

Verbundprojekt Energie Optimiertes Bauen (EnOB)
Thematischer Verbund LowEx

LowEx:Monitor – Heizen und Kühlen mit Geothermie

Förderkennzeichen 0327466B

Autoren: Jens Pfafferott, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE
Sebastian Herkel, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE
Doreen Kalz, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE
Florian Schmid, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

Ansprechpartner PTJ: Dipl.-Ing. Jürgen Gehrmann, Dipl.-Ing. Rolf Stricker

Beginn der Förderung: 01.01.2009

Ende der Förderung: 31.12.2011

41. Ausgabe, August 2010

LowEx:Monitor - Heizen und Kühlen mit Geothermie

Dr. Jens Pfafferott, Martin Fischer, Sebastian Herkel, Doreen Kalz, Florian Schmid
Fraunhofer ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg
jens.pfafferott@ise.fraunhofer.de

1 Projektstruktur

Das Projekt *LowEx:Monitor* "Exergetisches Monitoring für Gebäude mit Erdwärmenutzung" gliedert sich ein in das Verbundvorhaben *LowEx – Heizen und Kühlen mit Niedrig-Exergie*.

Das Projekt fokussiert auf die messtechnische Analyse von Gebäuden mit Erdwärmenutzung und liefert damit einen Beitrag zur Systemintegration von so genannten LowEx-Komponenten im Bereich der Gebäude (z.B. TABS) und der erdgekoppelten Systeme (z.B. Erdsonden).

Das auf drei Jahre angelegte Forschungsprojekt *LowEx:Monitor* verfolgt vier FuE-Schwerpunkte:

- (i) Optimierung der Energieeffizienz von LowEx-Systemen
- (ii) neue Regelalgorithmen
- (iii) Qualitätssicherungsverfahren / nachträgliche Betriebsoptimierung
- (iv) Gesamtsystemsimulation

Die konkreten Ziele des Forschungsvorhabens lassen sich diesen Themen zuordnen:

- Optimierung der Systemintegration erdgekoppeltes System – Gebäude, so dass eine Jahresarbeitszahl von 10 erreicht wird.
- Neue Regel- und Steueralgorithmen, die eine verbesserte Ausnutzung von Umweltenergie ermöglichen. Dabei sind insbesondere die tägliche Bedarfsentwicklung, die Ausnutzung von Speichereffekten im Gebäude sowie die Verfügbarkeit und Reaktion der Wärmequelle-/senke zu berücksichtigen.
- Bereitstellung eines umfassenden Qualitätssicherungsverfahrens, um die energetische, exergetische und thermische Leistungsfähigkeit der LowEx-Systeme in realen Projekten tatsächlich ausschöpfen zu können.
- Bereitstellung einer Simulationsbibliothek für *MODELICA*, um zukünftig in der Planung das Gesamtsystem "Gebäude – Versorgungstechnik – Nutzung – Regelung" in einem geschlossenen Simulationsmodell abbilden und damit die Interaktion der einzelnen Einflussgrößen bewerten zu können.

Das Projekt *LowEx:Monitor* hat eine Laufzeit vom 1.1.2009 bis 31.12.2011, wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0327466B gefördert und wird durch das Fraunhofer ISE gemeinsam mit den Partnern ITG Dresden, Hochschule Biberach, Drees&Sommer Advanced Building Technologies (Stuttgart), UNMÜSSIG (Freiburg) und Zent-Frenger (Heppenheim) sowie der RWTH Aachen (Komponentenbibliothek für *MODELICA*) im Rahmen eines Verbundvorhabens bearbeitet.

2 Arbeitsschwerpunkte

Der Fokus des Projekts liegt auf Messkampagnen und deren Auswertung. Aus diesen Monitoring-Projekten bzw. deren modellbasierter Auswertung werden 4 Arbeitsschwerpunkte abgeleitet. Eine besondere Rolle spielt dabei die Gesamtsystemsimulation, weil die Komponenten „Quelle“ und „Senke“ stark miteinander gekoppelt sind und durch das Gebäude bzw. dessen Nutzung stark beeinflusst werden.

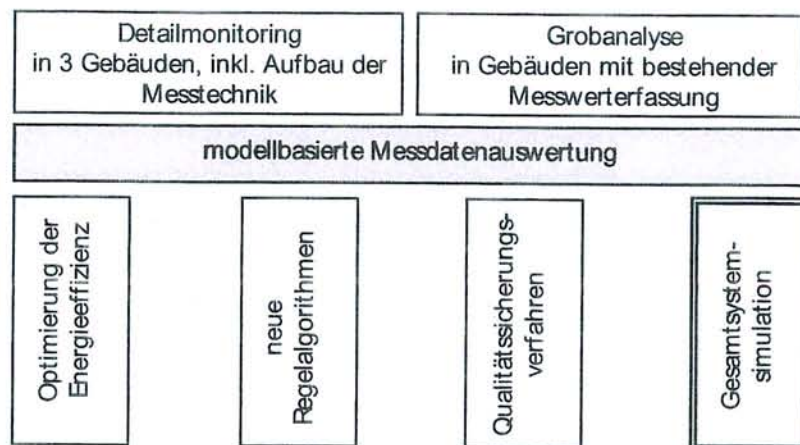


Abbildung 1: Projektstruktur und Arbeitsschwerpunkte in *LowEx:Monitor*

2.1 Optimierung der Energieeffizienz von LowEx-Systemen

Herausforderung: Systemabstimmung und effiziente Betriebsführung aller Teilkomponenten von erdgekoppelten Heiz- und Kühlsystemen sowie kritische Betrachtung der aufgewandten Hilfsenergien.

Wassergeführte Systeme zum Heizen und Kühlen mit Umweltwärme zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Natürliche Wärmesenken und -quellen stellen nur kleine Temperaturdifferenzen für die Wärmeübergabe an den Raum zur Verfügung.
- Da Kälte nicht (oder nur selten) aktiv erzeugt werden muss bzw. Wärme (auf einem niedrigen Temperaturniveau) über eine Wärmepumpe bereitgestellt werden kann, bringen diese Systeme die Qualität mit, einen geringen Energiebedarf für die Kühlung und Heizung zu erreichen. Vorausgesetzt, die Kälte- bzw. Wärmeverteilung ist mit geringem Hilfsenergieeinsatz verbunden. Dabei ist zu beachten, dass bei gleicher Leistung aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen der Volumenstrom höher ist. Die hydraulischen Systeme sollen daher für einen geringen Druckverlust ausgelegt werden.
- Wärme- bzw. Kältebereitstellung bei geringen Temperaturdifferenzen geht mit einem entsprechend geringeren Exergiebedarf einher. Diese thermodynamische Beschreibung bedeutet auf technischer Ebene einen reduzierten Primärenergieeinsatz.
- LowEx-Systeme gewährleisten einen hohen Arbeitsplatzkomfort bei niedrigem Energieverbrauch, wenn bauliche und technische Maßnahmen bereits in der Planungsphase gemeinsam entwickelt und im Gebäudebetrieb berücksichtigt werden.

Bis heute wird allerdings wenig auf eine optimale Abstimmung der beiden Teilkomponenten „Umweltwärme“ und „Übergabesystem“ sowie das verbindende Stück „Verteilsystem/Hydraulik“

geachtet. Zur praxisnahen Bearbeitung wird auf Erfahrungen in Bauten der jüngsten Vergangenheit zurückgegriffen.

Ziel des Forschungsvorhabens *LowEx:Monitor* ist die Optimierung des Zusammenspiels von erdgekoppelter Wärme- / Kältenutzung und dem LowEx-Übergabesystem TABS im Raum. Der Energieaufwand für den Betrieb des Energiewandlers (Wärmepumpe / Kältemaschine) und für die Hilfsantriebe soll soweit reduziert werden, dass eine Jahresarbeitszahl von 10 erreicht wird.

2.2 Neue Regelalgorithmen

Herausforderung: Neue Regelalgorithmen unter besonderer Berücksichtigung von Bedarfsentwicklung und thermischen Speichereffekten im Gebäude.

Die Wärmezu- bzw. abfuhr durch konventionelle Flächenheiz- bzw. Kühlsysteme in Gebäuden beruht auf der Verbrennung fossiler Energieträger bzw. der Kälteerzeugung mit Hilfe elektrisch betriebener Kältemaschinen. Die angewendeten Regel- und Steuerverfahren orientieren sich hauptsächlich am momentanen Bedarf (witterungs- oder raumtemperaturgeführte Systeme) oder auch an der Nutzung der Gebäude (Zeitsteuerung, Berücksichtigung von Anheiz-/Vorkühlzeiten). Wechselwirkungen mit den vorgelagerten Prozessen der Wärme- bzw. Kälteerzeugung werden dabei i. A. nicht berücksichtigt.

Es sollen daher neue Regel- und Steueralgorithmen entwickelt werden, die eine verbesserte Ausnutzung von Umweltwärme/-kälte im Zusammenhang mit wassergeführten Heiz- und Kühlsystemen ermöglichen. Dabei sind insbesondere die zukünftige Bedarfsentwicklung, die Ausnutzung von Speichereffekten im Gebäude sowie die Verfügbarkeit und Reaktion der Wärmequelle-/senke zu berücksichtigen.

2.3 Qualitätssicherungsverfahren / nachträgliche Betriebsoptimierung

Da LowEx-Systeme in Gebäuden nur dann energieeffizient betrieben werden können und nur dann ein gutes thermisches Raumklima bereitstellen, wenn alle Einzelkomponenten richtig aufeinander abgestimmt sind, muss nicht nur die Qualität der Einzelkomponenten sondern auch die des Gesamtsystems gewährleistet werden. Darin unterscheiden sich diese Systeme deutlich von anderen, in der Baupraxis eingeführten Systemen. So können bei konventionellen Anlagen zur Raumkühlung die Einzelkomponenten Kühlturm, Kältemaschine, Kälteverteilung und Kälteübergabe von unterschiedlichen Projektpartnern geliefert werden, weil die Schnittstellen sauber definiert sind. Das ist bei LowEx-Systemen nicht ohne weiteres möglich, weil die natürlichen Wärmesenken bzw. -quellen und das Gebäude direkt aufeinander wirken. Das ist damit zu erklären, dass die Temperaturniveaus auf der Quellen- und Senkenseite vorgegeben sind und nicht aktiv eingestellt werden können.

Flächenheiz- und -kühlsysteme werden immer häufiger in Bauvorhaben umgesetzt. Dennoch sind die Systeme noch keine gängige Baupraxis. Auf der Baustelle kommt es immer wieder zu Abstimmungsschwierigkeiten und Problemen mit der Systemeinbindung in das Gebäude mit seinen gebäudetechnischen Anlagen. Viele Planer sind zudem unsicher, wenn es um die richtige Dimensionierung der Einzelkomponenten geht. Auch die Betreiber fühlen sich häufig überfordert, wenn es um die Wahl der richtigen Betriebsstrategie geht.

Diese Schwierigkeiten machen die LowEx-Systeme fehleranfällig. Diese Fehleranfälligkeit macht sich weniger in der Minderung der thermischen Behaglichkeit als vielmehr in einem Energiemehrverbrauch bemerkbar. LowEx-Systeme wirken, richtig geplant und in ein ganzheitliches Gebäudekonzept integriert, ausgleichend auf das Raumklima, denn die geringen Temperaturunterschiede und die hohe Trägheit der Systeme gleichen die Energiebilanz (Wärmelast und Wärmeabfuhr) aus. Dieses

vorteilhafte Verhalten bringt den Nachteil mit sich, dass eine suboptimale Betriebsführung im Normalbetrieb kaum erkannt wird.

Ziel des Forschungsvorhabens *LowEx:Monitor* ist die Bereitstellung eines umfassenden Qualitätssicherungsverfahrens, um die energetische, exergetische und thermische Leistungsfähigkeit der LowEx-Systeme in realen Projekten tatsächlich ausschöpfen zu können.

2.4 Gesamtsystemsimulation

Herausforderung in der Gesamtsystemsimulation: Einerseits müssen die numerisch sehr unterschiedlichen Bereiche „Gebäude“ (z.B. große Zeitkonstante), „Versorgungstechnik“ (Bereitstellung robuster Simulationsmodelle), „Nutzung“ (hier stochastische Prozesse) und „Regelung“ (z.B. kurze Zeitkonstanten und stark gekoppeltes Gleichungssystem) in einem einheitlichen Simulationsmodell abgebildet werden. Andererseits müssen die Modelle einzeln und insbesondere in ihrem Zusammenwirken validiert werden.

Ziel des Forschungsvorhabens *LowEx:Monitor* ist die Bereitstellung einer Simulationsbibliothek in *MODELICA* für zukünftige Planungsaufgaben.

3 Monitoringkampagnen

Das Monitoring umfasst alle Energieströme und Temperaturen rund um das Geothermiesystem, um eine exergetische Analyse für die Geothermie-Systeme durchführen zu können. Der Mindestdatensatz enthält den Wärmestrom auf der Primär- und der Sekundärseite, den Stromaufwand für die Kompressoren der reversiblen Wärmepumpe und den Stromaufwand für die Primär- und Sekundärpumpe(n). Darüber hinaus werden die wesentlichen Energieströme im Gebäude (z.B. Gesamtstrombezug und Lüftungsanlage) erfasst, um eine Gesamtenergiebilanz erstellen zu können. Raumtemperaturen und Raumlufffeuchte geben Auskunft über das Raumklima in ausgewählten Räumen.

In den Monitoringprojekten wird weitgehend auf die bestehende Messtechnik zurückgegriffen, so dass die Kosten für die Messtechnik pro Projekt unter 25 T€ liegen. Die Datenerfassung wird gemäß den EnOB-Richtlinien durchgeführt. Die Datenauswertung erfolgt mit dem Programm DataStorage und wird auszugsweise unter <http://lowexmonitor.ise.fraunhofer.de/> zur Verfügung gestellt.

Das Langzeitmonitoring wird durch detaillierte Kurzzeitmessungen ergänzt, um Aufschluss über das Nutzerverhalten und den thermischen Raumkomfort zu erhalten.

Die Messtechnik befindet sich aktuell im Aufbau. Die Monitoringprojekte werden voraussichtlich bis Ende 2009 in Betrieb sein.

3.1 3 Gebäude mit Erdwärmenutzung

Alle Arbeiten in *LowEx:Monitor* sind eng mit den Monitoringprojekten verknüpft. So liefern die Messdaten aus den Messprojekten Hinweise auf die Systemoptimierung, auf den vorteilhaften Einsatz verbesserter Regelalgorithmen und auf die Schwachstellen bzw. die erforderliche Qualitätssicherung. Darüber hinaus dienen die Anlagenkenndaten in Verbindung mit den Messdaten der Plausibilitätskontrolle und – soweit möglich – auch der Validierung von Simulationsmodellen, die wiederum zur Systemoptimierung herangezogen werden können.



Abbildung 2: Die Energiekonzepte des Bürogebäudes von DS-ABT in Stuttgart, des Büro- und Laborgebäudes SPRING von Pfizer in Freiburg sowie des Bürogebäudes Wenzinger Hof in Freiburg werden messtechnisch evaluiert. Fotos: Drees & Sommer, Pfizer, UNMÜSSIG.

3.2 Beispiel: Büro- und Laborgebäude SPRING

Das Büro- und Laborgebäude SPRING ist ein Sanierungsprojekt der Firma Pfizer am Standort Freiburg. Vor Beginn des Projektes wurden ehrgeizige Ziele formuliert, um mit einem möglichst geringen Energieeinsatz sehr hohe Anforderungen an die Arbeitsplatzqualität erfüllen zu können.

Das Gebäude erhielt eine sehr gute Fassade mit außen liegendem Sonnenschutz. Eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und ohne Umluftanteil gewährleistet eine gute Raumluftqualität und regelt die Luftfeuchtigkeit. Die sensiblen Wärme- und Kühllasten werden über Heiz- und Kühldecken eingebracht. Der Bürobereich des Gebäudes wird über eine Geothermiezentrale *GEOZENT* mit Wärme und Kälte versorgt. Die Lüftungsanlage und die Laborteile des Gebäudes werden (zusätzlich) über das firmeneigene Dampf- und Kältenetz versorgt.

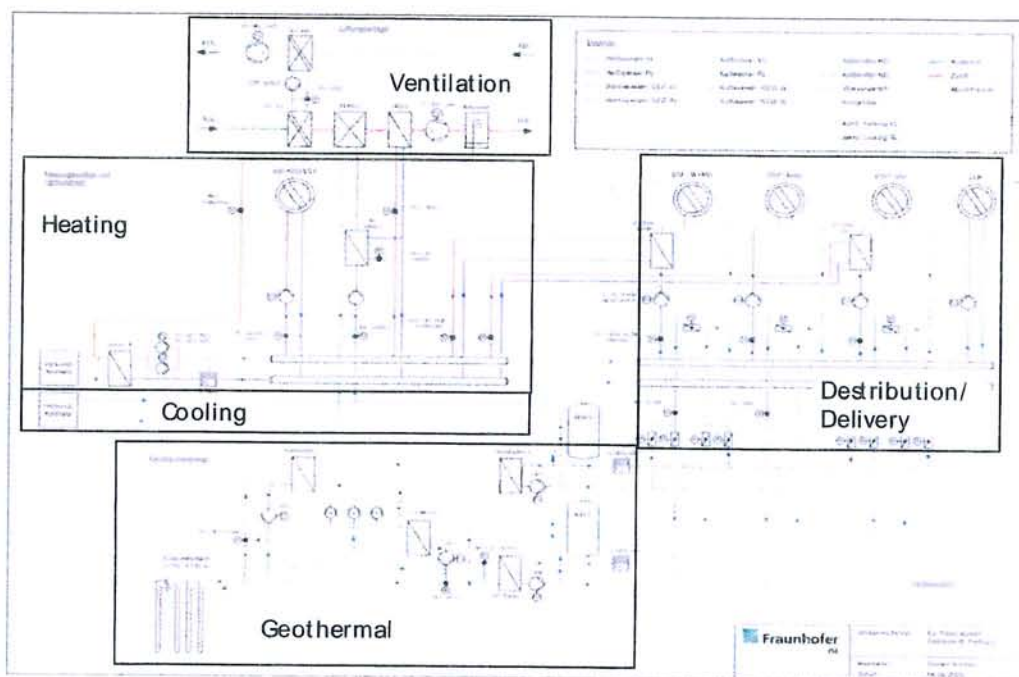


Abbildung 3: Anlagenschema für die Energieversorgung des gesamten Gebäudes SPRING. Der Büroteil wird geothermisch beheizt und gekühlt.

Die Energieverbräuche aus dem ersten Betriebsjahr zeigen, dass die hochgesteckten Ziele erreicht worden sind: Mit einem Primärenergieaufwand von 295 kWh/m²a für das gesamte Labor- und Bürogebäude SPRING liegt der Energieverbrauch deutlich niedriger als in Vergleichsgebäuden dieser Gebäudeklasse mit 600 bis über 1.000 kWh/m²a.

Das Energieflussbild zeigt die Verluste im Bereich der Energiewandlung und die Energieverteilung innerhalb des Gebäudes auf die einzelnen Versorgungssysteme.

Im Gesamtgebäude übernimmt die geothermische Energiezentrale nur einen Teil der Wärme- und Kältebereitstellung, denn die Energiezentrale *GEOZENT* versorgt ausschließlich die Heiz- und Kühldecken im Büroteil des Gebäudes. Da innerhalb des Gebäudes gleichzeitig sowohl geheizt als auch gekühlt werden kann, übernimmt diese Zentrale auch die Wärmeverschiebung innerhalb des Gebäudes. In diesem Betriebsfall wird das Erdreich lediglich als zusätzliche Wärme- bzw. Kältequelle genutzt.

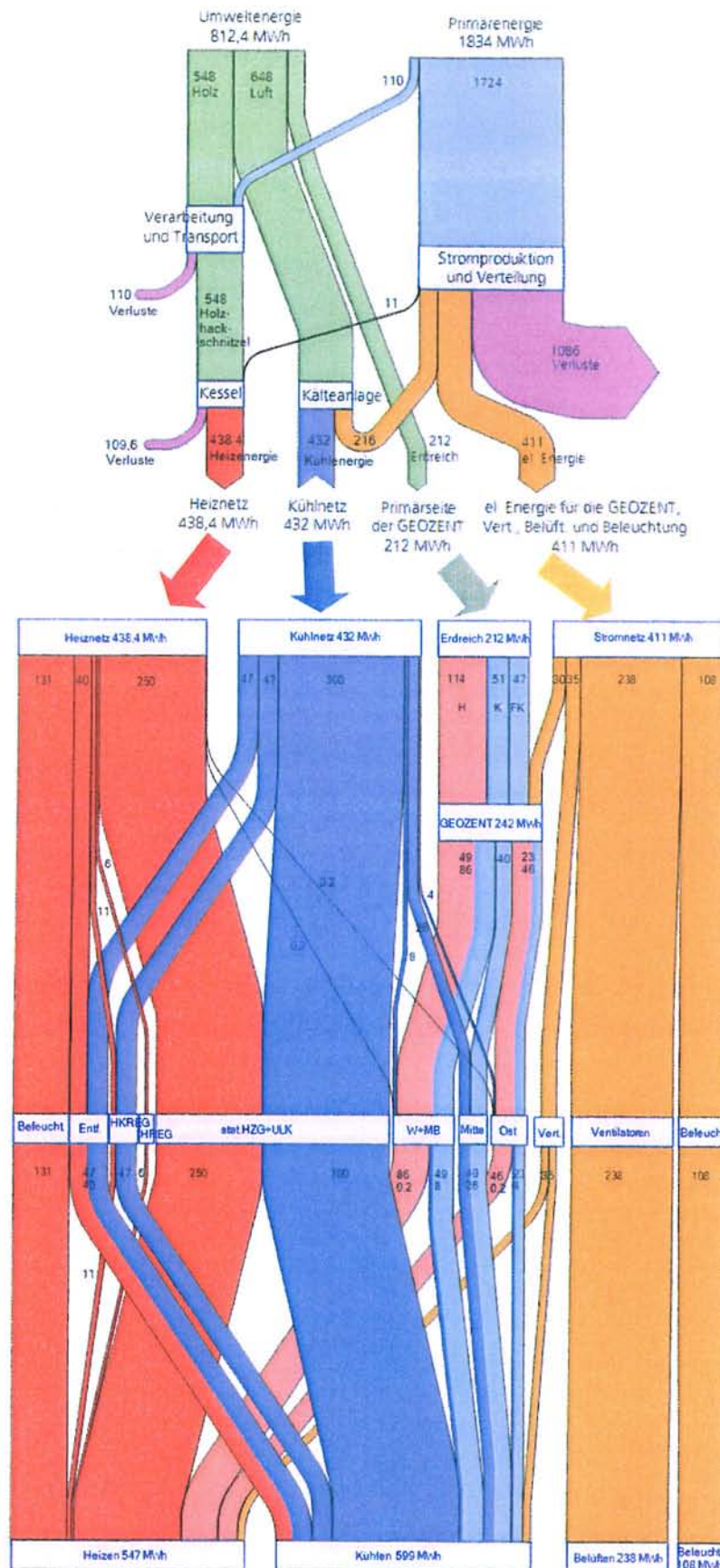


Abbildung 4: Energieflussbild vom Primärenergieeinsatz über die einzelnen Wandlungsstufen bis hin zu den einzelnen Energiedienstleistungen für das Gesamtgebäude SPRING.

Tabelle 1: Energieverbrauch im ersten Betriebsjahr (HUZR) für den Büroteil (Hauptuntersuchungsbereich) und das Gesamtgebäude SPRING (Büro + Labor).

	Hauptuntersuchungsbereich					Gesamtes Gebäude B				
	Heizenergie			Kühlenergie		Heizenergie			Kühlenergie	
	Heizenergie ohne Befeuchtung	Befeuchtung (Heizenergie)	Kühlenergie ohne Entfeuchtung	Entfeuchten (Heiz-/Kühlenergie)	Heizenergie ohne Befeuchtung	Befeuchtung (Heizenergie)	Kühlenergie ohne Entfeuchtung	Entfeuchten (Heiz-/Kühlenergie)		
Q_HUZR [kWh]	126.892		211.521		279.279			481.784**		
	83.729	43.162	159.586	51.936	207.394	71.885	395.287**	86.497**		
Q_2008 [kWh]	220.910*		228.524*		529.645*			581.772***		
	142.108*	78.802*	176.589*	51.936*	398.404*	131.241*	495.072***	86.700***		
q [kWh/m²a]	56*		55*		71*			85***		
	37*	19*	43*	13*	52*	19*	72***	13***		

* Werte für 2008 berechnet.

** Kühlenergie für das Gesamtgebäude geschätzt.

*** Kühlenergie für das Gesamtgebäude auf Basis der Schätzung (**) für 2008 berechnet.

Der spezifische Heizenergieverbrauch ist im Bürogebäude mit 37 kWh/m²a gering. Allein für die Luftbefeuchtung werden noch einmal 19 kWh/m²a in Form von Wasserdampf aufgewendet.

Der spezifische Kühlenergieverbrauch ist mit 43 kWh/m²a im Bürogebäude verhältnismäßig hoch und ist auf den niedrigen Sollwert von 23°C zurückzuführen. Für die Luftentfeuchtung werden zusätzlich 13 kWh/m² a in Form von Kalt- und Warmwasser aus dem Verbundnetz aufgewendet.

Die Sollwerte im Heiz- und Kühlfall wurden auf Basis dieser Analyse und der Rückmeldungen seitens der Mitarbeiter im Winter auf 22°C reduziert und im Sommer auf 24°C angehoben. Dadurch wird nicht nur der Energieaufwand reduziert, sondern auch die Betriebsführung der geothermischen Energiezentrale durch eine größere Regelhysterese verbessert.

Mit einer Arbeitszahl von 5,3 im Heiz- bzw. 5,6 im Kühlfall erreichte die Anlage bereits im ersten Betriebsjahr sehr gute Ergebnisse. Im gesamten Betriebszeitraum erreichte die freie Kühlung lediglich eine Arbeitszahl von 6,9. Im Frühjahr („freie Kühlung opt.“) lag die Arbeitszahl in diesem Betriebszustand mit 9,1 deutlich höher. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die übergeordnete Betriebsführung entsprechend verbessert werden kann.

Der spezifische Hilfsenergieaufwand kann deutlich reduziert werden, wenn die Temperaturdifferenzen auf der Primär- und Sekundärseite durch Betrieb einer Kältemaschine vergrößert werden. In der Gesamtbilanz (III) führt dies dazu, dass der aktive Kühlbetrieb mit 3,7 in bestimmten Betriebszuständen effizienter ist als der direkte Betrieb der Erdsonden mit 3,6 im Jahresmittel.

Tabelle 2: Jahresarbeitszahlen (* für einzelne Betriebszustände) der reversiblen Wärmepumpe für 3 verschiedene Bilanzgrenzen.

Betriebsweisen	Jahresarbeitszahl* JAZ unterschiedlicher Bilanzgrenzen		
	I	II	III
Heizen	42.6	5.3	4.3
Kühlen	46.2	5.6	3.7
freie Kühlung opt.	9.1	9.1	4.7
freie Kühlung HUZR	6.9	6.9	3.6
Gesamt	14.9	5.8	3.9

