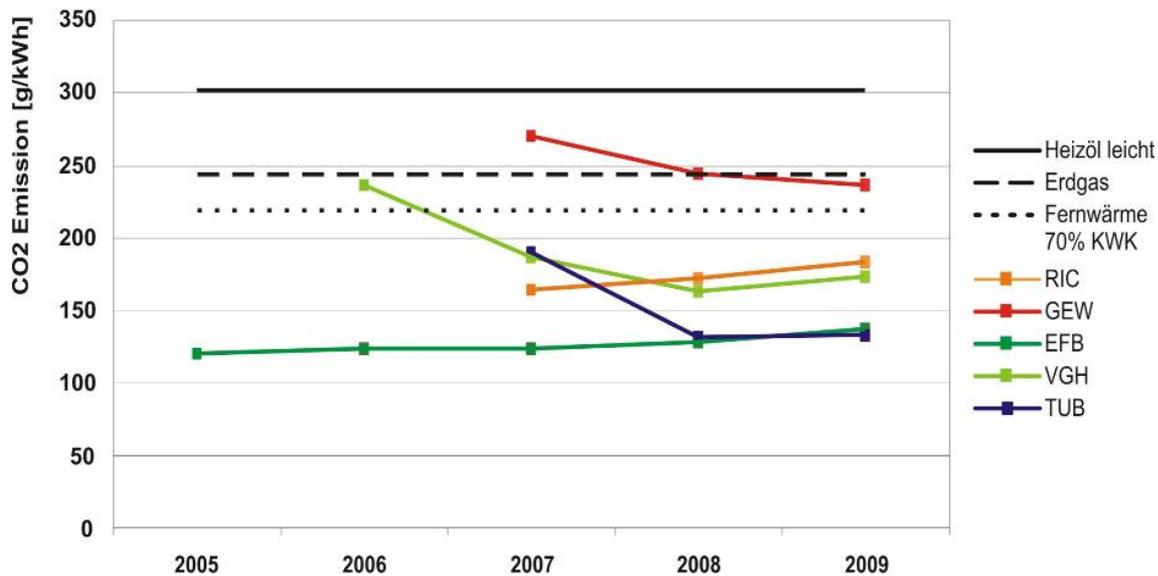


Abbildung 83: Spezifische CO<sub>2</sub> Emissionen Heizen in g/kWh, 2005 bis 2009

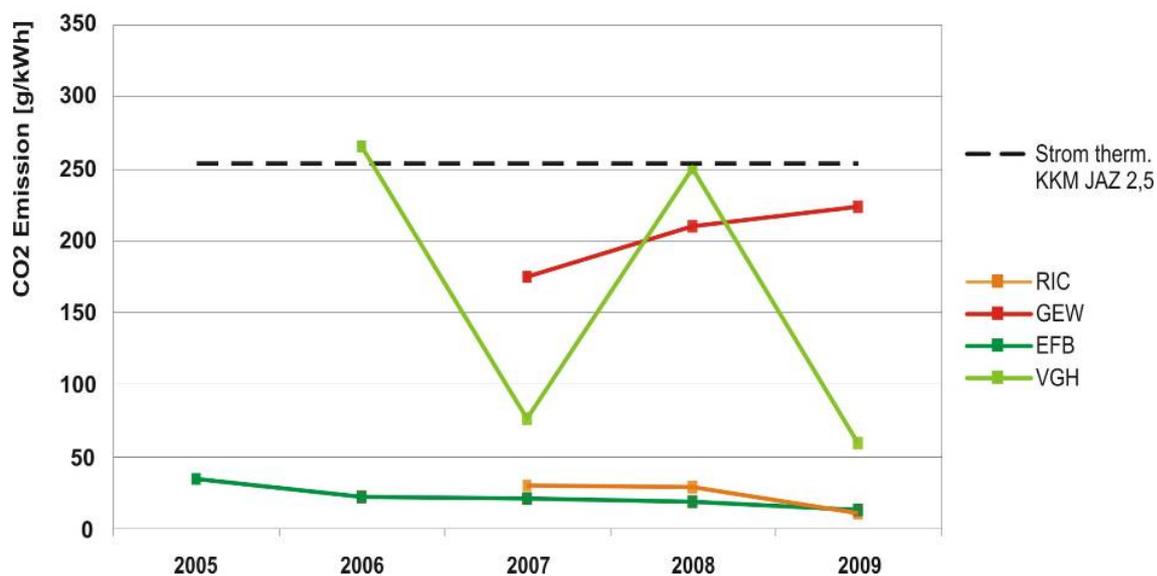


Abbildung 84: Spezifische CO<sub>2</sub> Emissionen Kühlen in g/kWh, 2005 bis 2009

Die flächenbezogenen CO<sub>2</sub>- Reduktionspotentiale bezogen auf die Referenzanlage sind in Abbildung 85 und Tabelle 19 dargestellt. Die auf die Nettogrundfläche (NGF) bezogenen Werte liegen für das letzte Monitoringjahr 2009 zwischen 0,5 und 7,3 kg/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>. Bedingt durch den stärkeren Betrieb der Kältemaschine bei der Gelsenwasser AG steigen auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen je Kilowattstunde im Kühlfall (Abbildung 84). Bezogen auf die Referenzanlage aus Fernwärme und Kompressionskältemaschine sind somit Abminderungen in der CO<sub>2</sub>-Reduktion zu verzeichnen (Abbildung 85).

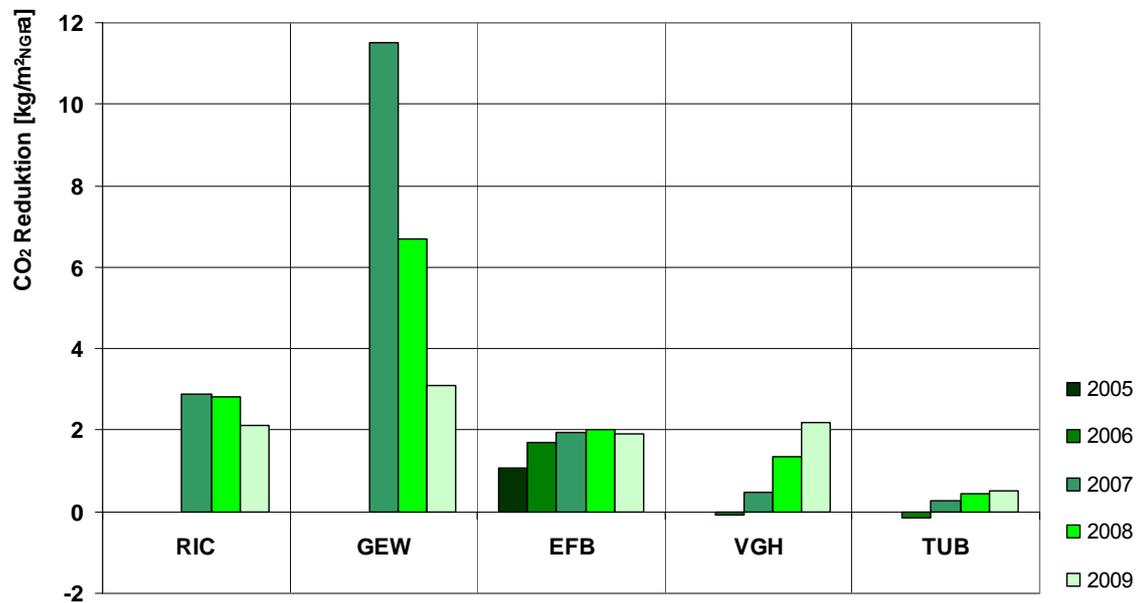


Abbildung 85: Jährliche auf NGF bezogene CO<sub>2</sub>- Reduktion durch Erdwärmenutzung bezogen auf Referenzanlage, 2005 bis 2009

Tabelle 19: Jährliche auf NGF bezogene CO<sub>2</sub>- Reduktion durch Erdwärmenutzung bezogen auf Referenzanlage, 2005 bis 2009

	2005	2006	2007	2008	2009
	[kg/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a)]				
RIC			2,9	2,8	2,1
GEW			11,5	6,7	7,3
EFB	1,1	1,7	1,9	2,0	1,9
VGH		-0,1	0,5	1,4	2,2
TUB		-0,1	0,3	0,4	0,5

### 5.3.5. Energiekosten

Im Folgenden werden die Kosten für den Energiebezug dargestellt und bewertet. Basis der Ermittlung der Heiz- und Kühlenergiekosten sind die Angaben des Statistischen Bundesamtes [13] zu Strom- und Wärmepreisen entsprechend Tabelle 20.

Tabelle 20: Strompreise 2005 bis 2009 (ohne Umsatzsteuer [13])

	2005	2006	2007	2008	2009
Strommix [€/kWh]	0,182	0,189	0,202	0,214	0,277
Strom WP [€/kWh]	0,155	0,125	0,137	0,140	0,140
Fernwärme [€/kWh]	0,062	0,069	0,074	0,078	0,083

Tabelle 21 zeigt die Berechnungsergebnisse der Energiekosten für die Erdwärmeanlagen in Bezug auf die Wärme- und Kältebereitstellung der einzelnen Jahre. In einem weiteren Schritt werden die Ergebnisse analog zu den CO<sub>2</sub>- Emissionskennwerten mit einem Referenzsystem verglichen. Dabei wird für den Vergleichsfall die Wärme über eine Fernwärmeanschluss bezogen und die Kälte über eine luftgekühlte Kompressionskältemaschine (Jahresarbeitszahl 2,5) bereitgestellt. Aufgrund der durchgeführten Anlagen- und Betriebsoptimierungen ergeben sich für die Jahre unterschiedliche Kostenwerte. Insgesamt liegen die Heiz- und Kühlenergiekosten der Anlagen zur thermischen Nutzung des Erdreichs teilweise deutlich unter den der konventionellen Vergleichsanlagen.

Für das Jahr 2009 werden durch die Nutzung von Erdwärme zum Heizen und Kühlen in den untersuchten Bürogebäude Energiekosteneinsparungen von rund 0,30 bis ca. 5,60 Euro/m<sup>2</sup><sub>NGFa</sub> (5.000 bis ca. 34.500 Euro/a) gegenüber einer Fernwärme- und Kompressionskältenutzung erzielt. Dies entspricht einer Kosteneinsparung um minimal 40 bis maximal 76 % je nach Rahmenbedingungen der untersuchten Anlagen.

Der Kostenvergleich in Tabelle 21 bezieht sich ausschließlich auf die regenerativ substituierten Energiemengen. Zusätzlich benötigte Wärme oder Kälte aufgrund der differierenden Ergebigkeit des Erdwärmesystems wird nicht berücksichtigt.

**Tabelle 21:** Absolute Jahres-Energiekosten ohne Umsatzsteuer für Erdwärme und –kälte sowie Kosteneinsparungen im Vergleich zu einer Fernwärmennutzung und konventioneller Kälteerzeugung mit luftgekühlter Kompressionskältemaschine (Arbeitszahl 2,5), 2005 bis 2009

Energiekosten		2005	2006	2007	2008	2009
RIC	Kosten Erdwärme / -kälte [Euro/a]			7.991	7.787	1.988
	Kosten Fernwärme / Kompressionskälte [Euro/a]			20.178	20.002	8.219
	Kosteneinsparung [Euro/a]			12.187	12.215	6.231
	Vergleich Fernwärme/Kompressionskälte [Euro/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> ]			1,23	1,23	0,63
				60%	61%	76%
GEW	Kosten Erdwärme / -kälte [Euro/a]			44.162	47.681	51.110
	Kosten Fernwärme / Kompressionskälte [Euro/a]			75.933	76.148	85.554
	Kosteneinsparung [Euro/a]			31.771	28.467	34.444
	Vergleich Fernwärme / Kompressionskälte [Euro/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> ]			5,13	4,60	5,57
				42%	37%	40%
EFB	Kosten Erdwärme / -kälte [Euro/a]	1.983	3.173	4.024	4.733	5.270
	Kosten Fernwärme / Kompressionskälte [Euro/a]	6.712	11.413	14.125	16.252	17.594
	Kosteneinsparung [Euro/a]	4.729	8.241	10.101	11.519	12.324
	Vergleich Fernwärme/Kompressionskälte [Euro/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> ]	0,32	0,56	0,69	0,79	0,84
		70%	72%	72%	71%	70%
VGH	Kosten Erdwärme / -kälte [Euro/a]		2.063	1.887	4.158	3.786
	Kosten Fernwärme / Kompressionskälte [Euro/a]		2.702	3.494	8.397	8.956
	Kosteneinsparung [Euro/a]		639	1.607	4.239	5.170
	Vergleich Fernwärme/Kompressionskälte [Euro/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> ]		0,16	0,41	1,07	1,31
			24%	46%	50%	58%
TUB	Kosten Erdwärme / -kälte [Euro/a]		8.045	7.753	3.852	4.439
	Kosten Fernwärme / Kompressionskälte [Euro/a]		10.398	14.719	10.952	13.175
	Kosteneinsparung [Euro/a]		2.353	6.966	7.100	8.736
	Vergleich Fernwärme/Kompressionskälte [Euro/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> ]		0,08	0,24	0,24	0,30
			23%	47%	65%	66%

Die infolge thermischer Nutzung des Erdreichs erzielten Energiekosteneinsparungen sind stark abhängig von Größe, Auslastung und Effizienz der Erdwärmeanlage. Für die untersuchten Gebäude sind die Energiekosten getrennt nach Heizen und Kühlen bezogen auf die be-

reitgestellte Energiemenge in Abbildung 86 und Abbildung 87 für die Jahre 2005 bis 2009 dargestellt.

$$\text{Energiekosten}_{\text{Heizen}} = \frac{\text{Jahressumme}_{\text{elektrischeAntiebsenergie}}_{\text{WP+UP}} \times \text{Strompreis WP}}{\text{Jahressumme}_{\text{Wärmeenergie}}}$$

$$\text{Energiekosten}_{\text{Kühlen}} = \frac{\text{Jahressumme}_{\text{elektrischeAntiebsenergie}}_{\text{KM+UP}} \times \text{Strompreis WP}}{\text{Jahressumme}_{\text{Kühlenergie}}}$$

Zusätzlich sind in den Diagrammen die Energiepreise der konventionellen Systeme von Heizöl, Erdgas und Fernwärme bzw. einer Kälteerzeugung über Kompressionskältemaschinen mit Luftrückkühlung (Jahres-Arbeitszahl 2,5) abgebildet. Je nach Objekt und Optimierungsstand betragen die Energiekosten für die thermische Nutzung des Erdreichs zum Beheizen der Gebäude im betrachteten Messzeitraum zwischen 2 bis 6 Cent/kWh<sub>Heizen</sub>. Für die Kühlung über das Erdreich werden Kosten von 0,2 bis 6 Cent/kWh<sub>Kühlen</sub> benötigt.

Im Fall der VGH ist die effiziente Betriebsweise der freien Kühlung über die Energiepfahlanlage 2006 bis 2008 so gut wie gar nicht zum Einsatz gekommen. Dadurch fallen die Kosteneinsparungen mit 639 €/a bis 4239 €/a gegenüber einer konventionellen Wärme- und Kälteerzeugung insgesamt verhältnismäßig gering aus (Tabelle 21). Durch die verbesserte Effizienz der Erdwärmennutzung im Heizfall (durch Umsetzung eines planmäßigen Heizbetriebs) konnten die Energiekosten pro Jahr gegenüber 2006/2007 jedoch schon deutlich verringert werden (Abbildung 86). Die zu Beginn der Betriebsoptimierung sowie im Jahr 2008 höheren Kältegestehungskosten resultieren aus einer defekten bzw. nicht planmäßig eingestellten Kompressions-Kälteanlage.

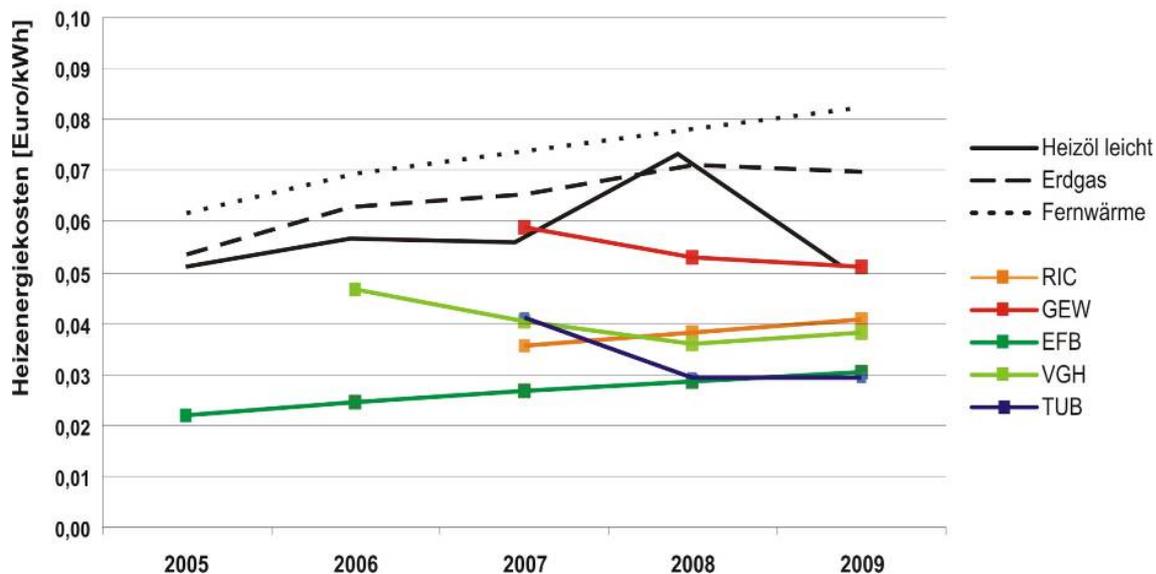
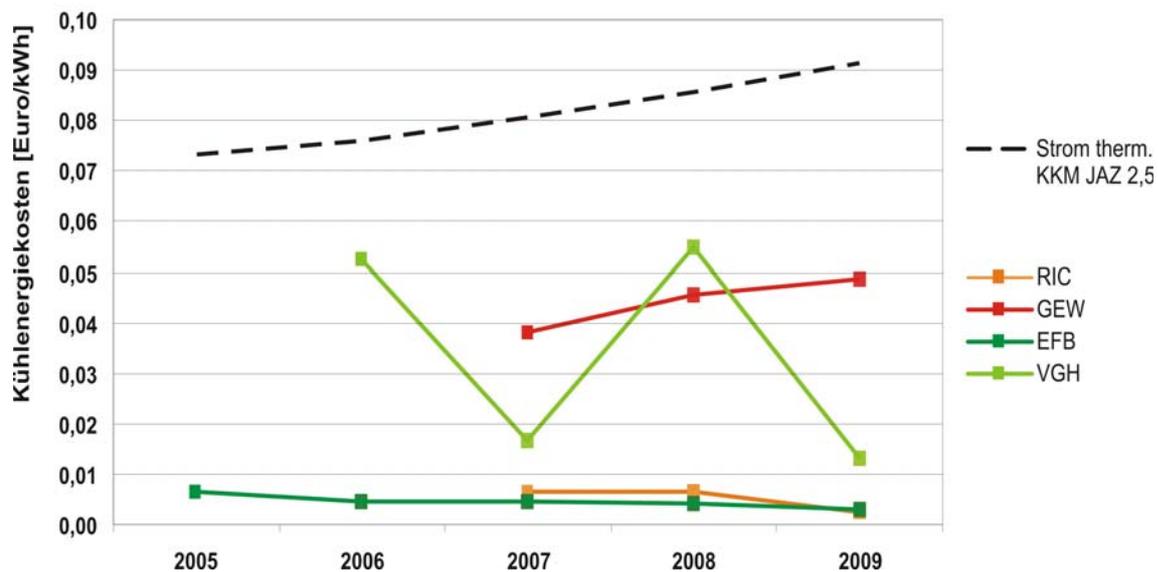


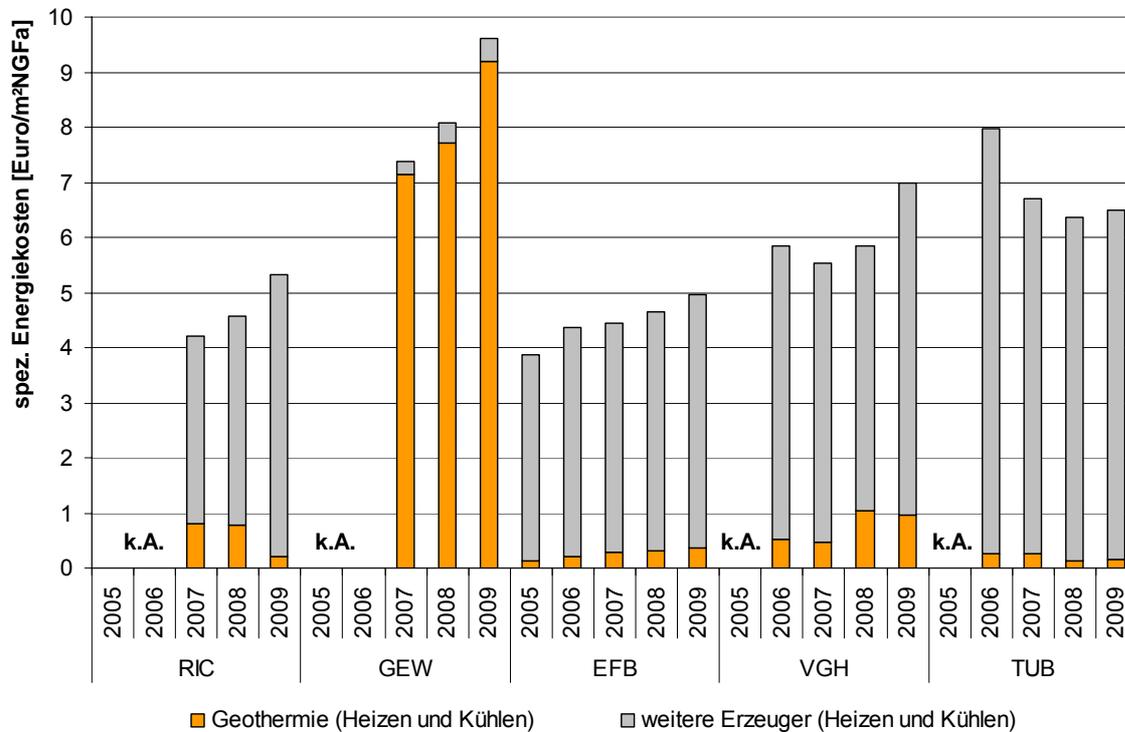
Abbildung 86: Jährliche Energiekosten Heizen, 2005 bis 2009 (ohne Umsatzsteuer)



**Abbildung 87:** Jährliche Energiekosten Kühlen, 2005 bis 2009 (ohne Umsatzsteuer)

Abbildung 88 und Tabelle 22 zeigen die spezifischen Energiekosten der Erdwärmespeicheranlagen zum Heizen und Kühlen der WKSP- Gebäude bezogen auf den  $m^2$  NGF und Abbildung 89 und Tabelle 23 die spezifischen Energiekosten bezogen auf die Kilowattstunde thermisch. Für den Betrachtungszeitraum liegen die Energiekosten der Erdwärmesysteme zwischen  $0,13 \text{ Euro}/(m^2_{\text{NGFa}})$  und  $8,26 \text{ Euro}/(m^2_{\text{NGFa}})$  bzw.  $1,60 \text{ Cent}/kWh$  und  $5,50 \text{ Cent}/kWh$ .

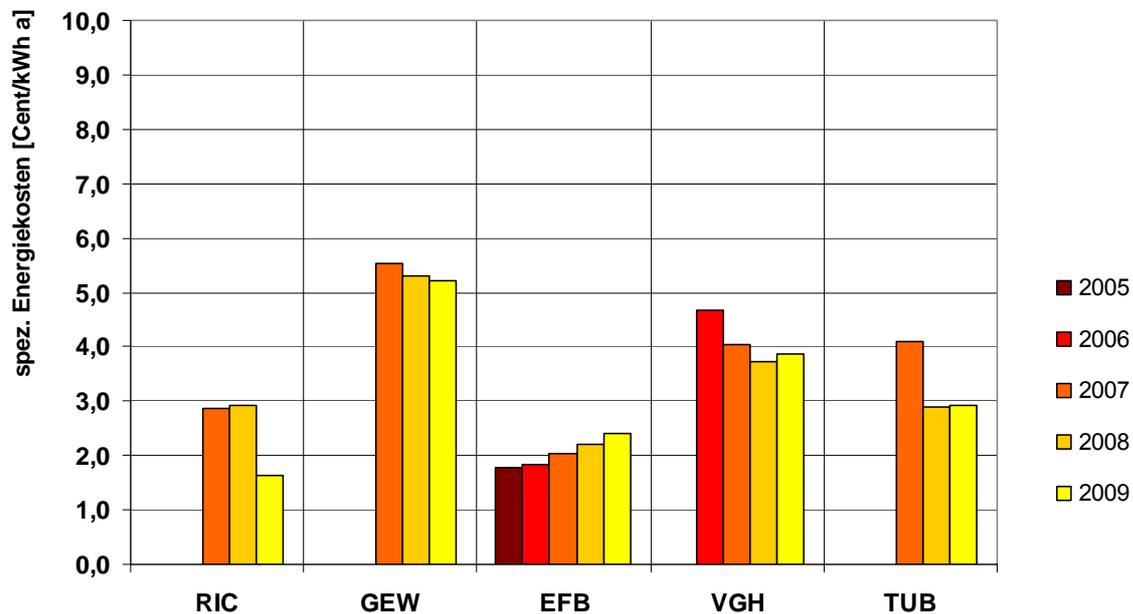
Die relativ hohen Energiekosten der Erdwärme- und Erdkältenutzung bei der Gelsenwasser AG resultieren aus der Auslegung der Wärmepumpenanlage zur Spitzenlastdeckung sowie über die ganzjährige Versorgung der Serverräume mit Kälte. Über die erhöhten Teillast-Betriebszeiten ergeben sich zum Teil ungünstige Leistungs- bzw. Arbeitszahlen für den Wärmepumpenbetrieb.



**Abbildung 88:** Spezifische Jahresenergiekosten der Erdwärmesysteme und weiterer Erzeuger innerhalb der Gebäude (Heizen und Kühlen), 2005 bis 2009 (ohne Umsatzsteuer)

**Tabelle 22:** Spezifische Jahresenergiekosten der Erdwärmesysteme, 2005 bis 2009 (ohne Umsatzsteuer)

	2005	2006	2007	2008	2009
	[Euro/m <sup>2</sup> NGF a]				
RIC			0,81	0,78	0,20
GEW			7,14	7,70	8,26
EFB	0,14	0,22	0,27	0,32	0,36
VGH		0,52	0,48	1,05	0,96
TUB		0,27	0,26	0,13	0,15



**Abbildung 89:** Spezifische Jahresenergiekosten der Erdwärmesysteme bezogen auf Kilowattstunde (Heizen und Kühlen), 2005 bis 2009 (ohne Umsatzsteuer)

**Tabelle 23:** Spezifische Jahresenergiekosten der Erdwärmesysteme bezogen auf Kilowattstunde (Heizen und Kühlen), 2005 bis 2009 (ohne Umsatzsteuer)

	2005	2006	2007	2008	2009
	[Cent/kWh a]				
<b>RIC</b>			2,87	2,92	1,63
<b>GEW</b>			5,53	5,30	5,20
<b>EFB</b>	1,77	1,84	2,03	2,20	2,39
<b>VGH</b>		4,68	4,03	3,71	3,88
<b>TUB</b>			4,09	2,90	2,93

### 5.3.6. Thermischer Komfort und sommerliche Überhitzung

Im Folgenden soll der Einfluss der unterschiedlichen Konzepte auf den thermischen Komfort der untersuchten Büro- und Verwaltungsgebäude mit geothermischen Anlagen zum Heizen und Kühlen veranschaulicht werden. Mit einem Jahresmonitoring wird der thermische Komfort der WKSP Gebäude mit dem Fokus auf dem sommerlichten Wärmeschutz untersucht. Wesentliche Zielgröße ist die Anzahl der Überhitzungsstunden.

Anhand von Referenzfühlern der Gebäudeleittechnik oder zusätzlich installierten Temperatursensoren mit integrierten Datenloggern werden die Raumlufttemperaturen in den Vergleichsräumen erfasst und ausgewertet. Die Geräte werden in den Büros entsprechend DIN EN 7726 [15] in ca. 110 cm Höhe möglichst nah am Arbeitsplatz installiert. Der thermische Komfort wird anhand der jährlichen Überhitzungsstunden als quantitativer Maßstab vergleichend bewertet.

Dabei werden von jedem Gebäude die Temperaturen von ausgewählten Räumen innerhalb der Arbeitszeit (Montag – Freitag 8.00 bis 18.00 Uhr) für das Jahr 2008 betrachtet. Die ermittelten Raumtemperaturen werden zum einen über ihre Häufigkeitsverteilung in verschiedenen Temperaturbereichen, zum anderen im Vergleich zur DIN 1946 Teil 2 [14] aufgetragen.

Als Überhitzungsstunden wird die Anzahl der Stunden über 26°C Raumtemperatur innerhalb der Büronutzungszeit (Montag – Freitag 8.00 bis 18.00 Uhr) bezeichnet.

Die Bürozeit beträgt nach DIN 4108-2 [16] zehn Stunden pro Tag und 2.600 Stunden pro Jahr. Daraus wird ein Grenzwert definiert, nach dem an 10% der jährlichen Bürozeit (entspricht 260 h/a) eine Raumtemperatur größer 26°C zulässig ist.

Anhand der Gebäude ist zu erkennen, dass der thermische Komfort durch Anlagen in Verbindung mit Erdwärmespeichern eingehalten werden kann. Der Außentemperaturbereich bis 24 °C kann selbst über monovalent betriebene erdgekoppelte Systeme sehr gut abgedeckt werden. Komforteinschränkungen sind bei einigen Gebäuden in den höheren Temperaturbereichen > 26°C zu verzeichnen.

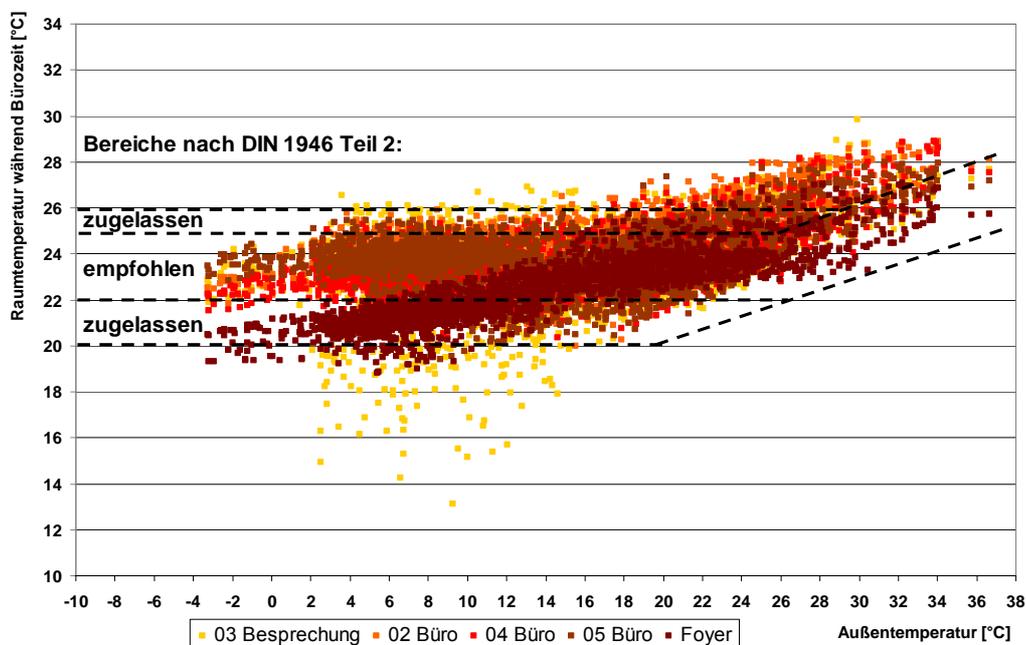
#### Projekt 1 – Gebäude RIC, Hamburg (RIC)

Zur Ermittlung des thermischen Komforts werden vier Bereiche / Zonen im 4. Obergeschoss (02, 04 und 05 = Büro; 03 = Besprechungsraum) untersucht. Zusätzlich werden die Temperaturen im Foyer (Erdgeschoss) aufgezeichnet. Die Großraum- wie die Einzelbüros werden generell im Gebäude RIC über die Fassade mit Außenluft versorgt. Die Konditionierung der Zuluft erfolgt über die Zuluftboxen und die des Raums zusätzlich über die Betonkernaktivierung. Eine manuelle Fensterlüftung kann durch Schiebeflügel zum Zwischenraum der Doppelfassade erfolgen. Das Foyer wird gegenüber den Büros nur über eine Fußbodenheizung bzw. –kühlung und einer natürlichen Lüftung versorgt.

Abbildung 90 zeigt die für die jeweiligen Räume aufgezeichneten Raumtemperaturen in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Dabei liegen die Temperaturwerte größtenteils innerhalb der nach DIN 1946 Teil 2 [14] empfohlenen Bereiche der operativen Raumtemperatur. Ab einer Außentemperatur > 17°C steigen die Raumtemperaturen auf Werte zwischen 25 °C und 26 °C. Ab einer Außentemperatur > 19°C überschreiten die Raumtemperaturen zeitweise 26°C und liegen außerhalb des empfohlenen Bereichs.

Im Foyer fallen ab einer Außentemperatur < 14°C die Raumtemperaturen verstärkt unter 22 °C, wobei sie aber noch im zugelassenen Bereich der DIN 1946-2 liegen. Ursache hierfür ist die nachströmende Außenluft über den Eingangsbereich bei niedrigen Außentemperaturen.

Im Besprechungsraum (03) hat das Lüftungsverhalten den größten Einfluss auf die Raumtemperatur. Hierdurch lässt sich der starke Raumtemperaturabfall in der Heizperiode erklären.



**Abbildung 90:** Stunden der Raumlufttemperatur während der Bürozeiten im Vergleich zur DIN 1946-2, Gebäude RIC Hamburg, Messzeitraum 2008

Die in den Sommermonaten entstehenden internen und durch den hohen Anteil an Verglasung auch externen Lasten können über die BKT und den Luftboxen abgeführt werden. In den untersuchten Räumen wird der Grenzwert von 10% der Überhitzungsstunden von 260 h/a nicht überschritten, siehe Abbildung 91. Die Überschreitungshäufigkeit der empfohlenen Temperatur liegt zwischen 2,5 und 8 Prozent.

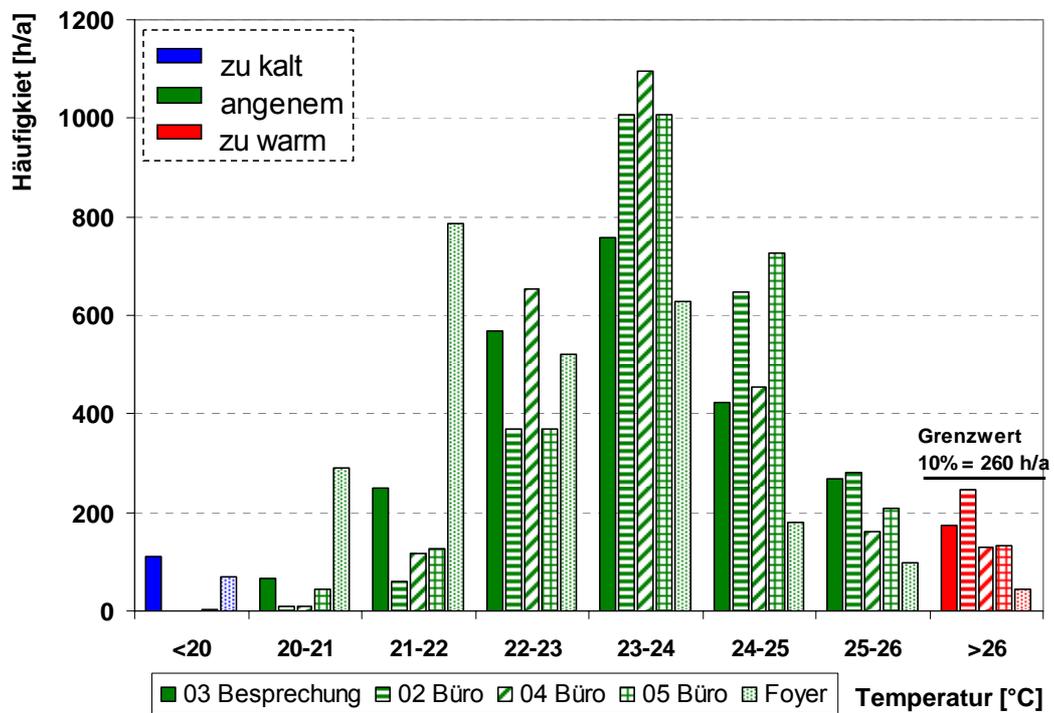
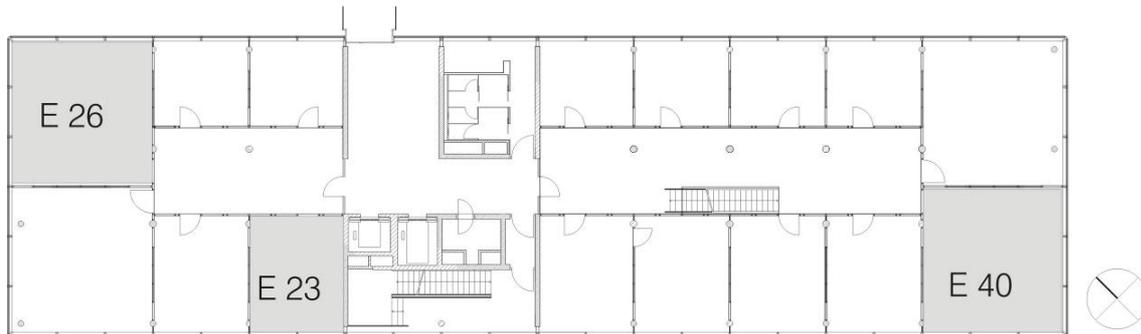


Abbildung 91: Stunden der Raumlufttemperatur während der Bürozeiten aufgeteilt auf Temperaturbereiche, Gebäude RIC Hamburg, Messzeitraum 2008

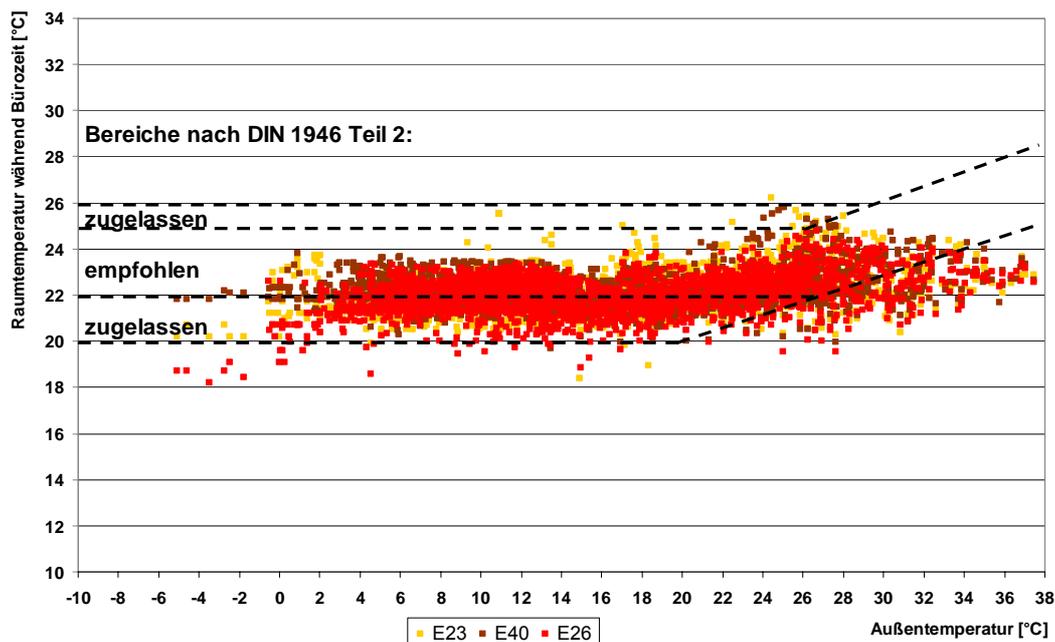
## Projekt 2 - Gelsenwasser AG Gelsenkirchen (GEW)

Für die Bewertung des thermischen Komforts werden drei Bürobereiche näher untersucht. Die in Abbildung 92 dargestellten grauen Bereiche kennzeichnen zwei Eckbüros (E23, E40) und ein Mittelbüro (E23) im Erdgeschoss. Die Büroräume des Neubaus der Gelsenwasser AG werden über Deckensegel, eine Nachtlüftung sowie über konditionierte Zuluft gekühlt. Die hohen Anforderungen an den thermischen Komfort werden über die Anlagentechnik erfüllt. Alle anfallenden externen und internen Lasten werden abgeführt.



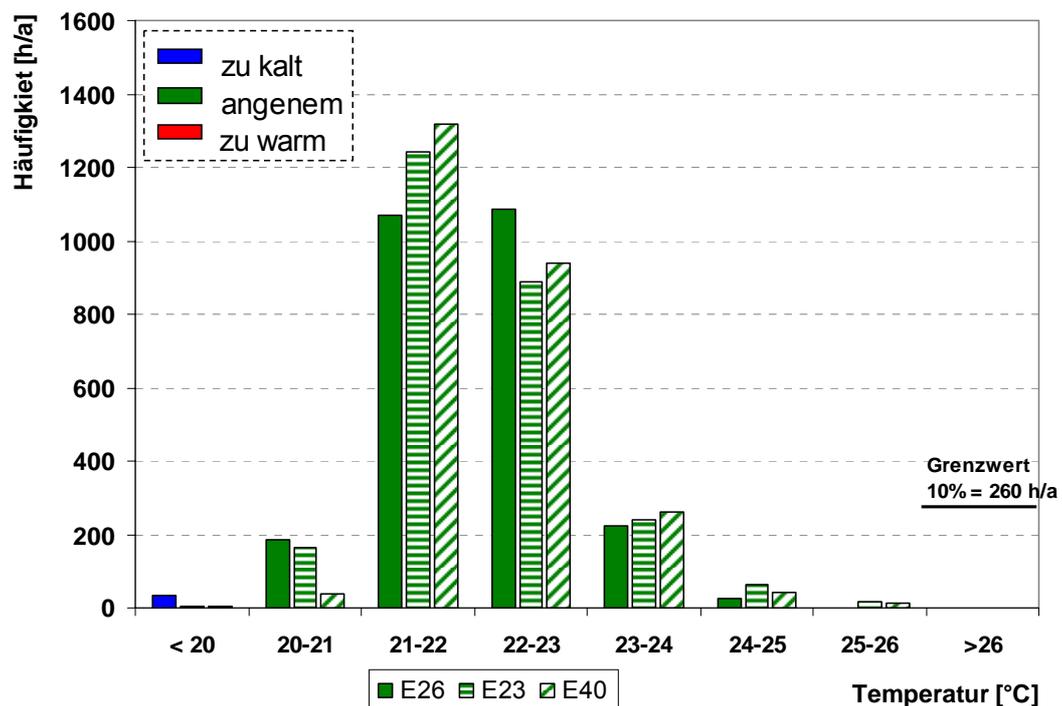
**Abbildung 92:** Grundriss EG mit eingezeichneten Räumen für Messung thermischer Komfort  
[Quelle: Anin Jeromin Fitilidis & Partner, Düsseldorf]

Abbildung 93 zeigt die für die jeweiligen Büroräume aufgezeichneten Raumtemperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur. Dabei liegen die Temperaturwerte fast alle innerhalb der nach DIN 1946 Teil 2 [14] empfohlenen Bereiche der operativen Raumtemperatur. Weder in den beiden Eckbüros noch im Mittelbüro werden für den Messzeitraum 2008 Überhitzungsstunden verzeichnet. Bei Außentemperaturen  $> 26^{\circ}\text{C}$  können über das vorliegende Raumkonzept immer noch Raumtemperaturen zwischen  $20$  bis  $25^{\circ}\text{C}$  gehalten werden.



**Abbildung 93:** Stunden der Raumlufttemperatur während der Bürozeiten im Vergleich zur DIN 1946-2, Gelsenwasser AG Gelsenkirchen, Messzeitraum 2008

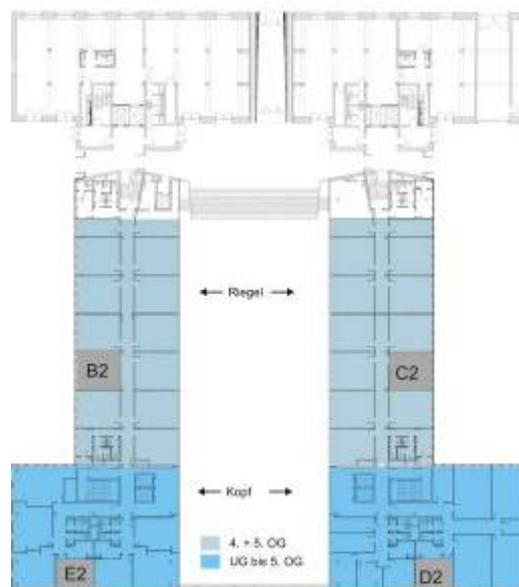
Raumtemperaturen unter 20°C treten selten auf und können über die betriebsbedingten Veränderungen bei der natürlichen Lüftung und Kühlung über die Fassadenklappen erklärt werden. Bei Überschreitung der Soll-Raumtemperaturen bei kalten Außentemperaturen werden die Fassadenklappen entsprechend zur natürlichen Kühlung der Büros aufgeföhren. Kurzzeitig kann es dann aufgrund der natürlichen Lüftung zu einer Unterschreitung des Raumtemperatursollwerts kommen. In den untersuchten Räumen werden keine Raumlufttemperaturen über 26°C gemessen, siehe Abbildung 94.



**Abbildung 94:** Stunden der Raumlufttemperatur während der Bürozeiten aufgeteilt auf Temperaturbereiche, Gelsenwasser AG Gelsenkirchen, Messzeitraum 2008

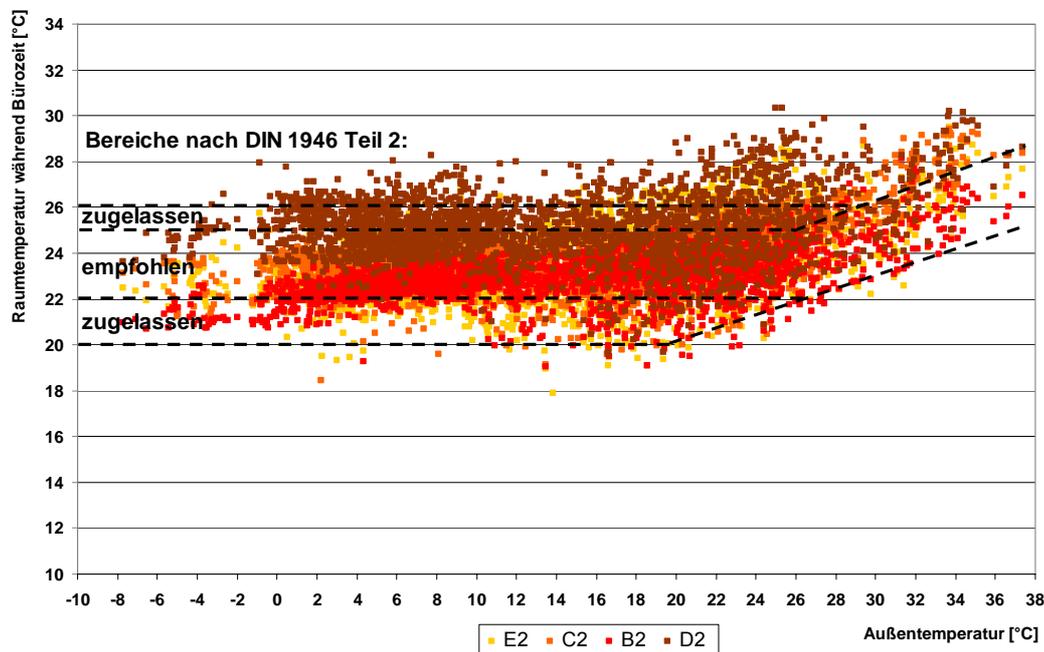
### Projekt 5 - EnergieForum Berlin (EFB)

Um den thermischen Komfort des Gebäudes zu bewerten, werden vier Büros untersucht. Diese befinden sich im 3. Obergeschoss jeweils in den Riegeln (B2, C2) und im Kopfbau (D2, E2) des EnergieForums, siehe Abbildung 95 grau markierte Bereiche. Im Neubau des EnergieForums wird im Kühlfall nur die Betonkernaktivierung in den Kopfbauten sowie im 4. und 5. OG im Riegel zur Kühlung freigegeben, alle anderen Büroräume verfügen im Kühlfall nur über eine natürliche Lüftung. Ein weiteres System zur Kühlung der Mietbereiche steht nicht zur Verfügung.



**Abbildung 95:** Grundriss 3.OG mit eingezeichneten Mietbereichen mit Kühlung über BKT  
[Quelle: BRT Architekten LLP, Hamburg]

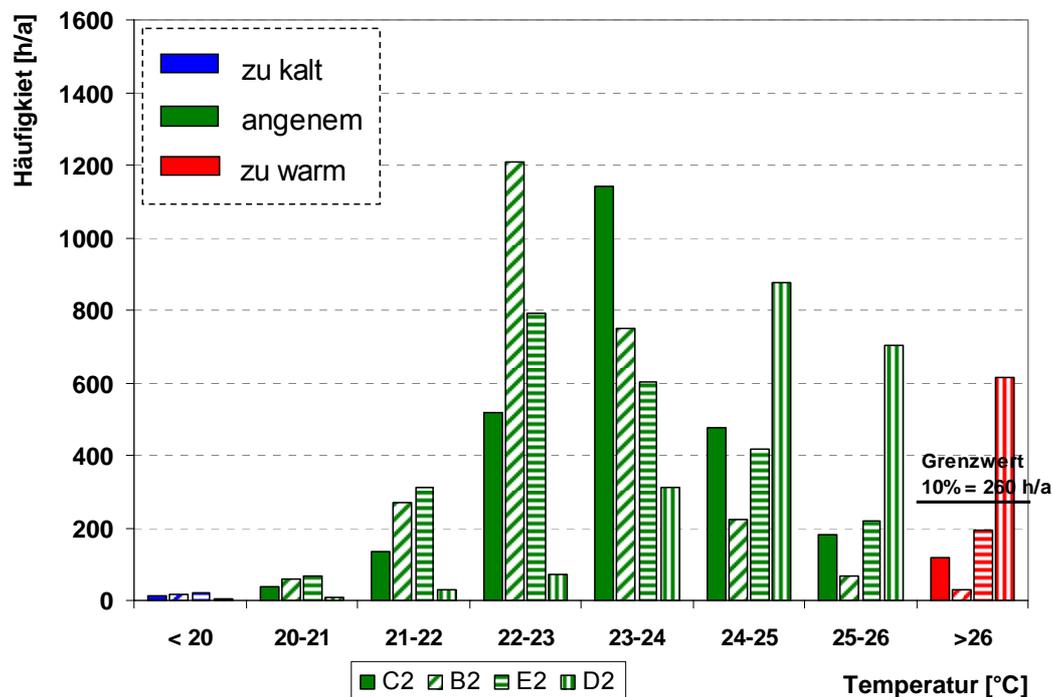
Abbildung 96 zeigt die für die jeweiligen Räume aufgezeichneten Raumtemperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur. Dabei liegen die Temperaturwerte für die Räume des Kopfbaus trotz BKT größtenteils außerhalb der nach DIN 1946 Teil 2 [14] empfohlenen Bereiche der operativen Raumtemperatur. Bei Raum D2 (Kopfbau) liegen generell die Raumtemperaturen bei Werten zwischen 23°C und 30°C, unabhängig von der Außentemperatur. Das hohe Temperaturniveau im Winter, wie im Sommer lässt sich auf große interne Lasten (hohe Belegungsdichte und Büroausstattung) zurückführen. Für den Büroraum E2 im Kopfbau werden bei einer Außentemperatur > 20°C Überschreitungen der Raumtemperaturen außerhalb des empfohlenen Bereichs analog zu Raum D2 festgestellt. Die Räume B2 und C2 (3.OG) in den Riegeln weisen ohne Betonkerntemperierung keine Besonderheiten bezüglich der operativen Raumtemperatur auf.



**Abbildung 96:** Stunden der Raumlufttemperatur während der Bürozeiten im Vergleich zur DIN 1946-2, EnergieForum Berlin, Messzeitraum 2008

Im Heizfall erfüllt die Kombination aus BKT, stat. Heizung und RLT-Anlage die Anforderungen an den thermischen Komfort. Durch eine hohe Belegungsdichte der Räume herrschen jedoch auch im Winter zum Teil in einigen Mietbereichen Raumtemperaturen über 26°C.

Die in den Sommermonaten entstehenden internen und durch den hohen Anteil an Verglasung auch externen Lasten können über die BKT und die natürliche Lüftung im Kopfbau nur bedingt abgeführt werden. In beiden untersuchten Räumen (D2, E2) wird der Grenzwert von 10% der Überhitzungsstunden von 260 h/a aber nur bei Büroraum D2 überschritten, siehe Abbildung 97. Anzumerken bleibt, dass das Nutzerverhalten bei den untersuchten Räumen im Kopfbau einen entscheidenden Einfluss besitzt.



**Abbildung 97:** Stunden der Raumlufttemperatur während der Bürozeiten aufgeteilt auf Temperaturbereiche, EnergieForum Berlin, Messzeitraum 2008

Im gesamten Neubau-Teil des Gebäudes werden im Messzeitraum 2008 in den gekühlten Mietbereichen (Kopfbau) im Durchschnitt 165 Überhitzungsstunden (Raumtemperaturen > 26°C) ermittelt. In den weniger stark thermisch belasteten Riegelbereichen werden trotz Wegfall der Kühlung nur durchschnittlich 77 Überhitzungsstunden festgestellt (Tabelle 24).

Für die hohe Anzahl an Überhitzungsstunden in den Kopfbauten werden folgende Ursachen festgestellt:

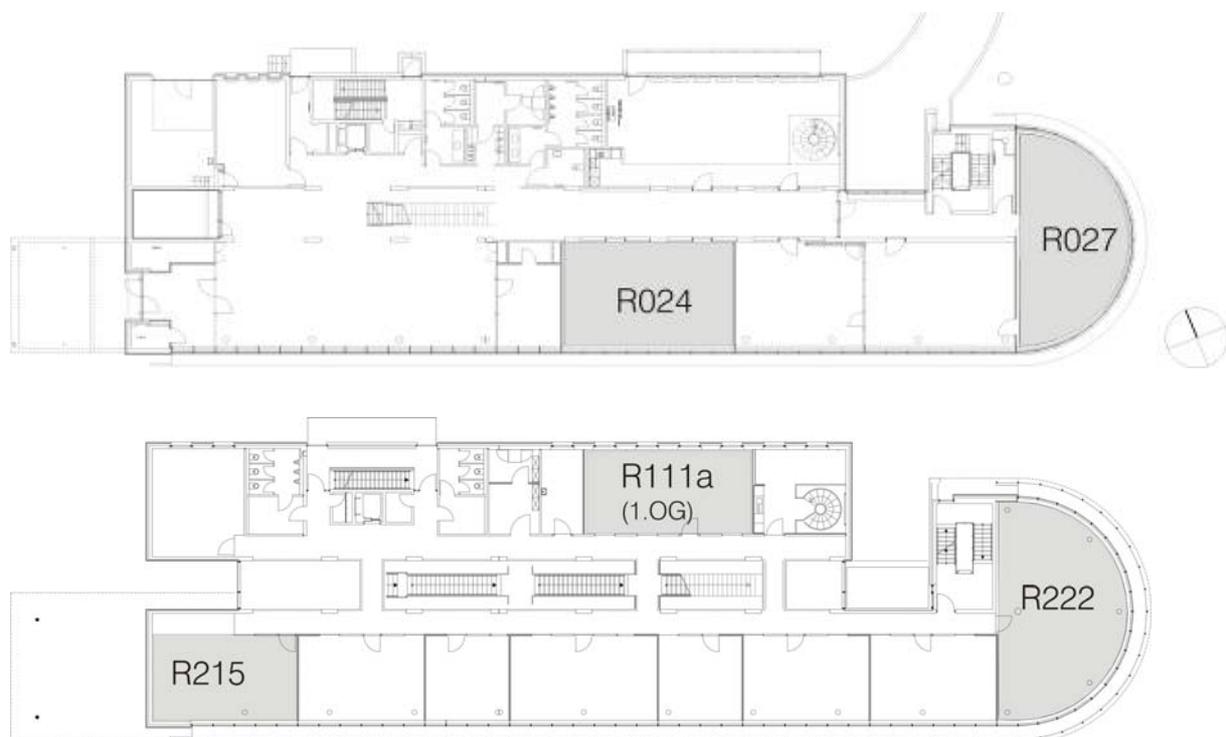
- ein zu geringer Volumenstrom im BKT-Kreislauf reduziert die erforderliche Kühlleistung.
- die vorhandene Austrittstemperatur aus dem Erdreich ist zu hoch, um eine entsprechende Vorlauf-Temperatur in der BKT zu erzielen.
- Nutzerverhalten und Belegung entsprechen nicht dem Planungs- und Energiekonzept.

**Tabelle 24:** Durchschnittliche Anzahl an Überhitzungsstunden (> 26°C) während der Bürozeit, Messzeitraum 2008

Überhitzungsstunden	Riegel A	Kopfbau A	Riegel B	Kopfbau B
Mittelwert	42 h	134 h	113 h	197 h
Maximalwert	128 h	329 h	353 h	613 h
Minimalwert	0 h	2 h	12 h	5 h

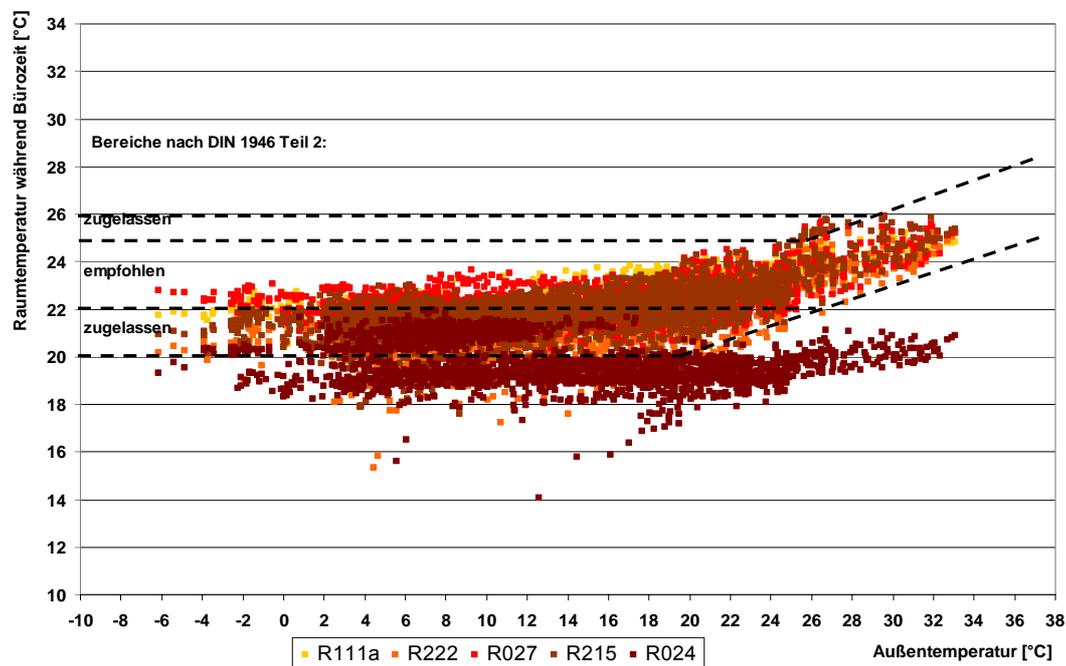
### Projekt 6 - VGH Regionaldirektion, Lüneburg (VGH)

Zur Ermittlung des thermischen Komforts werden verschiedene Bereiche untersucht. Die in Abbildung 98 dargestellten grauen Bereiche kennzeichnen die vermessenen Büros (R027, R111a, R215, R222) und den Besprechungsraum (R024). Alle Räumlichkeiten der VGH Lüneburg sind mit statischen Heizflächen (Heizkörper) und einer Betonkernaktivierung (BKT) ausgestattet. In den Büroräumen erfolgt ganzjährig eine natürliche Belüftung. Nur die Eingangshalle sowie die Besprechungsräume werden zusätzlich über eine mechanische Lüftungsanlage be- und entlüftet bzw. beheizt und gekühlt.



**Abbildung 98:** Grundriss EG (oben) und 1./ 2.OG (unten) mit eingezeichneten Räumen für Messung thermischer Komfort [Quelle: Architekten LSM, Hannover]

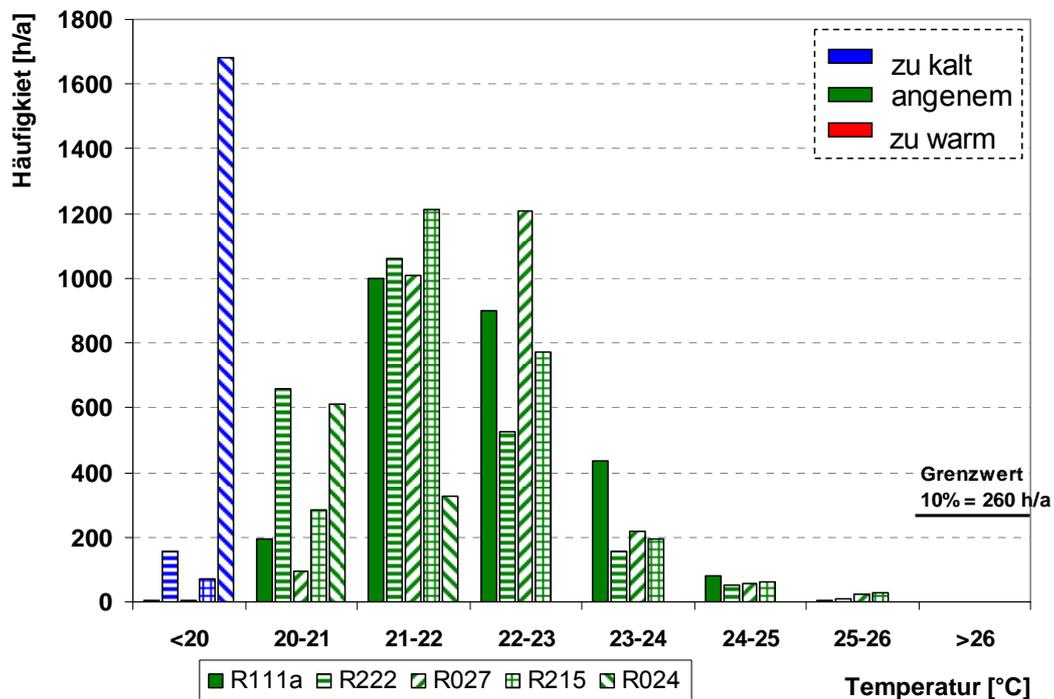
Abbildung 99 zeigt die für die jeweiligen Büroräume aufgezeichneten Raumlufttemperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur. Dabei liegen die Temperaturwerte alle innerhalb der nach DIN 1946 Teil 2 [14] empfohlenen Bereiche der operativen Raumtemperatur. Dagegen liegen im Besprechungsraum die Temperaturen – wie vom Nutzer gewünscht – im unteren bis kühlen Bereich bei 20°C unabhängig von der Außenlufttemperatur.



**Abbildung 99:** Stunden der Raumlufttemperatur während der Bürozeiten im Vergleich zur DIN 1946-2, VGH Regionaldirektion Lüneburg, Messzeitraum 2008

Den gestellten hohen Anforderungen an den thermischen Komfort wird das Gebäude der VGH in Lüneburg bezüglich der Büro- und Besprechungsräume gerecht. Hier liegen die Temperaturen ganzjährig im angenehmen Bereich mit leichter Tendenz zum kühlen Bereich.

Im gesamten Gebäude konnte keine Überhitzung (Raumtemperaturen  $> 26^{\circ}\text{C}$ ) festgestellt werden, siehe Abbildung 100.



**Abbildung 100:** Stunden der Raumlufttemperatur während der Bürozeiten aufgeteilt auf Temperaturbereiche, VGH Regionaldirektion Lüneburg, Messzeitraum 2008

### Projekt 10 - VW-Bibliothek, Berlin (TUB)

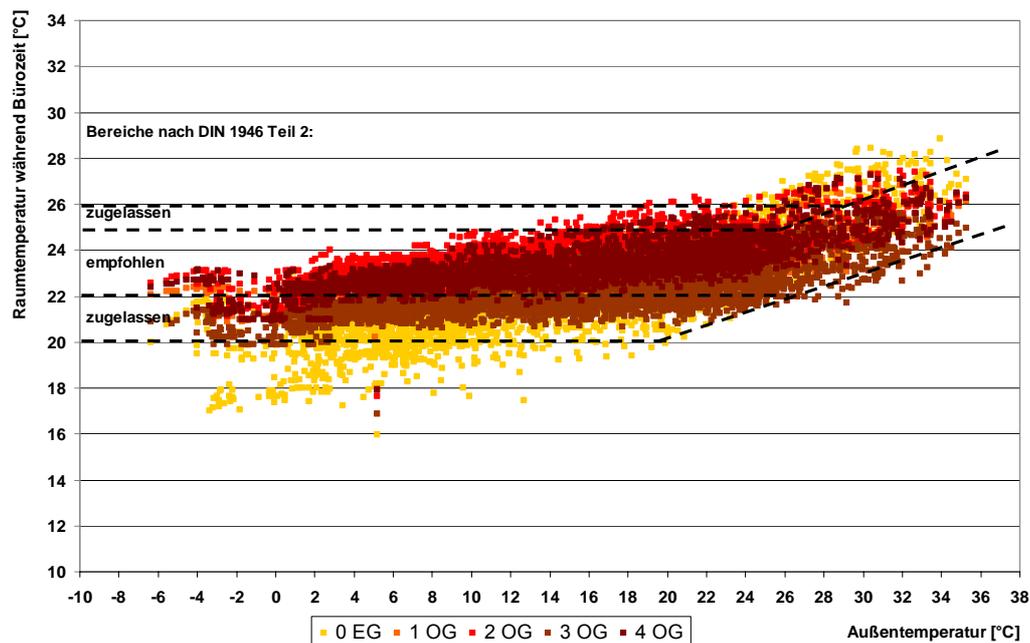
Um den thermischen Komfort des Gebäudes zu bewerten, werden zwei Büros und der Lesesaal je Geschoss untersucht. Abbildung 101 zeigt die Lage der Temperaturfühler der untersuchten Bereiche. Die Beheizung und Kühlung der Bürobereiche erfolgt über die Betonkernaktivierung (BKT) sowie zusätzlich im Winter über statische Heizflächen (Heizkörper). Gelüftet wird ausschließlich über die Fenster. Die Versorgung der Lesesäle erfolgt bei der VW-Bibliothek über eine Zuluftkonditionierung und der Betonkernaktivierung.



**Abbildung 101:** Grundriss 3.Obergeschoss mit eingezeichneten Räumen für Messung thermischer Komfort [Quelle: Architekturbüro Walter A. Noebel, Berlin]

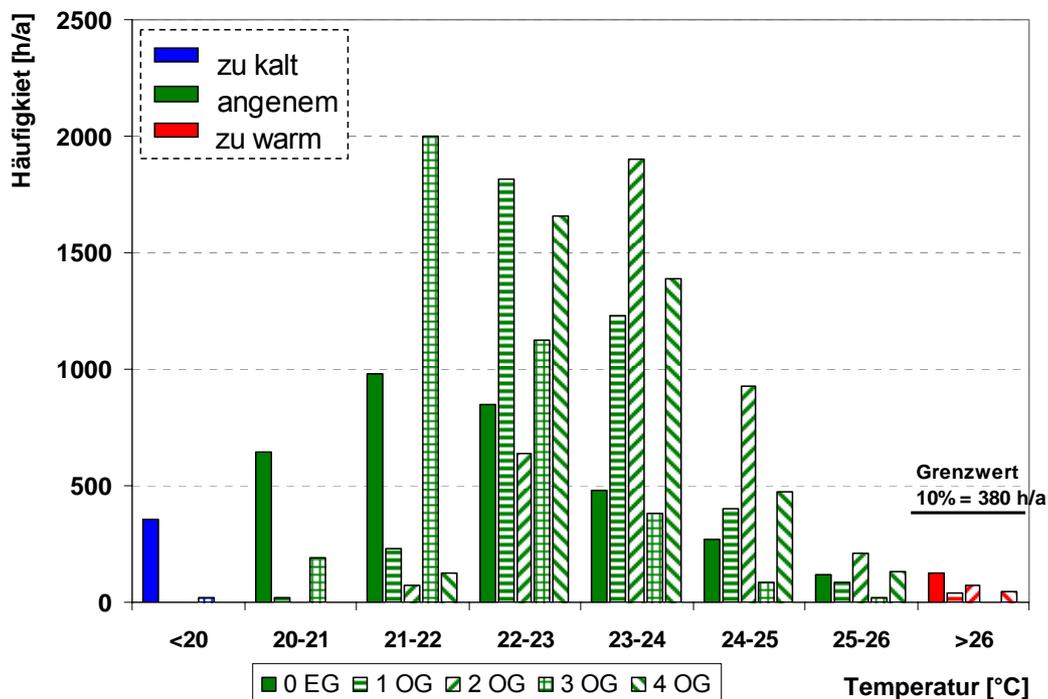
### Lesesaal (L)

Verglichen werden die gemessenen Raumlufftemperaturen in Abbildung 102 mit dem Behaglichkeitsbereich nach DIN 1946-2 für die operative Raumtemperatur. In der Heizperiode liegen die Raumlufftemperaturen mit Ausnahme des Erdgeschosses tendenziell zu hoch. Die Nutzung als Lesesaal einer Bibliothek kann als Begründung herangezogen werden. Im Sommer werden für die Lesesäle bei einer Außentemperatur  $> 26^{\circ}\text{C}$  Überschreitungen der Raumlufftemperaturen außerhalb des empfohlenen Bereichs festgestellt.



**Abbildung 102:** Stunden der Raumlufftemperatur Lesesaal während der Öffnungszeiten im Vergleich zur DIN 1946-2, VW Bibliothek Berlin, Messzeitraum 2008

Abweichend zu den Büroräumen liegt der Grenzwert von 10% bei den Lesesälen bei 380 h/a. Dies ergibt sich aus den Öffnungszeiten (Montag bis Freitag 9.00 – 22.00 Uhr, Samstag 10.00 – 18.00 Uhr). Somit ergeben sich 3.796 Nutzungsstunden pro Jahr. Je nach Geschoss liegt in den Lesesälen die Anzahl der Überhitzungsstunden innerhalb der Betriebszeit der Bibliothek zwischen 32 und 122 Stunden, siehe Abbildung 103. In den untersuchten Lesesälen liegt die Anzahl der Überhitzungsstunden bei lediglich 1 bis 3%.

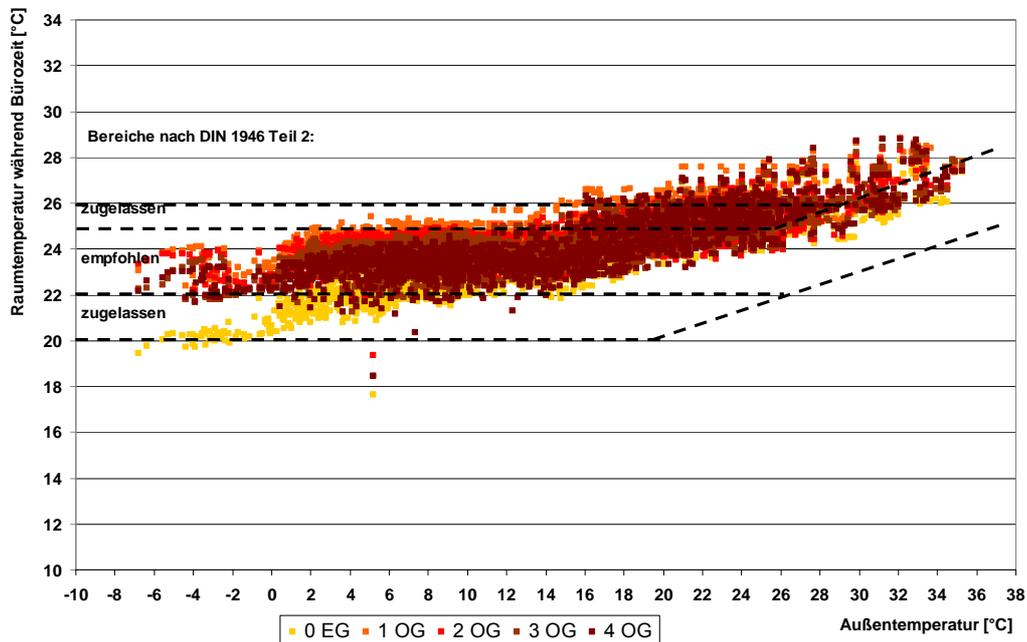


**Abbildung 103:** Stunden der Raumlufttemperatur im Lesesaal während der Öffnungszeiten aufgeteilt auf Temperaturbereiche, VW-Bibliothek Berlin, Messzeitraum 2008

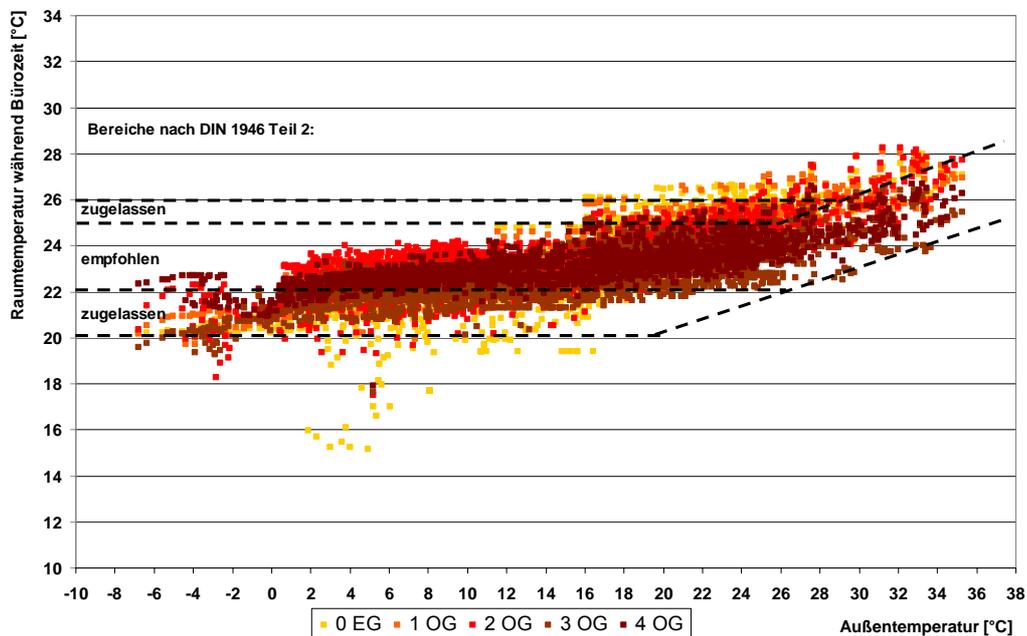
### Büro B1 und B2

Werden die Raumlufttemperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur betrachtet, so sind genau wie in den Lesesälen in den Büros die Raumlufttemperaturen während der Heizperiode eher zu hoch, siehe Abbildung 104 und Abbildung 105. Kurzzeitig kann es aber aufgrund der natürlichen Lüftung zu einer Unterschreitung des Raumtemperatursollwerts kommen, siehe Büro B2 im Erdgeschoss.

Im Sommer werden für die Bürobereiche B1 und B2 bei einer Außentemperatur > 26°C Überschreitungen der Raumtemperaturen außerhalb des empfohlenen Bereichs festgestellt.



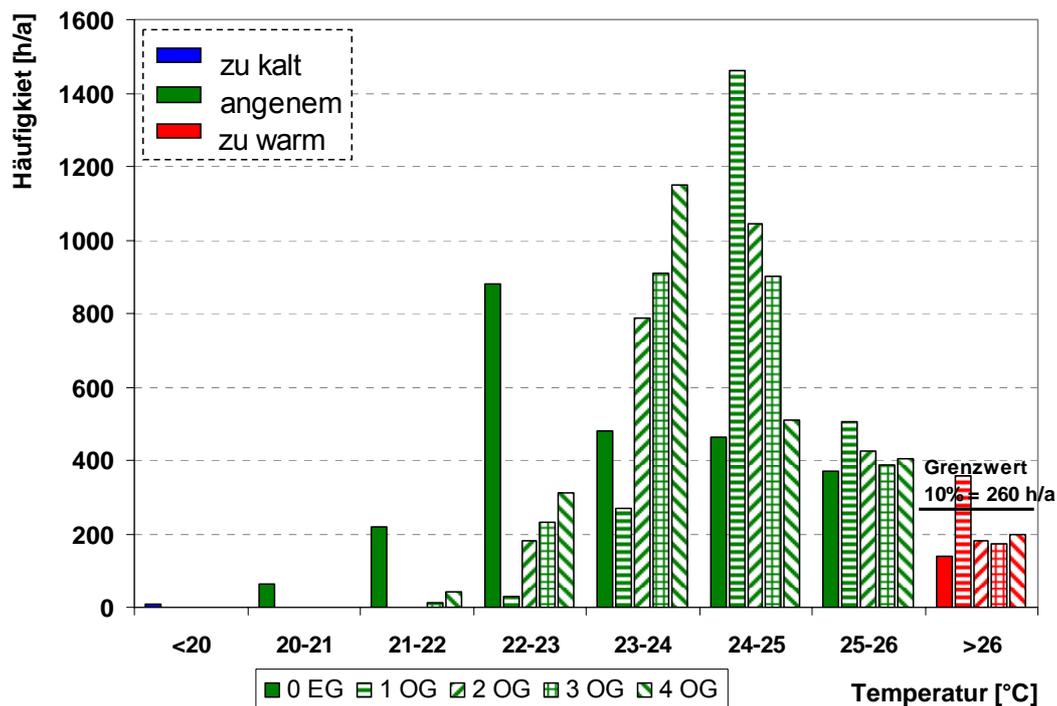
**Abbildung 104:** Stunden der Raumlufttemperatur in den Büroräumen B1 während der Bürozeiten im Vergleich zur DIN 1946-2, VW-Bibliothek Berlin, Messzeitraum 2008



**Abbildung 105:** Stunden der Raumlufttemperatur in den Büroräumen B2 während der Bürozeiten im Vergleich zur DIN 1946-2, VW-Bibliothek Berlin, Messzeitraum 2008

Im Heizfall erfüllt die Kombination aus BKT und statischer Heizung die Anforderungen an den thermischen Komfort. Raumtemperaturen unter 20°C treten selten auf. Die in den Sommermonaten entstehenden internen und externen Lasten können über die BKT und die natürliche Lüftung nur bedingt abgeführt werden. Neun der zehn untersuchten Räume halten die Kom-

fortkriterien ein. Lediglich ein Raum neigt aufgrund der Nutzung zu Überhitzung, siehe Abbildung 106 und Abbildung 107. Die benötigte Kühlenergie wird allerdings wie oben beschrieben über Kompressionskältemaschinen bereitgestellt, da der Bodenabsorber kein geeignetes Temperaturniveau zur Verfügung stellen kann. Insgesamt liegen die Überhitzungsstunden (Raumlufthemperaturen  $>26^{\circ}\text{C}$ ) zwischen 10 und 200 h/a, ein Raum fällt mit 356 h/a deutlich heraus.



**Abbildung 106:** Stunden der Raumlufthemperatur in den Büroräumen B1 während der Bürozeiten aufgeteilt auf Temperaturbereiche, VW-Bibliothek Berlin, Messzeitraum 2008

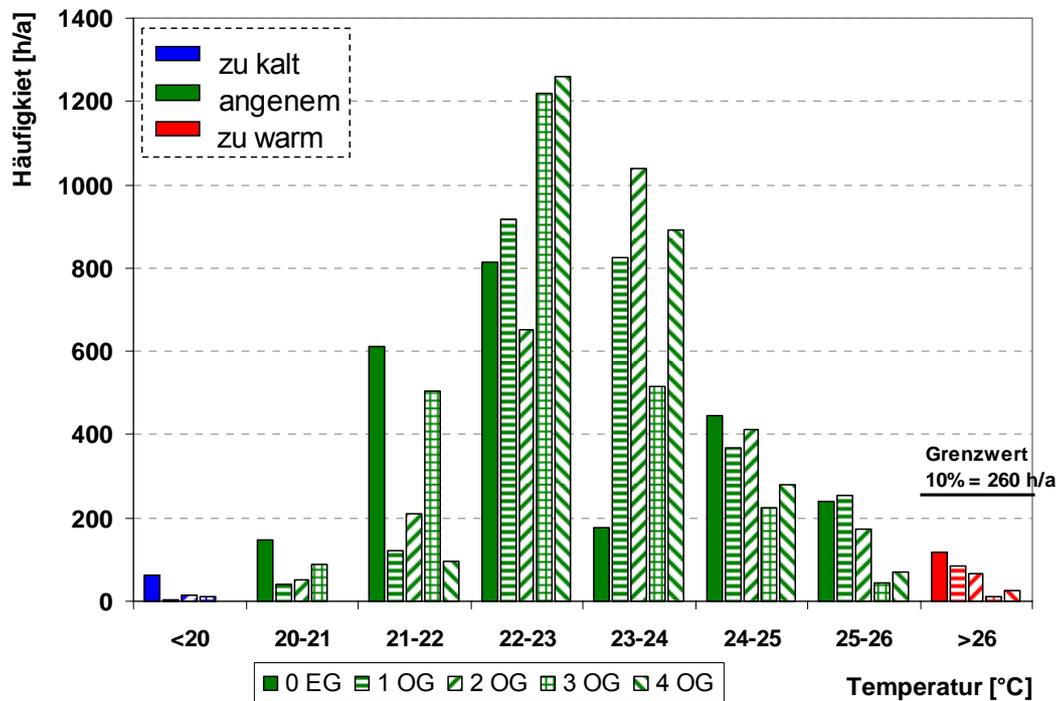


Abbildung 107:

Stunden der Raumlufttemperatur in den Büroräumen B2 während der Bürozeiten aufgeteilt auf Temperaturbereiche, VW-Bibliothek Berlin, Messzeitraum 2008



## 6. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Im Projekt WKSP werden 11 Bürogebäude hinsichtlich ihrer Erreichwärmeübertrager zur kombinierten Wärme- und / oder Kältespeicherung untersucht. Fünf Anlagen können in einem Monitoring von 2005 bis Ende 2009 vermessen, analysiert und optimiert werden. Nachfolgend werden die Erkenntnisse und Erfahrungen aus den einzelnen Gebäuden sowie aus dem gesamten Forschungsvorhaben zusammengefasst vorgestellt.

### 6.1. Resümee und Erkenntnisse aus der Evaluierung

Zahlreiche Innovationen haben die Möglichkeiten zur Gestaltung energieeffizienter Gebäude deutlich erweitert: Kompakte Blockheizkraftwerke, dezentrale außenwandintegrierte Lüftungsgeräte, thermoaktive Bauteilsysteme und geothermische Anlagen sind längst in der Baupraxis angekommen. Doch unklar bleibt, wie gut die neuen Komponenten und Systeme im Betrieb tatsächlich funktionieren. Daher soll innerhalb des Forschungsprojektes, der Nachweis erbracht werden, dass die Funktionsfähigkeit der Anlagen in der Praxis auch umsetzbar und der Erfolg sowie die weitere Entwicklung dieser energetisch und wirtschaftlich sinnvollen Technologie gegeben ist.

In der Praxis zeigt sich, dass durch fehlende Erfahrung und mangelnde Kommunikation zwischen Planern, ausführenden Firmen und Anlagenbetreibern, Fehler in der Auslegung, der Umsetzung und der Bedienung der Gesamtsysteme aus dem Zusammenspiel von Gebäude, Standort und Anlagentechnik auftreten können. Ein erfolgreicher Betrieb der Energiepfehl-, Erdwärmesonden- bzw. Bodenabsorberanlagen kann nur gewährleistet werden, wenn in der Planung, der Ausführung und im Betrieb die Ziele durch eine stetige Qualitätskontrolle permanent überprüft werden.

Die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen können infolge der Trägheit der erdreichgekoppelten Wärmespeicher nur langsam greifen und müssen fortlaufend kontrolliert werden. So zeigt der Projektverlauf, dass für die Betreuung der Monitoringgebäude und die Fortsetzung der Betriebsoptimierungen nach wie vor ein hoher zeitlicher Aufwand berücksichtigt werden muss, den es in Zukunft bei den Kosten für ein Gebäudemanagement zu kalkulieren gilt.

#### 6.1.1. Fehler und Mängel

Die Entwicklung eines Monitoringkonzepts auf Basis einer kontinuierlichen Aufzeichnung von GLT-Daten ist Voraussetzung für eine umfassende Betriebsanalyse und Bewertung der Effizienz. Um Gebäude und Anlagen sinnvoll bilanzieren und bewerten zu können, ist es notwendig, über die kaufmännisch relevante Messtechnik hinaus Wärmemengen- und Stromzählern einzusetzen.

In enger Zusammenarbeit mit dem Gebäudemanagement kann dann auf Grundlage der erfassten Betriebs- und Messdaten eine Analyse durchgeführt, Abweichungen vom Planungssoll dokumentiert und Ursachen für Betriebsfehler aufgedeckt werden.

Nicht nur Fehler oder Mängel im Erdwärmekreis und den daran gekoppelten Anlagen haben Auswirkungen auf den Betrieb des Erdwärmespeichers. Auch Fehler im Zusammenspiel mit den weiteren technischen Aggregaten und Komponenten wie Lüftungsanlagen, das Heiz- und Kühlsysteme können die Erreichtemperaturen beeinflussen. Diese Fehler können sich auf die möglichen und prognostizierten Eintrags- und Entzugsmengen auswirken. So kann z.B. durch ausbleibenden Entzug oder durch übermäßigen Eintrag ein Ungleichgewicht entstehen und die Leistungsfähigkeit des Speichers dauerhaft gefährden.

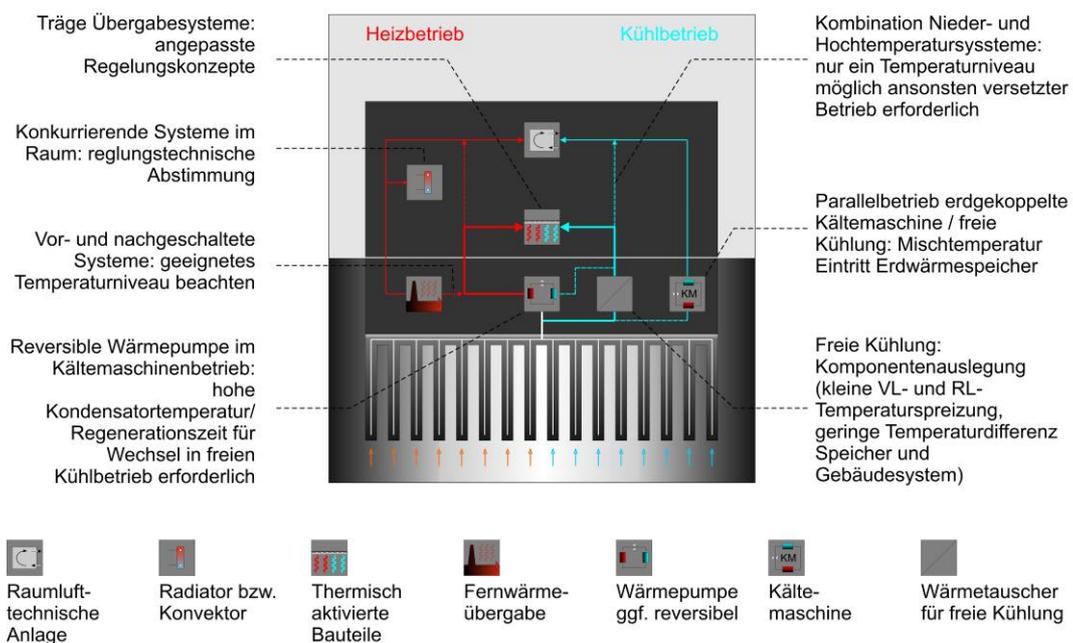
Häufig identifizierte Mängel sind:

- Fehlerhafte Hydraulik
- Mangelnde Kalibrierung von Temperatursensoren
- Gleichzeitiger Kühl- und Heizbetrieb
- Falsche Regelungsstrategien / Einstellungen
- Mangelhafte Betriebsüberwachung

Die Erfahrung aus der Evaluierung der umgesetzten Energiekonzepte in innovativen Gebäuden zeigt vor allem folgende Mängel auf. Ausgehend von zum Teil nicht vorhandenen bzw. mangelhaft definierten und damit nicht nachprüfbar Planvorgaben, ist im Rahmen des Bauprozesses bei einer Vielzahl der Bauten keine energetische Qualitätssicherung während der Planungs- und Bauphase erfolgt. Die oftmals vorhandene Gebäudeleittechnik wird als aktives Steuerungsinstrument in der Regel nicht genutzt. Das hierüber verfügbare Potential zur Erreichung eines auslegungsgemäßen Betriebes wird nicht abgerufen. Die Folge sind überhöhte Energieverbrauchswerte sowie entsprechend hohe Betriebskosten.

### 6.1.2. Grundregeln aus dem Monitoring

Für die erste Phase nach Inbetriebnahme ist eine intensiv betreute Einregulierung der komplexen technischen Anlagen zwingend notwendig. Durch die Abstimmung von Grund- und Spitzenlasten sollten die mit geringen Leistungsreserven ausgestatteten regenerativen Systeme in einen Regelbetrieb überführt werden, der den Anforderungen und Fähigkeiten entspricht. Aus der Evaluierung sind nachfolgend einige wesentliche bei Planung, Ausführung und Betrieb zu beachtende Punkte zusammengefasst. Zusätzlich sind in Abbildung 108 die Keymarks zum Gesamtsystem in Kurzfassung dargestellt.



**Abbildung 108:** Anforderungen an einen nachhaltig funktionsfähigen Betrieb von geschlossenen Erdwärmespeichern zum Heizen und Kühlen von Bürogebäuden

- Neben einer ordnungsgemäßen Inbetriebnahme sind Probeläufe zur Simulation des Heiz- und Kühlfalls aller Anlagenkomponenten und Systeme durchzuführen. Hier können die ersten Fehler festgestellt und rechtzeitig innerhalb der Gewährleistungsfrist beseitigt werden.
- Für die Sicherstellung eines dauerhaften Betriebs ist eine ausgeglichene saisonale Energiebilanz der Anlagen von großer Bedeutung. Die erste Anlageninbetriebnahme sollte in der Heizperiode liegen. Während der Heizperiode muss dem Erdreich genügend Wärme entzogen werden, um für den freien Kühlbetrieb im Sommer eine Wärmesenke mit ausreichend niedrigem Temperaturniveau gewährleisten zu können, so dass auch zum Ende des Sommers noch genügend Kühlleistung für den freien Kühlbetrieb zur Verfügung steht. Wird dem Erdreich während der Heizperiode zu wenig Wärme entzogen, ist der freie Kühlbetrieb im Sommer durch eine ungenügende Verfügbarkeit von Kühlleistung stark eingeschränkt.  
Im Praxisbetrieb zeigt sich, dass eine ausgeglichene Bilanz oft durch Fehler in der Bauausführung, dem Betrieb und gegenüber der Planung geänderten Rahmenbedingungen nur schwer zu erreichen ist.
- Aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen zwischen Erdwärmespeicher und Heiz- sowie Kühlsystem ist bei der Auslegung der Systemkomponenten darauf zu achten, dass die erforderlichen Betriebszustände auch erreicht werden können. Bei zu klein dimensionierten Plattenwärmetauschern oder zu hohen Volumenströmen wird die Temperaturspreizung so klein, dass das Wärme- bzw. Kältepotential des Erdreichs im Gebäude möglicherweise nicht genutzt werden kann. Gleiche Effekte, die das Gesamtsystem negativ beeinflussen, entstehen bei zu großen Rücklaufbeimischungen in hydraulischen Weichen und bei Pufferspeicherdurchmischungen.
- Wichtig für die Umsetzung und Einbindung von trägen Heiz- und Kühlsystemen wie der thermischen Bauteilaktivierung in Verbindung mit dem Erdreich ist die entsprechende Berücksichtigung der Übergangszeiten Frühling und Herbst in den Regelstrategien. Die Betriebsphasen in der Übergangszeit mit stärkeren Außentemperaturschwankungen stellen hohe Anforderungen an den Betrieb dieser Systeme. Während dieser Zeit führen fehlerhafte Regelstrategien häufig zu Problemen. Nicht selten kommt es vor, dass das Gebäude in der Nacht über die thermische Bauteilaktivierung beheizt wird und am Tag aufgrund der internen Lasten im Gebäude wieder heruntergekühlt werden muss. Die Folge sind Komforteinbußen sowie ein unnötiger Energieverbrauch. Vermeiden lässt sich das Problem mit Hilfe eines so genannten „Totbandes“ in Abhängigkeit von der mittleren Außentemperatur, bei dem weder geheizt noch gekühlt wird.
- Eine Kältemaschine mit Rückkühlung über das Erdreich ist bei einigen Bürogebäuden zusätzlich in die Systeme integriert (reversible Wärmepumpe). Zu berücksichtigen ist, dass der Kältemaschinenbetrieb an sich nicht so effizient wie der freie Kühlbetrieb über das Erdreich betrieben werden kann. Hinzu kommt, dass Systeme mit integrierten Kältemaschinen häufig zur Deckung von Lastspitzen ausgelegt werden. Über das Jahr gesehen sind die Auslastung und somit auch die Effizienz dieser Systeme daher in der Regel deutlich kleiner als bei Systemen, die lediglich der Grundlastdeckung dienen.  
Bei einer ins System integrierten Kältemaschine ist darauf zu achten, dass diese möglichst erst zum Ende der Kühlperiode zum Einsatz kommt, wenn das Kältepotential des freien Kühlbetriebs über das Erdreich weitestgehend erschöpft ist. Wird die Kältemaschine schon früher eingesetzt, so besteht durch die eingespeiste Wärmeenergie der Rückkühlung die Gefahr, dass die deutlich effizientere freie Kühlung für den Rest der

Saison nicht mehr genutzt werden kann. Das Erdreich schafft es möglicherweise nicht, das deutlich höhere Temperaturniveau aus dem Rückkühlkreis der Kältemaschine bis zur nächsten Kälteanforderung auf das für die freie Kühlung erforderliche Temperaturniveau herunter zu kühlen.

- Neben der Tatsache, dass in Bürogebäuden der Kältebedarf in der Regel deutlich größer ist als der Wärmebedarf, hat sich in der Praxis die Kombination von trägen Heizsystemen wie der thermischen Bauteilaktivierung mit deutlich flinkeren Heizsystemen wie der statischen Heizung als problematisch herausgestellt. In der Regel wird die thermische Bauteilaktivierung über die Erdwärme versorgt und zur Grundlastdeckung herangezogen. Zur Abdeckung von Spitzenlasten wird diese mit flinken Systemen wie Radiatoren oder Konvektoren kombiniert. Da das flinke System deutlich schneller auf Temperaturänderungen reagiert, besteht die Gefahr, dass Leistungsfähigkeit der trägen Bauteilaktivierung nur selten ausgeschöpft wird. Dem Erdreich wird dann deutlich weniger Wärme entzogen als erforderlich und in der Planung angenommen. Um das außer Kraft setzen der trägen Betonkerntemperierung durch flinkere Systeme zu vermeiden, müssen die Regelstrategien der Systeme optimal aufeinander abgestimmt werden.

Zur Gewährleistung des auslegungsgemäßen Betriebs der Bauteilaktivierung in der Grundlast und zur Vermeidung der Übersteuerung des Systems durch flinkere Systeme sind entsprechende Regelstrategien umzusetzen.

Um Probleme wie oben genannt zu vermeiden, sollten Regelstrategien mit größter Sorgfalt geprüft und das Gebäude bis zum Erreichen des Regelbetriebs – üblicher Weise rund zwei Jahre – messtechnisch durch das Gebäudemanagement, Planer oder externen Dienstleistern (z.B. Universität oder Fachhochschule) begleitet werden.

## 6.2. Ausblick

Neben den innerhalb der Projektlaufzeit erstellten Konzeptstudien und umgesetzten geothermischen Anlagen, konnten weitere Bauvorhaben mit geothermischen Anlagen und deren Monitoring angestoßen werden. Es zeigt sich, dass energieeffiziente Konzepte in der Praxis funktionieren können. Die Qualitätssicherung in der Planung, Realisierung und im Betrieb ist allerdings entscheidend für die effiziente Funktion.

Die Betriebsoptimierung von Gebäude und Anlagentechnik durch ein begleitendes Monitoring wurde im Rahmen verschiedener geförderter Projekte als sinnvolle Maßnahme zur Reduzierung von Energieverbrauch und Emissionen sowie zur Gewährleistung des Nutzerkomforts erkannt.

Für zukünftige Konzepte bzw. Projekte sollte in erster Linie der Energiebedarf zum Heizen und Kühlen durch bauliche Maßnahmen auf ein Mindestmaß reduziert werden. Der verbleibende zu deckende Energiebedarf ist durch einen möglichst hohen Anteil regenerativer Energieträger umzusetzen. Die Minimierung von Investitions- und Betriebskosten sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Gewährleistung des Nutzerkomforts in den Gebäuden sind die wesentlichen Kriterien der Konzeptentwicklung. Entscheidend für das Gelingen solcher Projekte sind eindeutig definierte und durchgängig dokumentierte Planungsziele.

Daher ist es wichtig, dass wie im Rahmen von EnBop – Energetische Betriebsoptimierung entsprechende Vorhaben öffentlich gefördert werden.



## 7. ANHANG

### 7.1. Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Projekts wurden entsprechend dem Bearbeitungsfortschritt bereits veröffentlicht.

#### Erfolgte Veröffentlichungen / Präsentationen

##### 2006

- 17.05. – 18.05.2006      Forschungskreis Solarenergie: 6. FKS-Symposium, Braunschweig  
Vortrag „WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude“, Tagungsband
- 31.05. – 02.06.2006      IEA ECES: EcoStock 2006, New Jersey USA  
Vortrag „Thermal Energy Storage in Office Building Foundations“, Tagungsband
- 09.10. – 11.10.2006      IBPSA: BAUSIM 2006, München  
Vortrag „WPR – Wetterprognosen-Geführte Regelung thermisch aktivierter Decken“, Tagungsband
- 24.07. – 28.07.2006      TU Darmstadt: Geothermal Summer School 2006, Darmstadt  
Übung Themenbereich:  
Wärmebedarf und Anlagentechnik oberflächennaher geothermischer Anlagen zum Heizen und Kühlen
- Ausgabe Oktober - Dezember 2006      XIA – Intelligente Architektur  
Artikel „Auf dem Prüfstand VIII“ – Projekt WKSP
- 02.11. – 03.11.2006      PTJ: Statusseminar – Thermische Energiespeicherung, Freiburg  
Vortrag „Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude“, Tagungsband

##### 2007

- 01.02.2007      IGS: Expertenworkshop – Bürogebäude auf dem Prüfstand, Frankfurt am Main  
Vortrag „WKSP - Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude“
- 26.04. – 27.04.2007      OTTI: 7. Anwenderforum – Oberflächennahe Geothermie Freising;  
Vortrag „Thermische Nutzung von Gründungsbauwerken zum Heizen und Kühlen von Bürogebäuden“, Tagungsband
- Ausgabe Juli-September 2007      XIA – Intelligente Architektur  
Artikel „Auf dem Prüfstand X“ – Verwaltungsgebäude GEL-SENWASSER AG, Gelsenkirchen



## **2008**

- Seit Mai 2008 [www.enob.info/de/forschungsfelder/enbop](http://www.enob.info/de/forschungsfelder/enbop)  
Internetbeitrag VW-Bibliothek
- 26.05. - 28.05.2008 OTTI: 8. Anwenderforum – Oberflächennahe Geothermie  
Kloster Banz, Bad Staffelstein;  
Vortrag „Thermische Nutzung von Gründungsbauwerken zum Heizen und Kühlen von Bürogebäuden“; Tagungsband
- Ausgabe 2/2008 Ennovatis – Energie Nachrichten  
Artikel (Interview) „Wie effizient sind Energiekonzepte wirklich“  
- VW-Bibliothek Berlin
- Ausgabe 2/2008 Erneuerbare Energien  
Artikel „Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich von Bürogebäuden“
- 20.10. -21.10.2008 IGS: ICEBO, Berlin  
Vortrag „Storage of heating- and cooling energy in Foundations of Energy Efficient Buildings (WKSP) - A project within the new German R&D-framework *EnBop*“;  
Tagungsband

## **2009**

- 03.03.2009 PTJ: Nationaler ECES-Workshop, Bonn  
Vortrag „WKSP - Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude“
- 27.04. - 29.04.2009 OTTI: 9. Anwenderforum – Oberflächennahe Geothermie  
Kloster Banz, Bad Staffelstein;  
Vortrag „Evaluierung und Betriebsoptimierung von Systemen zur saisonalen Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich von Bürogebäuden“; Tagungsband
- 14.06. – 17.06.2009 IEA ECES: Effstock 2009, Stockholm Schweden  
Vortrag „Evaluation and optimization of UTES systems of Energy Efficient office Buildings (WKSP)“, Tagungsband
- 30.06. – 02.07.2009 PTJ: EnOB-Statusseminar FuE 2009, Würzburg  
Vortrag und Poster „Evaluierung und Betriebsoptimierung von Systemen zur saisonalen Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich von Bürogebäuden“; Tagungsband
- 02.11. – 03.11.2009 EnergieKongress Ruhr, Essen  
Vortrag „Hauptverwaltung GELSENWASSER AG: Heizen und Kühlen mit Erdwärme“; Tagungsband
- 13.11. – 14.11.2009 proKlima und energie + umwelt zentrum: EffizienzTagung Bauen und Modernisieren, Hannover  
Vortrag „Evaluierung und Betriebsoptimierung von Systemen zur saisonalen Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich von Bürogebäuden“, Tagungsband



- 25.11.- 26.11.2009      Eurosolar und WCRE: 4. IRES 2009, Berlin  
Vortrag „WKSP - Investigation of Underground Thermal  
Energy Storage Systems (UTES)“; Tagungsband
- Ausgabe Oktober - Dezem-      XIA – Intelligente Architektur  
ber 2009      „Auf dem Prüfstand XVI“ – Verwaltungsgebäude VGH-  
Regionaldirektion Lüneburg
- 2010**
- 05.03.2010      13. Fachtagung Gebäude energetisch optimieren,  
Eckernförde  
Vortrag „Thermische Speicherung in der Gebäudegründung -  
Evaluierung von realisierten geothermischen Anlagen in Bü-  
rogebäuden“; Tagungsband
- 06.05. - 09.05.2010      OTTI: 10. Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie  
Linz, Österreich  
Vortrag „Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich  
energieeffizienter Bürogebäude  
- Evaluierung, Optimierung, Anlagensimulation“; Tagungsband
- 27.05. – 28.05.2010      GIZeF: Innovationsforum – Thermische Energiespeicherung,  
Freiberg  
Vortrag „Oberflächennahe Erdwärme und Kältespeicherung -  
Evaluierung von realisierten geothermischen Anlagen in Bü-  
rogebäuden“; Tagungsband
- Seit Juni 2010      [www.enob.info/de/forschungsfelder/enbop](http://www.enob.info/de/forschungsfelder/enbop)  
Internetbeitrag EnergieForum Berlin

## 7.2. Begriffe und Abkürzungen

Es werden Festlegungen und Erläuterungen für im Projekt verwendete Fachbegriffe dargestellt, um eine einheitliche Nomenklatur zu gewährleisten.

### Energie

Primärenergie:	Energie von Energieträgern, die noch keiner Umwandlung unterworfen wurden (Anfang der Prozesskette).
Primärenergiefaktoren:	Empirisch ermittelte Kennwerte für die Umrechnung von (gemessenen) Endenergiemengen in Primärenergimengen.
Endenergie:	Energie nach der Gewinnung, Aufbereitung und Umwandlung von Primärenergieträgern, z.B. Erdgas, elektrische Energie und Fernwärme.
Nutzenergie:	Energie, die am Ende einer Umwandlungskette dem Verbraucher für unterschiedliche Anwendungen zur Verfügung steht (z.B. Licht, Wärme oder mechanische Energie).
Endenergiebedarf:	Energie nach der Gewinnung, Aufbereitung und Umwandlung von Primärenergieträgern, z.B. Erdgas, elektrische Energie und Fernwärme. Mit „Energiebedarf“ werden Energie- bzw. Stoffmengen bezeichnet, die zur Erreichung von Sollwerten notwendig sind (z.B. nach rechnerischer Ermittlung entsprechend der Wärmeschutzverordnung). Der Bedarf ist immer ein Rechenwert, kein Messwert.
Endenergieverbrauch:	Mit „Verbrauch“ werden Energie- bzw. Stoffmengen bezeichnet, die im Betrachtungszeitraum tatsächlich umgewandelt wurden, z.B. die vom Energieversorger gelieferten Gas- oder Strommengen (Messwerte).

Energiekennwerte sind in diesem Bericht grundsätzlich hinsichtlich der beschriebenen Energiemenge und der Bezugsfläche indiziert, z.B.  $100 \text{ kWh}_{PE}/(\text{m}^2_{NGFA})$ .

### Flächen und Volumen

Im Projekt werden die Begriffe der DIN 277 und einige abgeleitete Flächen verwendet. Als Bezugsgrößen der Kennwerte für Energie und Kosten werden vorwiegend folgende Größen verwendet:

BRI:	„Der Brutto-Rauminhalt ist der Rauminhalt des Baukörpers, der nach unten von der Unterfläche der konstruktiven Bauwerkssohle und im übrigen von den äußeren Begrenzungsflächen des Bauwerks umschlossen wird.“
Ve:	Ve bezeichnet das beheizte Gebäudevolumen, das nach den Vorgaben und Regeln der EnEV ermittelt wurde.
$A_N$ :	$A_N$ bezeichnet die normierte Gebäudenutzfläche, die nach den Vorgaben und Regeln der EnEV rechnerisch ermittelt wurde.
BGF:	„Die Brutto-Grundfläche ist die Summe der Grundflächen aller Grundrissebenen eines Bauwerkes.“



NGF: „Die Netto-Grundfläche ist die Summe der nutzbaren, zwischen den aufgehenden Bauteilen befindlichen Grundflächen aller Grundrissebenen eines Bauwerkes“.

### **Gebäude**

Im Projekt werden verschiedene Abkürzungen für die Gebäude verwendet:

AOC	Accent Office Center, Frankfurt
AOK	AOK, Osnabrück
EFB	EnergieForum Berlin
GEW	Hauptverwaltung Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen
KAI	KAI13, Düsseldorf
BIH	Nord-LB, Hannover
NRH	Neues Regionshaus, Hannover
RIC	Gebäude RIC, Hamburg
TUB	VW-Bibliothek, Berlin
URO	Unibibliothek Rostock
VGH	VGH Regionaldirektion, Lüneburg

### **Weitere im Projekt verwendete Abkürzungen**

BKT	Betonkernaktivierung, Betonkerntemperierung
FK	Freie Kühlung über das Erdreich
KM	Kältemaschine
KMZ	Kältemengenzähler
RL	Rücklauf
RLT	Raumluftechnik
UP	Umwälzpumpe
VL	Vorlauf
WMZ	Wärmemengenzähler
WP	Wärmepumpe

### 7.3. Quellen und Literatur zum Projekt

- [01] Rodatz: Grundbau, Bodenmechanik, unterirdisches Bauen, Vorlesungsumdruck; Inst. für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, 1995
- [02] Hellmann, H.-M.: Grundlagen und Ausführungsbeispiele für geothermische Temperierung von Verwaltungsgebäuden; Zent-Frenger, Gesellschaft für Gebäudetechnik mbH, Heppenheim 2004
- [03] Brandl, H., Adam, D. und Kopf, F.: Geothermische Energienutzung mittels Pfählen, Schlitzwänden und Stützbauwerken; Pfahlsymposium, Fachseminar Feb. 1999, Inst. für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, 1999
- [04] Sanner, B. und Hellström, G.: Earth Energy Designer, eine Software zur Berechnung Erdwärmesondenanlagen; Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung, Konstanz, 1996
- [05] Klein, S., Beckmann, B. und Duffie, J.: TRNSYS, A Transient System Simulation Program; Program Manual, Version 15, Solar Laboratory, Madison, WIS, USA, Februar 2002
- [06] Pahud<sup>1</sup>, D., Hellström<sup>2</sup>, G. und Mazzarella<sup>3</sup>, L.: Duct Ground Heat Storage Model for TRNSYS (TRNVDST) Type 557; User Manual,  
<sup>1</sup>LASEN - Laboratory of Energy Systems, DGC – Department of Civil Engineering, EPFL – Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Switzerland,  
<sup>2</sup>Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden,  
<sup>3</sup>Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Deutschland
- [07] Wetter<sup>1</sup>, M. und Huber<sup>2</sup>, A.: TRNSYS Type 251 Vertical Borehole Heat Exchanger – EWS Model Vers. 2.4, Model Description and implementing into TRNSYS;  
<sup>1</sup>Zentralschweizerisches Technikum Luzern, Ingenieurschule HTL, Luzern,  
<sup>2</sup>Huber Energietechnik, Ingenieur- und Planungsbüro SIA, Zürich 1997
- [08] Pahud, D.: PILESIM – LASEN Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Heat Exchanger Piles or Borehole Heat Exchangers, Usermanual; LASEN - Laboratory of Energy Systems, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, 1999
- [09] Pahud<sup>1</sup>, D., Kohl, T., Megel<sup>2</sup>, T., Brenni, R.: Langzeiteffekt von Mehrfach-Erdwärmesonden; Schlussbericht 03/2002;  
<sup>1</sup>Laboratoria di energia, ecologica ed economia; Canobbio, CH,  
<sup>2</sup>GeoEnergie c/o GeoWatt, Zürich, <sup>3</sup>Institut für Geophysik, ETH Zürich
- [10] VDI 3807-1:2007-3, Teil 1: „Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude“, März 2007
- [11] DIN 4701, Teil 10, „Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen“ Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Ausgabe:2003-08



- [12] Großklos, Marc: Bericht „Kumulierter Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und –versorgungen“, Institut für Wohnen und Umwelt, Annastrasse 15, D-64285 Darmstadt, [www.iwu.de](http://www.iwu.de)
- [13] “Energie in Deutschland”, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2009
- [14] DIN 1946-2: Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI Lüftungsregeln), Januar 1994
- [15] DIN EN 7726: Umgebungsklima - Instrumente zur Messung physikalischer Größen, April 2002
- [16] DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Ausgabe:2003-07
- [17] Verein Deutscher Ingenieure (VDI); VDI-Richtlinie 4640 Teil 1-4, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000



#### 7.4. Steckbriefe der untersuchten Gebäude

Siehe separaten Teil „Steckbriefe der Gebäude“