



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Zwischenbericht 15. Februar 2009

Sanfte Kühlung mit erdgekoppelten Wärmepumpen im MINERGIE-P® Wohngebäude CosyPlace

Messkampagne 2007/2008

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Institut Energie am Bau – FHNW
St. Jakobs - Strasse 84
4132 Muttenz,
www.fhnw.ch/iebau

Autoren:

Ralph Dott, FHNW, ralf.dott@fhnw.ch,
Thomas Afjei, FHNW, thomas.afjei@fhnw.ch
A. Genkinger, FHNW
A. Witmer, FHNW

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Charles Filleux

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152878 / 102265

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

In Basel wurde 2007 das erste Mehrfamilienhaus nach MINERGIE-P®-Standard, „CosyPlace“, erstellt. Im Winter versorgt eine erdgekoppelte Wärmepumpe eine Niedertemperatur - Fussbodenheizung. Im Sommer steigert eine passive Kühlung über den Fussboden, gekoppelt mit den Erdwärmesonden, die thermische Behaglichkeit. Mit der messtechnischen Untersuchung sollen Erkenntnisse über das Praxisverhalten und den Benutzereinfluss gewonnen werden. Ein vorausgehendes Simulations-Projekt zeigte, dass die thermische Behaglichkeit durch den zusätzlichen passiven Kühlbetrieb mit geringem Zusatzaufwand wesentlich gesteigert werden kann. Die Auslegung von Fussbodenheizung und Erdwärmesonde erfolgen dabei für den Heizbetrieb. Die Messungen konnten in der Periode von November 2007 bis Oktober 2008 erfolgreich durchgeführt werden.

Insgesamt wurde eine gute thermische Behaglichkeit in der Winterperiode mit Raumtemperaturen im Bereich 20 - 24 °C und in der Sommerperiode mit 20 - 26 °C erreicht. Die relative Raumluftfeuchte im Winter war mit 20% $r_{r,F}$ bis 50% $r_{r,F}$ zeitweise eher niedrig. Mit einem Wärmeerzeuger - Nutzungsgrad im Warmwasserbetrieb von 2.9, im Heizbetrieb von 4.0 und im passiven Kühlbetrieb von 8.8 wurde eine gute und effiziente Anlage realisiert. Im Kühlbetrieb, der mit 7 MJ/m²/a nur einen begrenzten Einsatz zeigte, besteht auch aufgrund der Reglereinstellung noch Potenzial für eine weitergehende Nutzung. Der Heizwärmebezug ist mit 103 MJ/m²/a zwar, absolut gesehen, eher gering, jedoch unter anderem durch eine sukzessive Fertigstellung einzelner Wohnungen während der ersten Heizperiode deutlich höher als der rechnerische Nachweiswert. Die Erfassung und Auswertung einer zweiten Messperiode, in der das Gebäude bestimmungsgemäss genutzt wird, wird durch die Autoren angestrebt.

Abstract

The first multi-family apartment house according to MINERGIE-P standard in the city of Basel was built in 2007. The building is heated with a ground coupled heat pump combined with a low temperature floor heating system. A passive cold generation out of the borehole heat exchanger combined with the floor heating system raises the thermal comfort in summer. The field monitoring should bring further knowledge about the behaviour in the field application and the user influence. A previous theoretical study about "Heating and cooling with ground coupled heat pumps" showed that if the heat pump and the floor heating system are designed for the heating application an additional passive cooling mode could raise the thermal comfort in summer time with low additional expense. The measurements could be accomplished in the period November 2007 until October 2008.

A good thermal comfort could be reached with room temperatures in the winter period in the range 20 - 24 °C and 20 - 26 °C in the summer period. The room air humidity in winter was with a range of 20 % $r_{r,H}$ to 50 % $r_{r,H}$ temporarily in a lower range. The generator seasonal performance factor showed an energy efficient system in domestic hot water mode with 2.9, in heating mode with 4.0 and in passive cooling mode with 8.8. The cooling mode showed a limited but increasable utilisation of 7 MJ/m²/a also caused by the control settings. The heat supply for space heating was lower than standard buildings yet with 103 MJ/m²/a higher than the calculated value caused amongst other things by ongoing construction work in two of the five apartments. The authors intend to accomplish the acquisition and evaluation of a second measurement period with a fully occupied building.

Inhaltsverzeichnis

1	AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG	5
1.1	Motivation.....	5
1.2	Gebäude CosyPlace	5
1.3	Beteiligte und Projektumfeld	6
2	GRUNDLAGEN UND VORGEHEN	7
2.1	Lösungsansatz.....	7
2.2	Anlagenfunktionen & Parametereinstellungen.....	8
2.3	Messkonzept.....	9
2.4	Auswertemethodik und Gütekriterien.....	12
2.4.1	Energetische Bewertung.....	12
2.4.2	Behaglichkeitsbewertung.....	14
3	ERGEBNISSE	16
3.1	Übersicht.....	16
3.1.1	Energie.....	16
3.1.2	Kennzahlen Energieeffizienz	17
3.1.3	Saisonaler Verlauf der Erdwärmesonden - Temperatur	18
3.1.4	Saisonale Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb	20
3.1.5	Nutzerzufriedenheit.....	23
3.2	Winterperiode.....	24
3.2.1	Energie.....	24
3.2.2	Kennzahlen Energieeffizienz	24
3.2.3	Raumkonditionen	25
3.2.4	Sensitivitätsanalyse der Heizwärmebedarfsberechnung nach SIA380/1	26
3.2.5	Dynamisches Verhalten im Winterbetrieb.....	30
3.3	Sommerperiode	31
3.3.1	Energie.....	31
3.3.2	Kennzahlen Energieeffizienz	31
3.3.3	Raumkonditionen und Kondensationsrisiko	32
3.3.4	Dynamisches Verhalten im Sommerbetrieb	33
3.4	Empfehlungen & Optimierungen.....	35
3.4.1	Reglereinstellungen Heiz- und Kühlbetrieb	35
3.4.2	Information der Nutzer, Anlagenbetreiber und Planer	36
4	SCHLUSSFOLGERUNGEN	37
4.1	Schlussfolgerungen	37
4.2	Ausblick / weiteres Vorgehen	37
5	SYMBOLVERZEICHNIS	38
5.1	Variablen	38
5.2	Indices.....	38
6	LITERATURVERZEICHNIS	39

1 AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG

1.1 MOTIVATION

Die sommerliche Kühlung von Gebäuden gewinnt zunehmend an Bedeutung. Hauptgründe sind höhere innere thermische Lasten in Verbindung mit modernen Bauweisen, die einen zunehmenden Anteil an transparenten Flächen aufweisen, bis hin zu den populären Glasfassaden. Hinzu kommt ein gestiegener Lebensstandard mit hohen Ansprüchen an die thermische Behaglichkeit. Der Energiebedarf für die Kühlung gewinnt daher bei energieeffizienten Gebäuden immer mehr an Bedeutung.

Eine effiziente Bereitstellung behaglicher Bedingungen in Gebäuden ist also der Kernpunkt der notwendigen Aktivitäten. Dabei gilt es, zuerst die entstehenden thermischen Lasten zu minimieren, beispielsweise durch eine Verschattung zum Schutz vor zu starker solarer Einstrahlung oder Reduktion der Abwärme elektrischer Geräte durch effiziente Technik oder Vermeiden von unnötigem Stand-by-Betrieb. Der verbleibende Kühlbedarf sollte dann mit möglichst geringem Aufwand gedeckt werden. Systeme, mit denen sowohl geheizt als auch gekühlt werden kann, versprechen einen geringen Investitionsbedarf und können mit einer entsprechenden Regelung eine sehr gute Effizienz erreichen. Wärmepumpen können neben Heizwärme und Warmwasser auch Kühlenergie bereitstellen. Dabei können die für die Wärmepumpe erschlossenen Wärmequellen oft auch zur passiven Kühlung genutzt und meist einfach in existierende Systemkonfigurationen integriert werden.

In dem BFE-Projekt „Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen“ [2] wurde die Frage untersucht, wie man mit bestehenden Wärmepumpensystemen ohne nennenswerten Mehraufwand auch kühlen kann. Diese auf Simulationen basierende Untersuchung wurde 2007 abgeschlossen. Sie befasste sich mit Niedrigenergie-Wohnbauten mit mechanischer Lüftung und beschränkte sich auf Systemkonfigurationen bei denen:

- das Erdreich im Heizbetrieb als Wärmequelle für eine Wärmepumpe dient und im Kühlbetrieb als Wärmesenke genutzt wird.
- die Wärmeabgabe und -aufnahme über eine Fussbodenheizung erfolgt.
- die gesamte Anlage auf den Heizfall ausgelegt ist, jedoch auch zur Kühlung eingesetzt wird.

Untersucht wurden Fragestellungen zur Hydraulik, zur Komponentenauslegung, zur thermischen Behaglichkeit, dem Aufwand- / Nutzenverhältnis, dem Risiko von Kondensatbildung, der Regelung und den Kosten.

1.2 GEBÄUDE COSYPLACE

Das Gebäude „CosyPlace“ ist das erste MINERGIE-P® Gebäude auf dem Gebiet des Kantons Basel-Stadt und unter der Nummer BS-001-P zertifiziert [11]. Es wurde als Ersatzneubau im August 2007 fertig gestellt. Der Bezug der ersten 3 Wohnungen erfolgte zwischen August und Oktober 2007. Die beiden weiteren Wohnungen wurden im September und Oktober 2008 bezogen.

Das Gebäude „CosyPlace“ (Abb. 1) ist ein massiv gebautes Mehrfamilienhaus mit 5 Wohneinheiten an einer nordorientierten Hanglage in Basel-Stadt. Die hoch Wärme dämmende Gebäudehülle (1) und die Wärmeschutzverglasung (2) sorgen für einen MINERGIE-P® entsprechenden geringen Heizwärmebedarf. Das Gebäude verfügt über drei Vollgeschosse mit zusätzlichem Attikageschoss und unterirdischer Einstellhalle. Die Wärmeübergabe erfolgt über eine Niedertemperatur – Fussbodenheizung (6). Eine Wärmepumpe (5) mit 15.5 kW (B0/W35) Nennleistung erzeugt die Wärme für Warmwasser und Raumheizung. Zwei jeweils 130 m tiefe Erdwärmesonden werden von der Wärmepumpe als Wärmequelle genutzt. Die erzeugte Wärme wird in einem Pufferspeicher mit 325 Litern Inhalt für die Heizung und einem Trinkwassertank mit 800 Litern zwischengespeichert. Für die passive Kühlung kann die Erdwärmesonde über einen Wärmetauscher direkt an den Fussbodenheizkreis gekoppelt werden. Eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (3) und vorgeschaltetem Luft-Erdreichwärmetauscher (4) versorgt die Räume mit vorkonditionierter Frischluft. Für einen niedrigen Strombedarf sind zudem energieeffiziente Leuchten (7) und Geräte (8) vorgesehen. Die Energiebezugsfläche beträgt 1'064 m², die Nettowohnfläche 741 m². Der Heizwärmebedarf nach SIA 380/1 (2001) [10] beträgt 36 MJ/m²a, die Norm-Heizlast nach SIA 384.201 11.8 kW bei einer Auslegungstemperatur von -8 °C und 20 °C Innentemperatur. Die Fussbodenheizung ist ausgelegt auf 30 °C Vorlauf- und 25 °C Rücklauftemperatur.

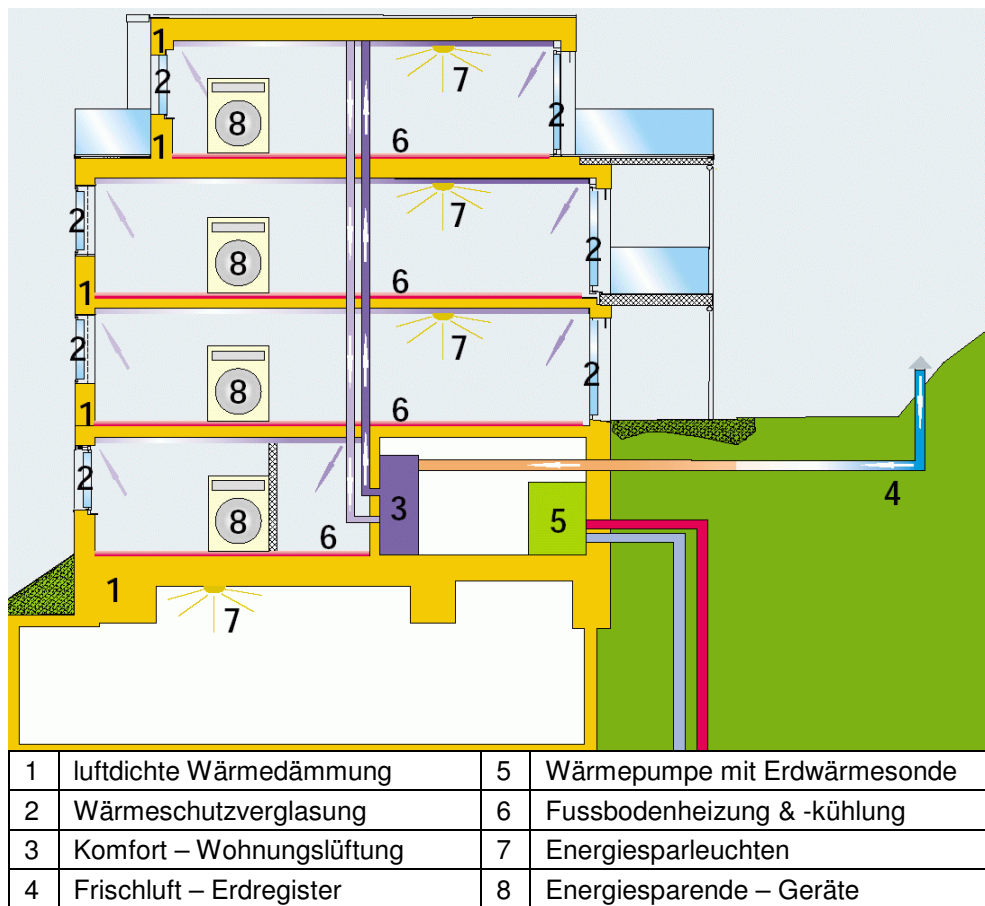


Abb. 1: Schematische Gebäudedarstellung mit technischem Konzept [1]

1.3 BETEILIGTE UND PROJEKTUMFELD

Das Projekt wird im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) und dem Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt (AuE-BS) durchgeführt. Es wird in Zusammenarbeit bzw. Koordination mit den folgenden, an der Erstellung des Gebäudes beteiligten Unternehmen durchgeführt:

- gribi-theurillat AG Generalunternehmer & Gebäudebetrieb
- Friap AG Hersteller der Wärmepumpe
- Raimann + Partner AG Haustechnikplaner
- Gartenmann Engineering AG Energiekonzept
- Rosenmund Haustechnik AG Heizung & Sanitär Installation
- K. Schweizer AG Elektroinstallation

Die Bewohner des Gebäudes sind über die Messungen informiert. Sie tragen mit ihren Rückmeldungen zum Gelingen des Projekts bei. Die Zusammenarbeit mit allen Projektbeteiligten wird im Wesentlichen als gut und konstruktiv bewertet.

Die Ergebnisse des Projektes fliessen in die Arbeit des IEA HPP Annex 32 mit dem Titel "Economical heating and cooling systems for low energy houses" des Wärmepumpenprogramms (HPP) der Internationalen Energieagentur (IEA) ein [4].

2 GRUNDLAGEN UND VORGEHEN

2.1 LÖSUNGSANSATZ

Nachdem die Ergebnisse aus [2] die theoretische Machbarkeit und Einsatzgrenzen sowie das Potenzial einer hocheffizienten und einfachen Ergänzungskühlung zeigten, wurde eine reale Anlage gesucht, um Erfahrungen für die Umsetzung zu gewinnen und mögliche Probleme im Praxisbetrieb aufzuzeigen. Dafür bot sich das am Unteren Batterieweg in Basel 2007 erstellte, erste MINERGIE-P®-Mehrfamilienhaus des Kantons Basel-Stadt mit der Bezeichnung „CosyPlace“ an. In diesem Gebäude wurde eine Wärmepumpe mit Erdwärmesonde für Heizung, Warmwasser und sanfte Kühlung kombiniert mit einer Fussbodenheizung realisiert.



Abb. 2: Ansicht des Gebäudes CosyPlace zum Erstbezug im Spätsommer 2007

Das Gebäude CosyPlace unterscheidet sich von den theoretischen Untersuchungen durch die folgenden Abweichungen. In der theoretischen Untersuchung wurde ein MINERGIE®-Einfamilienhaus mit selbstregelnder Niedertemperatur – Fussbodenheizung betrachtet. Das Gebäude CosyPlace ist ein Mehrfamilienhaus nach MINERGIE-P®-Standard mit 5 Wohnungen. Diese Wohnungen unterscheiden sich untereinander aufgrund der Orientierung und Lage, so dass sie unterschiedlichen externen Wärmegewinnen bzw. Lasten durch Solareinstrahlung ausgesetzt sind. Bei der Wärmeversorgung muss aber zentral entschieden werden, ob Heizwärme bzw. Kühlung bereitgestellt wird. Hierbei liegt die Präferenz auf der Bereitstellung von Heizwärme und einem möglichst geringem, durch die Kühlung erzeugtem Zusatzaufwand. Es kann also sein, dass nicht das volle Kühlpotenzial ausgeschöpft wird. Weiterhin arbeitet die Wärmepumpe im Heizbetrieb auf einen Pufferspeicher. Der Fussbodenheizkreis wird über eine Beimischschaltung aus dem Pufferspeicher gespeist. Alle Raumheizkreise sind weiterhin mit Raumthermostaten ausgerüstet. Dabei führt eine Überschreitung der eingestellten Temperatur im Heizfall bzw. Unterschreitung im Kühlfall zum Schliessen des jeweiligen Raumheizkreises.

Durch die Bedürfnisse der unterschiedlich orientierten Wohnungen und der manuell umzuschaltenden Raumthermostaten wird erwartet, dass im realen Betrieb wahrscheinlich nicht das volle Kühlpotenzial ausgenutzt werden wird.

Die Umschaltung zwischen Heizbetrieb und Kühlbetrieb erfolgt automatisch, abhängig von der Ausserentemperatur. Für die Auswertung wurden die Zeiträume daher kalendarisch bestimmt mit der Winterperiode vom 01. November 2007 bis 30. April 2008 und der Sommerperiode vom 01. Mai 2008 bis 31. Oktober 2008.

Die auf Basis der Messergebnisse zu untersuchenden Fragestellungen im Projekt umfassen:

- Welche Raumtemperaturen und Raumfeuchten werden erreicht?
- Wie viel Wärme wird den Räumen entzogen und welchen Einfluss hat dies auf die Raumtemperierung?
- Wie viel Wärme wird insgesamt für Heizung und Warmwasser erzeugt bzw. je Wohnung genutzt?
- Wie viel Elektrizität wird jeweils für die Erzeugung von Heizwärme, Warmwasser und Kälte aufgewendet?
- Mit welcher Effizienz (Arbeitszahl bzw. Nutzungsgrad) werden Heizwärme, Warmwasser, Raumkühlung in Abhängigkeit der gegebenen Randbedingungen erzeugt?
- Sind die Bewohner mit dem Raumklima zufrieden?
- Gibt es oder bestand Gefahr für Kondensation auf der Fussbodenoberfläche?

2.2 ANLAGENFUNKTIONEN & PARAMETEREINSTELLUNGEN

Im Folgenden werden einzelne Aspekte der Gebäudetechnik und ihre Funktion detailliert beschrieben und die für die Funktionen Heizen und Kühlen relevanten Parametereinstellungen der Regelung erläutert.

Die Belüftung des Gebäudes erfolgt über mechanische Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Die Frischluft wird über zwei Luft-Erdreich-Wärmetauscher vorkonditioniert. Die Luft wird dann auf für die einzelnen Wohnungen auf Lüftungsgeräte verteilt, welche zentral im Keller angeordnet sind. Die Fortluft wird in die Einstellhalle abgeführt. Die Lüftungsanlagen laufen das ganze Jahr durch. Der Volumenstrom jedes Gerätes / jeder Wohnung kann über eine Steuereinheit in der jeweiligen Wohnung in drei Stufen gewählt werden.

Die Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser erfolgt wie in Kapitel 1.2 beschrieben über eine Wärmepumpe mit zwei Erdwärmesonden von je 130 m. Mit dem Wärmeübergabesystem Fussbodenheizung wird bei dem System „Heizen und Kühlen mit erdgekoppelter Wärmepumpe und Fussbodenheizung“ sowohl im Winter geheizt als auch im Sommer gekühlt. Es wird ein Wärmeübergabesystem für beide Funktionen verwendet. Die Verteilung der Wärme für alle Wohnungen erfolgt ebenso zentral über ein System. Es kann also nur entweder in allen Wohnungen geheizt werden oder in allen Wohnungen gekühlt werden. In einer Wohnung heizen, in einer anderen kühlen ist systembedingt nicht möglich. Die zentrale Umschaltung zwischen Heizen und Kühlen erfolgt automatisch abhängig von der Aussentemperatur. Es ist vorgesehen, dass vorwiegend in der Heizperiode ausreichend Wärme bereitgestellt wird, damit in allen Wohnungen eine angenehme Temperatur herrscht. Wenn in besonders warmen Zeiten kein Heizwärmebedarf mehr besteht, sollen die Raumtemperaturen in den Wohnungen mit der Fussbodenkühlung leicht gesenkt beziehungsweise über einen längeren Zeitraum stabil gehalten werden und nicht ansteigen. Dieses System kann und soll bewusst keine Klimatisierung leisten, sondern nur eine sanfte Kühlung. Diese wird mit besonders geringem Aufwand erreicht, der nur durch den Transport der Wärme aus dem Raum in das natürliche Kältereservoir des Erdreichs unter dem Gebäude geleistet wird.

Da eine Fussbodenheizung ein thermisch träges System ist, das eine leichte natürliche Schwankung der Raumtemperatur im Zusammenhang mit den Aussenbedingungen zulässt, ist es wenig sinnvoll, dass in zeitlich kurz aufeinander folgenden Abständen geheizt und gekühlt wird. Dies würde im Wesentlichen dazu führen, dass die thermische Speichermasse des Fussbodens aufgeheizt und gekühlt wird, im Raum aber kaum eine Veränderung feststellbar ist. Zudem würde mit dem wechselnden Aufheizen und Abkühlen Energie verschwendet, ohne einen entsprechenden Nutzen zu erzielen.

Die Regler - Einstellung für die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb wurde bei der Inbetriebnahme der Anlage mit einiger Sicherheit hinsichtlich ausreichender Wärmebereitstellung im Heizbetrieb festgelegt. Sie erfolgt anhand einer gleitend gemittelten Aussentemperatur. In Abb. 3 sind mit farbigen Flächen Heizbetrieb (rot), Hysterese Heizbetrieb (hellrot), neutrale Zone (weiss) und Kühlbetrieb (blau) dargestellt. Dabei wird für den Heizbetrieb eine Hysterese verwendet bei der unterhalb einer Grenztemperatur von 15 °C der Heizbetrieb aktiviert und oberhalb von 20 °C der Heizbetrieb deaktiviert wird. Oberhalb der neutralen Zone wird der Kühlbetrieb bei einer Grenztemperatur von 24 °C ohne Hysterese aktiviert bzw. deaktiviert. Die Grenztemperaturen beziehen sich auf eine gleitend über 6 Stunden gemittelte Aussentemperatur.

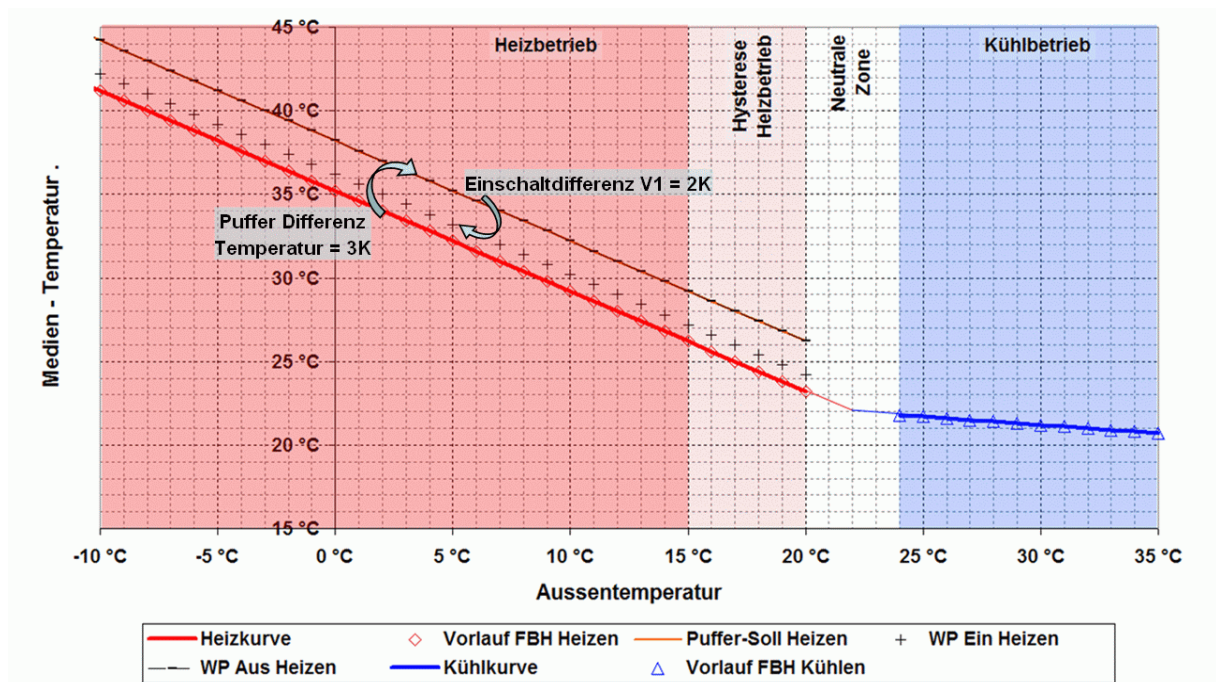


Abb. 3: Regelcharakteristik Heiz- und Kühlbetrieb

Die Heizkurve gibt die Soll-Temperatur des Heizungsvorlaufs vor. Sie wird definiert über den Fusspunkt, bei dem Vorlauftemperatur und Aussentemperatur identisch sind, und der Steigung bei sinkender Aussentemperatur. Der Fusspunkt wurde bei der Inbetriebnahme 2007 mit 22 °C und die Steigung mit 0.6 K/K festgelegt.

Die Vorlauftemperatur wird über eine Beimischschaltung im Fussbodenheizkreis geregelt. Das warme Wasser aus dem Pufferspeicher wird dabei nach Bedarf dem im Fussbodenkreis zirkulierenden Wasser beigemischt. Der Pufferspeicher wird von der Wärmepumpe geladen und bis zu einer Ausschaltemperatur 3 K oberhalb der Heizkurve aufgeheizt (Puffer-Differenz-Temperatur). Fällt die Temperatur im Pufferspeicher unter den Grenzwert 1 K oberhalb der Heizkurve (Einschaltdifferenz), so wird die Ladung des Pufferspeichers mit der Wärmepumpe aktiviert.

Im Kühlbetrieb wird die Kühlkurve analog der Heizkurve über die Beimischung eines Teilstromes über den Wärmetauscher zum Erdwärmesondenkreis kontinuierlich geregelt. Dabei zirkuliert in der Erdwärmesonde ein konstanter Massenstrom verursacht durch die Umwälzpumpe in der Wärmepumpe. Über ein Umschaltventil wird das Fluid in der Erdwärmesonde im Kühlfall über den Wärmetauscher zum Fussbodenkreis geleitet. Die Kühlkurve gibt ebenfalls die Soll-Temperatur des Fussbodenkreisvorlaufs vor. Der Fusspunkt liegt ebenfalls bei 22 °C bei einer Steigung von 0.1 K/K.

2.3 MESSKONZEPT

Die Messpunkte wurden so gewählt, dass die Energieflüsse und Zustandsbeschreibungen der erwähnten Bilanzgrenzen ermittelt werden können. In Abb. 4 sind die Messpunkte im Anlagenschema der Wärmeversorgung dargestellt. Die detaillierte Beschreibung der Messpunkte befindet sich im Anschluss in Tab. 1. Ein Teil der Messgrößen wird dabei über speziell installierte Sensoren und einen Datenlogger aufgezeichnet, der andere Teil über eine Abfrage und Protokollierung bestehender Energiezähler in einem M-Bus Netzwerk [5] mittels PC.

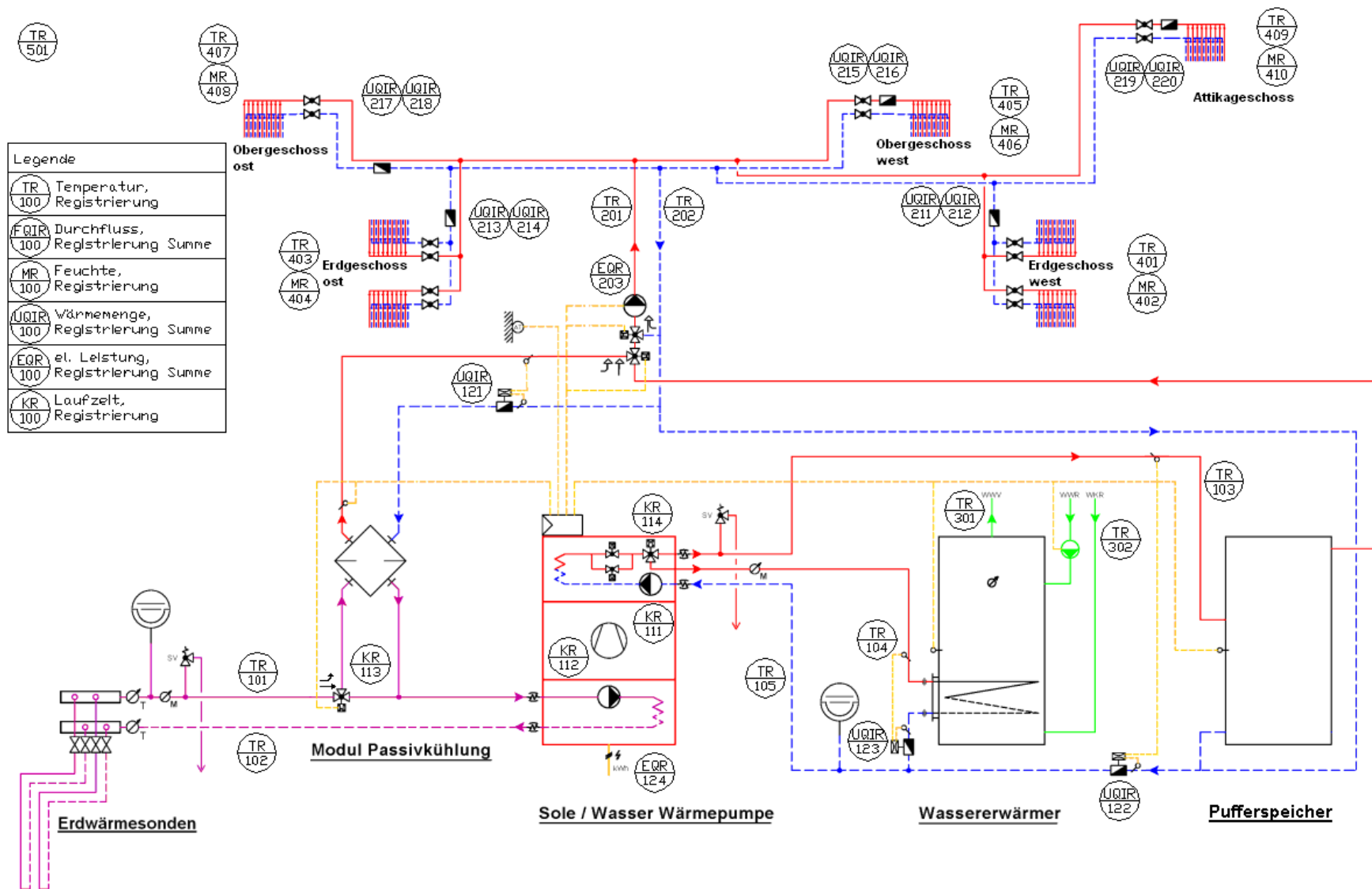


Abb. 4: Messpunkte der Feldmessung „CosyPlace - sanfte Kühlung mit Erdwärmesonden“ dargestellt im Anlagenschema

Messst. Nr.	Symbol	Einheit	Messgrösse	Messprinzip
101	$\theta_{\text{EWS-Aus}}$	°C	Temperatur Austritt Erdwärmesonde	PT100
102	$\theta_{\text{EWS-Ein}}$	°C	Temperatur Eintritt Erdwärmesonde	PT100
103	$\theta_{\text{WP-VL-h}}$	°C	Temperatur WP-Vorlauf-Heizung	PT100
104	$\theta_{\text{WP-VL-ww}}$	°C	Temperatur WP-Vorlauf-Warmwasser	PT100
105	$\theta_{\text{WP-RL}}$	°C	Temperatur WP-Rücklauf	PT100
111	$t_{\text{WP-UWP-Kond}}$	h	Laufzeit WP-UWP Kondensator	Status
112	$t_{\text{WP-UWP-EWS}}$	h	Laufzeit WP-UWP Erdwärmesonde	Status
113	$t_{\text{WP-k}}$	h	Laufzeit WP Kühlbetrieb	Status
114	$t_{\text{WP-ww}}$	h	Laufzeit WP Warmwasser-Ladung	Status
115	$t_{\text{WP-h}}$	h	Laufzeit Heizbetrieb	rechn.
121	$Q_{\text{k-EWS}}$	kWh	erzeugte Kälte EWS-Kühlung	WMZ
122	$Q_{\text{h-WP}}$	kWh	erzeugte Wärme Raumheizung	WMZ
123	$Q_{\text{ww-WP}}$	kWh	erzeugte Wärme Warmwasser	WMZ
124	E_{WP}	1 Imp. / kWh	elektrischer Energiebezug Wärmepumpe (enthält UWP EWS, UWP Kond, UWP WVÜ)	EEZ
125	$E_{\text{UWP-EWS}}$	kWh	elektrischer Energiebezug UWP Erdwärmesonde	rechn.
126	$E_{\text{UWP-Kond}}$	kWh	elektrischer Energiebezug UWP Kondensator	rechn.
201	$\theta_{\text{h-VL}}$	°C	Temperatur Heizkreis-Vorlauf	PT100
202	$\theta_{\text{h-RL}}$	°C	Temperatur Heizkreis-Rücklauf	PT100
203	$E_{\text{WVÜ-UWP}}$	100 Imp./ kWh	elektr. Energiebezug UWP Wärmeverteilung & -übergabe	EEZ
211	$Q_{\text{h-WHG1}}$	kWh	Nutzwärme Raumheizung Wohnung 1	WMZ
212	$Q_{\text{k-WHG1}}$	kWh	Nutzwärme Raumkühlung Wohnung 1	
213	$Q_{\text{h-WHG2}}$	kWh	Nutzwärme Raumheizung Wohnung 2	WMZ
214	$Q_{\text{k-WHG2}}$	kWh	Nutzwärme Raumkühlung Wohnung 2	
215	$Q_{\text{h-WHG3}}$	kWh	Nutzwärme Raumheizung Wohnung 3	WMZ
216	$Q_{\text{k-WHG3}}$	kWh	Nutzwärme Raumkühlung Wohnung 3	
217	$Q_{\text{h-WHG4}}$	kWh	Nutzwärme Raumheizung Wohnung 4	WMZ
218	$Q_{\text{k-WHG4}}$	kWh	Nutzwärme Raumkühlung Wohnung 4	
219	$Q_{\text{h-WHG5}}$	kWh	Nutzwärme Raumheizung Wohnung 5	WMZ
220	$Q_{\text{k-WHG5}}$	kWh	Nutzwärme Raumkühlung Wohnung 5	
301	θ_{ww}	°C	Temperatur Austritt WW-Speicher	PT100
302	θ_{kw}	°C	Temperatur Kaltwasser	PT100
311	$V_{\text{ww-WHG1}}$	l	bezogene Menge WW Wohnung 1	MZ
312	$V_{\text{kw-WHG1}}$	l	bezogene Menge KW Wohnung 1	
313	$V_{\text{ww-WHG2}}$	l	bezogene Menge WW Wohnung 2	MZ
314	$V_{\text{kw-WHG2}}$	l	bezogene Menge KW Wohnung 2	
315	$V_{\text{ww-WHG3}}$	l	bezogene Menge WW Wohnung 3	MZ
316	$V_{\text{kw-WHG3}}$	l	bezogene Menge KW Wohnung 3	
317	$V_{\text{ww-WHG4}}$	l	bezogene Menge WW Wohnung 4	MZ
318	$V_{\text{kw-WHG4}}$	l	bezogene Menge KW Wohnung 4	
319	$V_{\text{ww-WHG5}}$	l	bezogene Menge WW Wohnung 5	MZ
320	$V_{\text{kw-WHG5}}$	l	bezogene Menge KW Wohnung 5	
401	θ_{WHG1}	°C	Raumluf-Temperatur	PT100 kap.F.
402	ϕ_{WHG1}	%rF	Raumluf-Feuchte Wohnung 1	
405	θ_{WHG3}	°C	Raumluf-Temperatur	PT100 kap.F.
406	ϕ_{WHG3}	%rF	Raumluf-Feuchte Wohnung 3	
409	θ_{WHG5}	°C	Raumluf-Temperatur	PT100 kap.F.
410	ϕ_{WHG5}	%rF	Raumluf-Feuchte Wohnung 5	
501	θ_{AL}	°C	Temperatur Aussenluft	PT100
502	ϕ_{AL}	%rF	relative Feuchte Aussenluft	kap. F.

100: Wärmeerzeuger
400: Gebäude

200: Wärmeverteilung & -übergabe
500: Wetter

300: Trinkwasser

Tab. 1: Messstellenliste der Feldmessung „CosyPlace - sanfte Kühlung mit Erdwärmesonden“

2.4 AUSWERTEMETHODIK UND GÜTEKRITERIEN

Die Datenerfassung erfolgt für die Wärmezähler und Durchflusszähler über die Auslesung der Zählerstände über den M-Bus. Diese werden viertelstündlich von einem PC abgefragt und gespeichert. Die elektrischen Energiezähler, Temperaturmesspunkte und Statusgrößen werden von einem Datenlogger alle 20 Sekunden erfasst und viertelstündlich als Mittel- bzw. Summenwerte abgespeichert. Raumtemperaturen und -feuchten sowie die Aussenbedingungen werden über dezentrale Logger erfasst. Zur Datensicherung konnte keine dauerhafte Datenverbindung eingerichtet werden, sodass die Daten soweit möglich vor Ort gesichert werden. Die Messprinzipien der eingesetzten Sensoren sind in der Messstellenliste (Tab. 1) mit aufgeführt. Die Kalibrierung der Energiezähler erfolgte ab Werk, die PT100-Temperaturfühler wurden im Maschinenlabor der FHNW nachkalibriert. Die Auswertung der Messdaten erfolgt auf Basis der in den folgenden Unterkapiteln aufgeführten Definitionen der Kennzahlen zur energetischen Bewertung.

2.4.1 Energetische Bewertung

Allgemeine Definition der Kennzahlen

Die folgende Grafik zeigt die verwendete Definition der Kennzahlen und Bilanzgrenzen für die Bewertung der Wärmeversorgung.

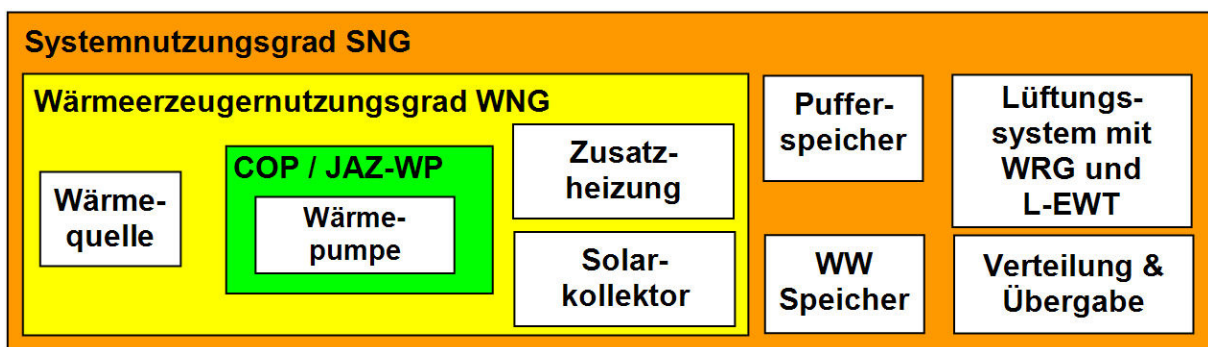


Abb. 5: Definition der Kennzahlen und Bilanzgrenzen für die Bewertung einer Wärmeversorgung

Jahres-Arbeitszahl der Wärmepumpe JAZ-WP

$$JAZ_{hww} = \frac{Q_{h_WP} + Q_{ww_WP}}{E_{WP_Komp} + E_{WP_RGL} + E_{WP_UWP_Verd} + E_{WP_UWP_Kond}} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe JAZ-WP weist das Verhältnis der erzeugten Wärme durch die Wärmepumpe zu dem zugehörigen Energiebedarf im Kompressor, in der Regelung und den Ventilatoren und Umwälzpumpen für die Überwindung der internen Druckverluste an Verdampfer und Kondensator aus. Es gelten die Bilanzgrenzen der SN EN 14511 [6].

Wärmeerzeugernutzungsgrad WNG
(äquivalent zum Wirkungsgrad eines Gas- oder Ölkessels)

$$WNG_{hww} = \frac{Q_{h_WP} + Q_{ww_WP} + Q_{hww_EH} + Q_{hww_SOL}}{E_{WP_Komp} + E_{WP_RGL} + E_{WP_UWP_Verd} + E_{WP_UWP_Kond} + E_{EH} + E_{SOL}} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Der Wärmeerzeugernutzungsgrad ist das Verhältnis der von allen Wärmeerzeugern erzeugten Wärme zu dem dazu erforderlichen Energieaufwand.

Systemnutzungsgrad SNG

$$SNG_{hww} = \frac{Q_{h-WHG} + Q_{ww-WHG} + Q_{ve-WHG}}{\sum E_{h-ww-ve}} \quad \text{Gl. 2.3}$$

Der Systemnutzungsgrad ist das Verhältnis der Nutzwärme für Raumheizung, Warmwasser und Lüftung zum gesamten Energieaufwand für alle Komponenten (Wärmeerzeugung, Wärmespeicherung, Wärmeverteilung, Wärmeübergabe und Wärmerückgewinnung).

Definition der Kennzahlen und Auswertungen basierend auf den Messpunkten

Basierend auf der allgemeinen Definition der Kennzahlen und Bilanzgrenzen für die Bewertung einer Wärmeversorgung werden diese nachfolgend auf die mit den Messpunkten erfassbaren Bilanzgrenzen umgesetzt. Der Systemnutzungsgrad wird ohne Lüftungsanlage bestimmt, da diese nicht im Messprogramm enthalten ist.

Die auf den Messpunkten basierenden Kennzahlen und Auswertungen lauten:

- Anteile Nutzwärme: Raumheizung, Warmwasser, Raumkühlung
- Anteile Elektrizitätsbezug: Raumheizung, Warmwasser, Raumkühlung (soweit möglich aufgeteilt auf die Komponenten Wärmepumpe, Umwälzpumpe Erdwärmesonde, Umwälzpumpe Kondensator, Umwälzpumpe Wärmeverteilung & -übergabe und Regelung der Wärmepumpe)
- Wärmeerzeugernutzungsgrad (WNG) Heizung (h) & Warmwasser (ww) durch die Wärmepumpe erzeugte Wärme für Heizung & Warmwasser dividiert durch den elektrischen Energiebezug der Wärmepumpe (WP) inklusive der Umwälzpumpe (UWP) für die Wärmequelle Erdwärmesonde (EWS)

$$WNG_{hww} = \frac{Q_{h-WP} + Q_{ww-WP}}{[E_{WP} - E_{UWP-WVÜ}]_{hww}}$$

$$E_{WP} = E_{Verd} + E_{RGL} + E_{UWP-EWS} + E_{UWP-Kond} + E_{UWP-WVÜ}$$

$$WNG_h = \frac{Q_{h-WP}}{[E_{WP} - E_{UWP-WVÜ}]_h} \quad WNG_{ww} = \frac{Q_{ww-WP}}{[E_{WP} - E_{UWP-WVÜ}]_{ww}}$$

- Systemnutzungsgrad (SNG) Heizung (h) & Warmwasser (ww) in den Wohnungen genutzte Wärme für Raumheizung & Warmwasser dividiert durch den elektrischen Energiebezug der Wärmepumpe (WP) mit den Umwälzpumpen (UWP) für die Erdwärmesonde (EWS), den Kondensator (Kond) und die Wärmeverteilung und -übergabe (WVÜ)

$$SNG_{hww} = \frac{\sum Q_{h-Whg} + \sum Q_{ww-Whg}}{[E_{WP}]_{hww}}$$

$$\sum Q_{h-Whg} = Q_{h-EGW} + Q_{h-EGO} + Q_{h-OGW} + Q_{h-OGO} + Q_{h-AG}$$

$$\sum Q_{ww-Whg} = Q_{ww-EGW} + Q_{ww-EGO} + Q_{ww-OGW} + Q_{ww-OGO} + Q_{ww-AG}$$

$$SNG_h = \frac{\sum Q_{h-Whg}}{[E_{WP}]_h} \quad SNG_{ww} = \frac{\sum Q_{ww-Whg}}{[E_{WP}]_{ww}}$$

- Wärmeeerzeugernutzungsgrad (WNG) Kühlung (k)
abgeführte Wärme an die Erdwärmesonde (EWS) für Raumkühlung (k) dividiert durch den elektrischen Energiebezug der Umwälzpumpe (UWP) für die Erdwärmesonde. Da mit der Sonde nur passiv gekühlt wird, entspricht der Wärmeeerzeugernutzungsgrad (WNG) einem elektrothermischen Verstärkungsfaktor (ETV).

$$WNG_k = \frac{Q_{k-EWS}}{[E_{UWP-EWS} + E_{RGL}]_k}$$

- Systemnutzungsgrad (SNG) Kühlung (k)
abgeführte Wärme aus den Wohnungen dividiert durch elektrischen Energiebezug der Umwälzpumpen für die Erdwärmesonde (EWS), die Wärmeverteilung & -übergabe und den Aufwand für die Regelung (nur passive Kühlung mit Erdwärmesonde)

$$SNG_k = \frac{\sum Q_{k-Whg}}{[E_{UWP-EWS} + E_{RGL} + E_{UWP-WVÜ}]_k}$$

2.4.2 Behaglichkeitsbewertung

Globale Behaglichkeit

Die Raumluft - Temperatur, die relative Luftfeuchte und die Oberflächen - Temperaturen sind die wichtigsten Grössen zur Evaluation der globalen thermischen Behaglichkeit. Die Raumluft- und die Oberflächen – Temperaturen werden häufig zur operativen Temperatur zusammengefasst, wobei sie bei gut gedämmten, massiven Gebäuden jeweils mit 50% gewichtet werden. Im Messprojekt kann mit vertretbarem Aufwand nur die Lufttemperatur, nicht aber die Oberflächen- bzw. Strahlungstemperatur, gemessen werden. Für das betrachtete, gut gedämmte Gebäude mit Flächenheizung bzw. -kühlung wird davon ausgegangen, dass die Oberflächentemperaturen innerhalb der Behaglichkeitsgrenzen liegen, solange die gemessenen Raumlufttemperaturen auch innerhalb der Behaglichkeitsgrenzen liegen. Somit werden die Raumluft – Temperatur, die mittlere Oberflächen – Temperatur damit auch die operative Temperatur als gleich angenommen.

Die Auslegungstemperaturen und angestrebten Temperaturbereiche sind aktuell im SIA Merkblatt 2024 [7] niedergeschrieben. Darin werden für Wohnräume Raumtemperaturen von 21 °C im Winter und 28 °C im Sommer als Auslegungswert angegeben. Die angegebenen Temperaturbereiche liegen im Winter bei 20...24 °C und im Sommer bei 22...28.5 °C. In SN EN ISO 7730 [8] werden Raumtemperaturen im Bereich zwischen 20 °C und 24 °C im Winter sowie zwischen 23 °C und 26 °C im Sommer als thermische Behaglichkeitsklasse Kategorie B beschrieben.

Das im Gebäude „CosyPlace“ zum Einsatz kommende System einer passiven Kühlung über die Fussbodenfläche weicht bewusst von dem Anspruch eines klimatisierten Raumes und den Anforderungen der Kategorie B gemäss ISO EN 7730 ab. Es sollen mit einem möglichst geringen Energieaufwand eine leichte Absenkung der Raumtemperaturen im Sommer sowie eine Vermeidung von Temperaturspitzen erreicht werden. Die angestrebten Raumtemperaturen liegen im Bereich 26...28 °C mit einer Tendenz hin zu 26 °C. Wie gut dies unter welchen Randbedingungen erreicht werden kann, ist bisher vorwiegend theoretisch untersucht worden. Es gibt nur sehr wenige Messwerte dazu. Daher werden im Gebäude „CosyPlace“ diese Messungen durchgeführt.

Lokale Behaglichkeit

Ein weiteres, relevantes Kriterium für die Bestimmung der Behaglichkeit bei der Kühlung mit dem Fussboden ist die einzuhaltende Oberflächentemperatur des Fussbodens. Die Norm SN EN ISO 7730 gibt einen Zusammenhang zwischen dem prozentualen Anteil unzufriedener Personen mit beschuhten Füßen durch warme oder kalte Fussbodenoberflächen und der Oberflächentemperatur des Fussbodens gemäss Abb. 6 an.

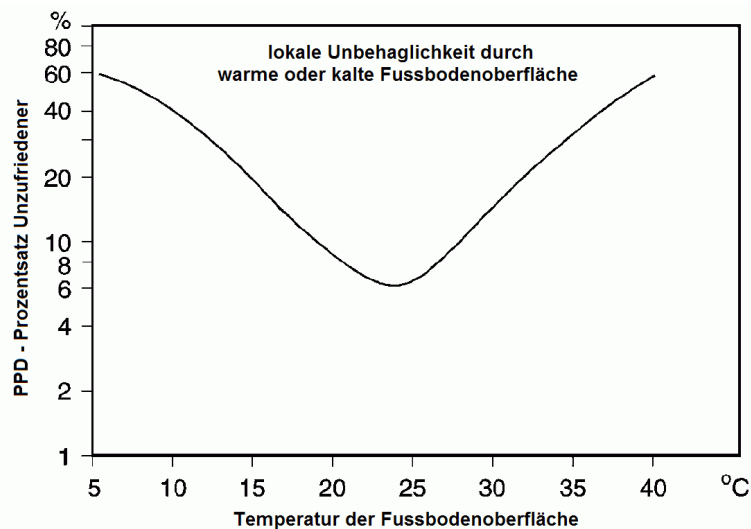


Abb. 6: lokales Unbehagen durch warme oder kalte Oberflächentemperaturen des Fussbodens für beschuhte Füße gemäss SN EN ISO 7730

Neben der Beschreibung in Abb. 6 lassen sich unterschiedliche Hinweise auf das Temperaturempfinden von nackten Füßen abhängig vom Oberflächenmaterial finden (siehe [9]), die in Tab. 2 zusammengefasst sind.

behagliche Fussboden Oberflächentemperaturen			
		min	max
beschuht		19 °C	29 °C
barfuss	Teppich	21 °C	28 °C
	Kiefernholz	23 °C	28 °C
	Eichenholz	24 °C	28 °C
	Linoleum	24 °C	28 °C
	Beton / Estrich	26 °C	28 °C

Tab. 2: Behagliche Fussboden-Oberflächentemperaturen

3 ERGEBNISSE

Für die Ergebnisse wird die Messperiode vom 01. November 2007 bis 31. Oktober 2008 ausgewertet. Dabei werden wegen der aussentemperaturabhängigen, automatischen Umschaltung zwischen Sommer- und Winterbetrieb die Perioden für die Auswertung kalendarisch festgelegt; für die Winterperiode auf den Zeitraum 01.11.2007 – 30.04.2008 und für den Sommerbetrieb auf den Zeitraum 01.05.2008 – 31.10.2008.

In Kapitel 3.1 sollen die wesentlichen Ergebnisse dargestellt werden. In den zwei folgenden Kapiteln dann weitergehende Einzelergebnisse zur Winterperiode (Kap. 3.2) und zur Sommerperiode (Kap. 3.3). Kapitel 3.4 fasst die auf Basis der Messergebnisse abgeleiteten Empfehlungen und Optimierungsmassnahmen zusammen. Alle Messdaten und Auswertungen beziehen sich auf die Wärmeerzeugung und -verteilung mit der Wärmepumpe bzw. der Erdwärmesonde.

Die Lüftungsanlage mit Erdwärmetauscher und Wärmerückgewinnung ist ausgeklammert.

3.1 ÜBERSICHT

3.1.1 Energie

In der Messperiode wurden insgesamt 47'726 kWh Wärme erzeugt bzw. abgeführt, wofür insgesamt 12'855 kWh elektrischer Energie bezogen wurden. Die Verteilung auf die Funktionen Raumheizung, -kühlung und Warmwasser ist in Abb. 7 links für die erzeugte bzw. abgeführte Wärme und rechts für die bezogene Elektrizität dargestellt. Der mit 36'044 kWh, entsprechend 76%, weitaus grösste Anteil Wärme wurde für Raumheizung verwendet. Zur Trinkwarmwasser-Erwärmung wurden 9'604 kWh Wärme bzw. 20% durch die Wärmepumpe geliefert. Die Raumkühlung macht mit 2'078 kWh abgeführter Wärme oder 4% nur einen geringen Anteil aus. Die bezogene Elektrizität zur Raumkühlung macht mit 2% oder 259 kWh einen noch geringeren Anteil aus. Hier zeigt sich schon die hohe Effizienz der passiven Kühlung. Der Anteil Elektrizität für Raumheizung macht 72% oder 9'246 kWh aus. Bei der Warmwasserbereitung, die mit der geringsten Effizienz einhergeht (siehe Tab. 4 in Kapitel 3.1.2), liegt der Anteil im Elektrizitätsbezug bei 26%, was 3350 kWh entspricht.

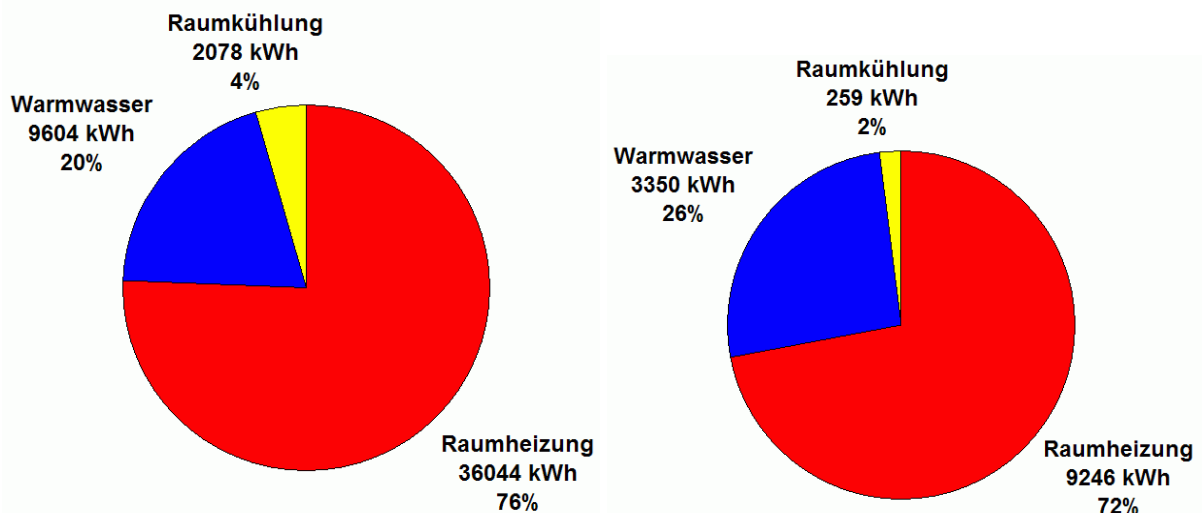


Abb. 7: links: erzeugte Wärme, rechts: bezogene Elektrizität während Messperiode (01.11.2007 – 31.10.2008)

In Tab. 3 sind die erzeugten Wärmemengen und Nutzwärmen für Raumheizung, Raumkühlung und Warmwasser für die Zeiträume Winterperiode, Sommerperiode und die gesamte Messperiode zusammengefasst. Für die Raumheizung und -kühlung werden die erzeugte Wärme und die Nutzwärme als identisch betrachtet, da sich die Wärmeerzeugung innerhalb der Dämmebene befindet und somit die Wärmeverluste der Anlage zur Nutzwärme beitragen. Für die Warmwasserbereitung wird die erzeugte Wärme am Austritt der Wärmepumpe gemessen. Die Nutzwärme Warmwasser wird aus der wohnungsweise gemessenen Zapfmenge und der Austrittstemperatur am Warmwasserspeicher bestimmt.

	Raumheizung erz. Wärme = Nutzwärme	Raumkühlung abgef. Wärme = Nutzwärme	Warmwasser erz. Wärme	Warmwasser Nutzwärme
Winter 07/08	30'414 kWh	0 kWh	4'962 kWh	2'321 kWh
Sommer 08	5'630 kWh	2'078 kWh	4'642 kWh	2'219 kWh
Jahr	36'044 kWh	2'078 kWh	9'604 kWh	4'539 kWh

Tab. 3: erzeugte Wärme und Nutzwärme für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser während der Messperiode (01.11.2007 – 31.10.2008)

In Abb. 8 ist der Elektrizitätsbezug für die gesamte Messperiode weiter aufgeschlüsselt in die Komponenten Wärmepumpe inklusive Regelung und die Umwälzpumpen für die Erdwärmesonde, den Kondensator-Ladekreis und die Fussbodenheizung.

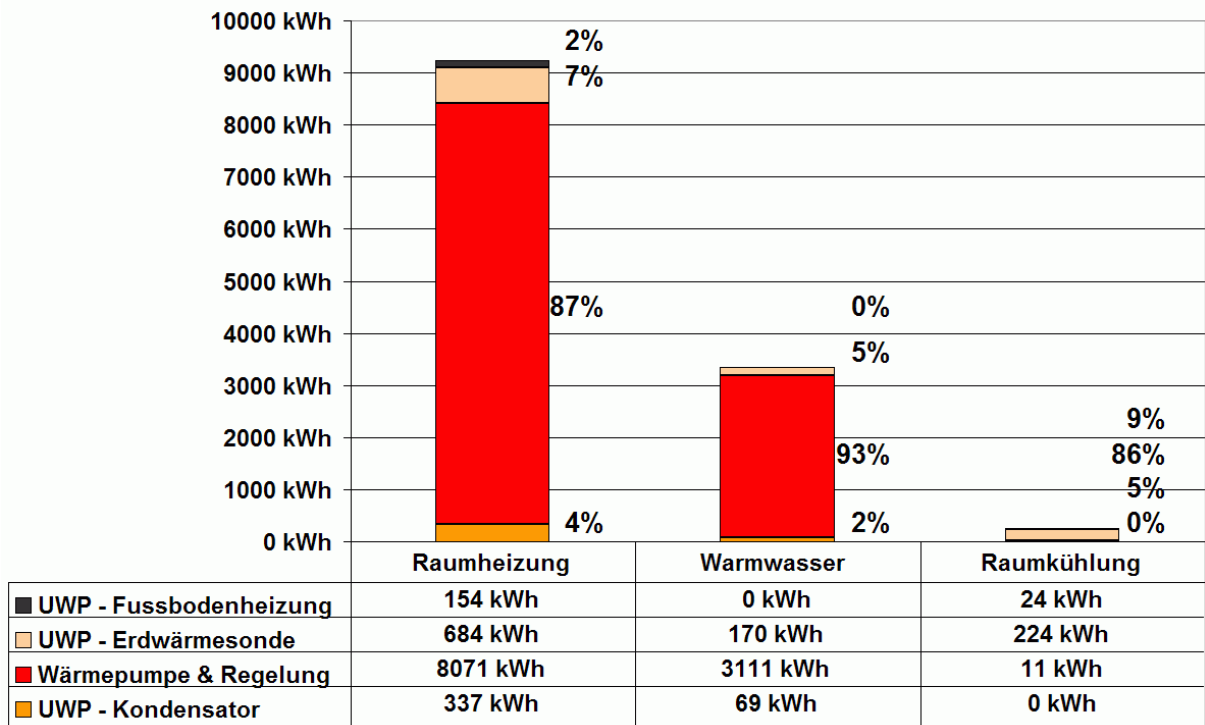


Abb. 8: bezogene Elektrizität aufgeschlüsselt auf die Betriebsarten Raumheizung, Warmwasser, Kühlung sowie die Komponenten Wärmepumpe und die Umwälzpumpen (UWP) während der Messperiode (01.11.2007 – 31.10.2008)

3.1.2 Kennzahlen Energieeffizienz

Der Wärmeerzeugernutzungsgrad ist definiert als erzeugte Wärme durch alle Wärmeerzeuger dividiert durch den Endenergie-Aufwand im Wärmeerzeuger, hier ausschliesslich Elektrizität. Die Definition ist in Kapitel 2.4.1 detailliert angegeben. Für Raumheizung und Warmwasser dient einzig die Wärmepumpe als Wärmeerzeuger. Ein direktelektrischer Heizstab ist nicht im Einsatz. Für die Raumkühlung werden die Umwälzpumpe der Erdwärmesonde und der zeitliche Anteil der Regelung als Aufwand zur Wärmeerzeugung (Kälteerzeugung) gewertet. In Tab. 4 ist der Wärmeerzeugernutzungsgrad für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser aufgeführt.

Im Wärmeerzeugernutzungsgrad für Raumheizung zeigt sich mit einem Wert von 4.0 für die Winterperiode und die gesamte Messperiode der durch die Niedertemperatur – Fussbodenheizung geringe Temperaturhub in der Wärmepumpe und die damit verbundene gute Effizienz. In der kalendarischen Sommerperiode zeigt sich mit einem Wärmeerzeugernutzungsgrad von 3.9 ein geringer Einfluss des Stand-by Energiebedarfs. Die Raumkühlung weist mit einem Wärmeerzeugernutzungsgrad von 8.8 die erwartete hohe Effizienz messtechnisch nach. Trotz einer insgesamt eher geringen abgeführten Wärmemenge zeigt sich eine gute Effizienz im Kühlbetrieb. Im Warmwasserbetrieb weist die Wärmepumpe aufgrund des höchsten Temperaturhubes den geringsten Wärmeerzeugernutzungsgrad von 2.9 übers Jahr auf. Mit einem Wert von 2.6 in der Winterperiode und 3.3 in der Sommerperiode zeigt sich ein starker Einfluss der Wärmequellentemperatur (Erdwärmesondenaustritt). Diese liegt im Winter

hauptsächlich im Bereich 1 °C bis 6 °C im Maximum bis 11 °C und im Sommer wesentlich höher hauptsächlich im Bereich 10 °C bis 15 °C.

	Raumheizung	Raumkühlung	Warmwasser	gesamt
Winter 07/08	4.0	-	2.6	3.7
Sommer 08	3.9	8.8	3.3	4.0
Jahr	4.0	8.8	2.9	3.8

Tab. 4: Wärmeerzeugernutzungsgrad für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser während der Messperiode (01.11.2007 – 31.10.2008)

Der Systemnutzungsgrad ist definiert als Nutzwärme im Gebäude dividiert durch den gesamten Aufwand in Wärmeerzeugung, -verteilung und -übergabe. Dadurch, dass die Lüftungsanlage hier nicht betrachtet wird, unterscheidet sich der Systemnutzungsgrad vom Wärmeerzeugernutzungsgrad nur durch die Umwälzpumpe im Fussbodenkreis und die nicht nutzbaren Wärmeverluste. In Tab. 5 ist der Wärmeerzeugernutzungsgrad für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser aufgeführt.

Der Systemnutzungsgrad für Raumheizung liegt mit 3.9 bzw. 3.8 nur um 0.1 niedriger als der Wärmeerzeugernutzungsgrad. Hierin zeigt sich die geringe elektrische Leistungsaufnahme der elektronisch geregelten, hocheffizienten Synchronmotor-Pumpe im Fussbodenkreis, welche den Gesamtvolumenstrom an die infolge der Raumthermostaten wechselnden Einzelvolumenströme anpassen kann. Dieser Effekt zeigt sich auch im Systemnutzungsgrad der Raumkühlung von 8.0. Die grössere Differenz ist bedingt durch den schon geringen Aufwand zur Wärmeerzeugung alleine von der Umwälzpumpe im Erdwärmesondenkreis und der Regelung.

	Raumheizung	Raumkühlung	Warmwasser	gesamt
Winter 07/08	3.9	-	1.2	3.4
Sommer 08	3.8	8.0	1.6	3.1
Jahr	3.9	8.0	1.4	3.3

Tab. 5: Systemnutzungsgrad für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser während der Messperiode, ohne Lüftungsanlage (01.11.2007 – 31.10.2008)

3.1.3 Saisonaler Verlauf der Erdwärmesonden - Temperatur

Von besonderem Interesse bei der Nutzung einer Wärmepumpenanlage für Heizung, Warmwasser und passive Kühlung ist die Temperatur am Austritt der Erdwärmesonde, da durch diese das Potenzial der passiven Kühlung definiert wird. Abb. 9 und Abb. 10 zeigen für die hier erfasste erste Winterperiode (Abb. 9) und Sommerperiode (Abb. 10) den Verlauf der tagesweise erzeugten Wärme für Heizung und Warmwasser respektiver der abgeführte Wärme im Kühlfall im Zusammenhang mit den Tagesmitteltemperaturen der Aussenluft und der Erdwärmesonde am Eintritt und Austritt im Betrieb. Weiterhin ist exemplarisch die erreichte Raumluft – Temperatur in Wohnung 3 dargestellt. Vom 28.02.2008 bis 31.03.2008 und vom 12. bis 30.05.2008 fehlen die dynamischen Verläufe der Energiegrössen aufgrund eines Ausfalls der M-Bus Erfassung. Vom 30.05.2008 bis 11.06.2008 die dynamischen Temperaturverläufe aufgrund eines Ausfalls der Temperaturerfassung.

Die Austrittstemperatur der Erdwärmesonde in der Winterperiode (Abb. 9) zeigt einen erkennbaren Zusammenhang mit der entzogenen Wärme über mehrere Tage und bewegt sich im Bereich 1.5 °C bis 11.3 °C bei einem Mittelwert von 5.3 °C. Das Minimum der erfassten 15 Minuten - Mittelwerte liegt bei 1.0 °C.

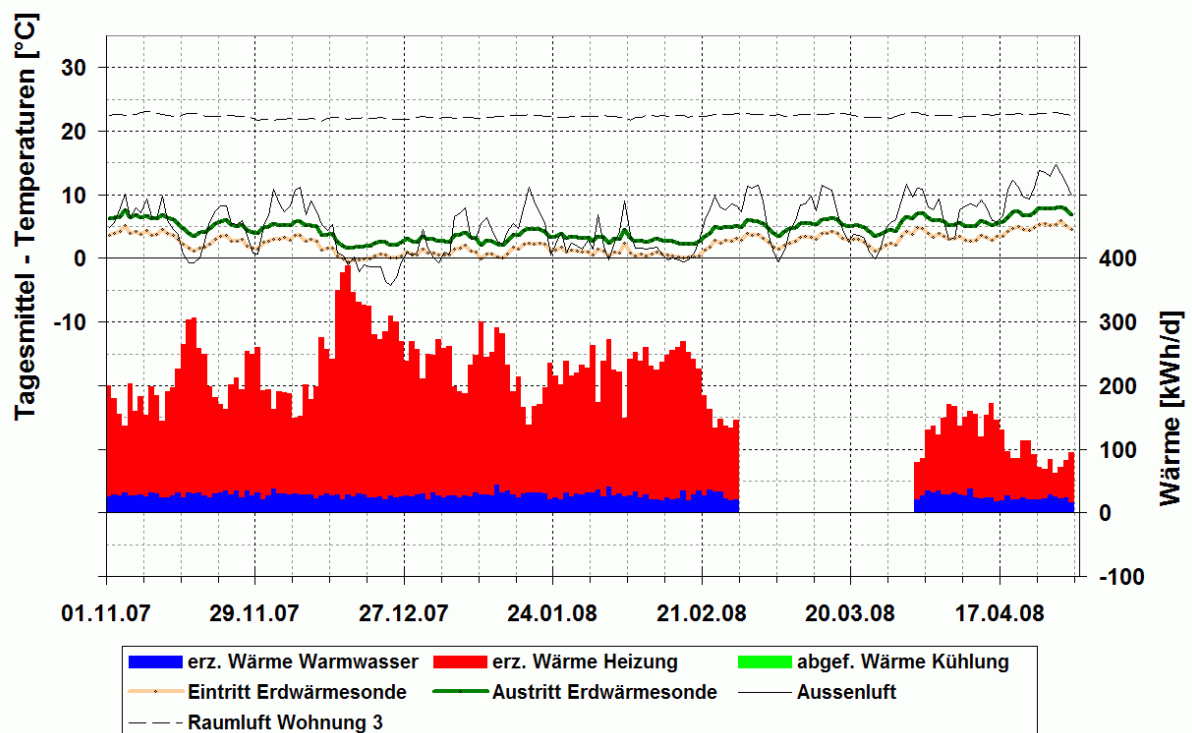


Abb. 9: Saisonaler Verlauf der Erdwärmesonden-Temperaturen in der Winterperiode (01.11.2007 - 30.04.2008)

Der Temperaturverlauf am Eintritt und Austritt der Erdwärmesonde in der Sommerperiode (Abb. 10) zeigt einerseits die Umkehrung zwischen Wärmeentzug und -einspeisung anhand der Umkehrung der Temperaturdifferenz und andererseits den Anstieg der Austrittstemperatur der Erdwärmesonden mit der abgeführten Wärme im Kühlbetrieb.

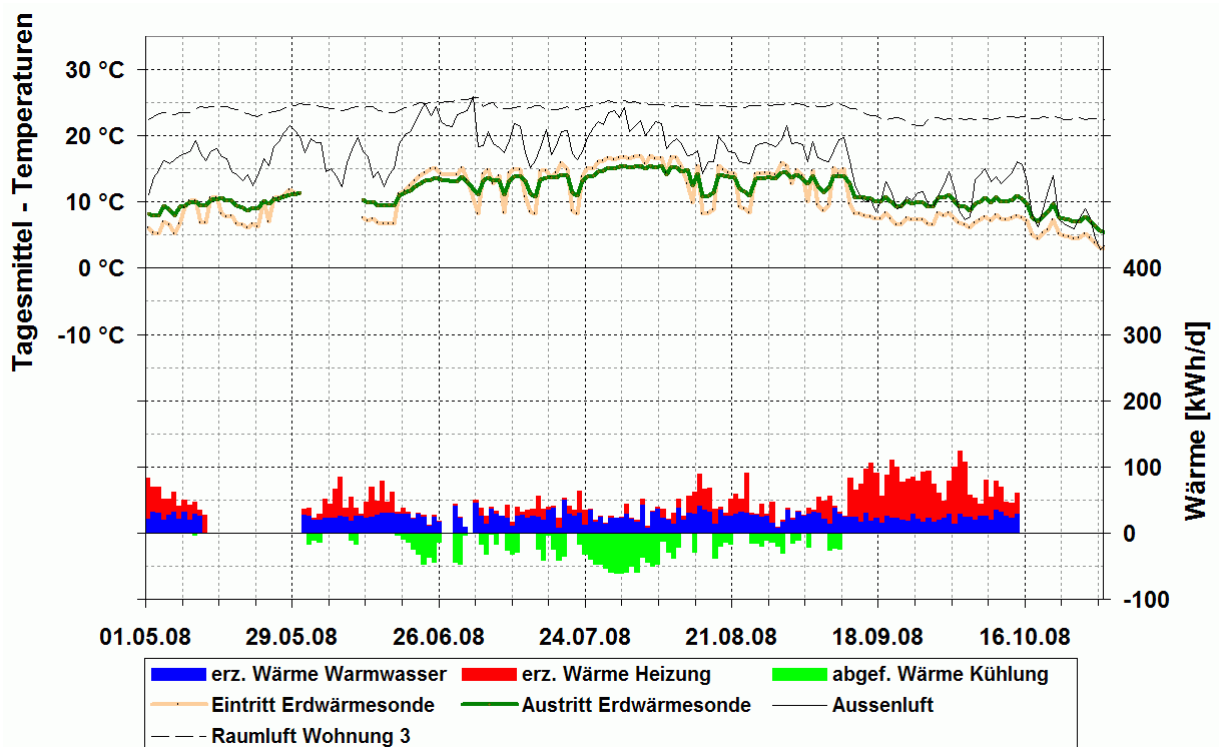


Abb. 10: Saisonaler Verlauf der Erdwärmesonden - Temperaturen in der Sommerperiode (01.05.2008 - 31.10.2008)

So steigt die Tagesmitteltemperatur der Erdwärmesonde im Betrieb von etwa 10 °C ohne Kühlbetrieb Anfang Juni auf 14 °C bis 16 °C im Zeitraum Ende Juni bis Mitte September. Über eine längere

Warmperiode mit Kühlbetrieb Anfang August bleibt die Austrittstemperatur stabil bei 15 °C. An Tagen ohne Kühlbetrieb zeigt sich ein relativ rasches Absinken der Austrittstemperatur auf 11 - 13 °C. Die relativ kurze Mittelungsdauer in der Reglereinstellung zur Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb von 6 Stunden zeigt sich auch darin, dass über die Sommermonate an einigen Tagen Heizwärme erzeugt wird.

3.1.4 Saisonale Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb

Von besonderem Interesse in diesem Projekt ist die saisonale Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb. Zum System Heizen und Kühlen mit erdgekoppelter Wärmepumpe und Fussbodenheizung gibt es bisher wenig praktische Erfahrung. Insbesondere für die Umschaltung zwischen Heizbetrieb und Kühlbetrieb in der Übergangszeit fehlt die praktische Erfahrung, wie eine hohe thermische Behaglichkeit bei gleichzeitig energieeffizienter Betriebsweise erreicht werden kann.

Die Regler - Einstellung für die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erfolgt, wie auch in Kapitel 2.2 beschrieben, anhand einer gleitend gemittelten Aussentemperatur. Dabei wird für den Heizbetrieb eine Hysterese verwendet bei der unterhalb einer Grenztemperatur von 15 °C der Heizbetrieb aktiviert und oberhalb von 20 °C der Heizbetrieb deaktiviert wird. Der Kühlbetrieb wird an einer Grenztemperatur von 24 °C ohne Hysterese aktiviert bzw. deaktiviert. Die Grenztemperaturen beziehen sich auf eine gleitend über 6 Stunden gemittelte Aussentemperatur.

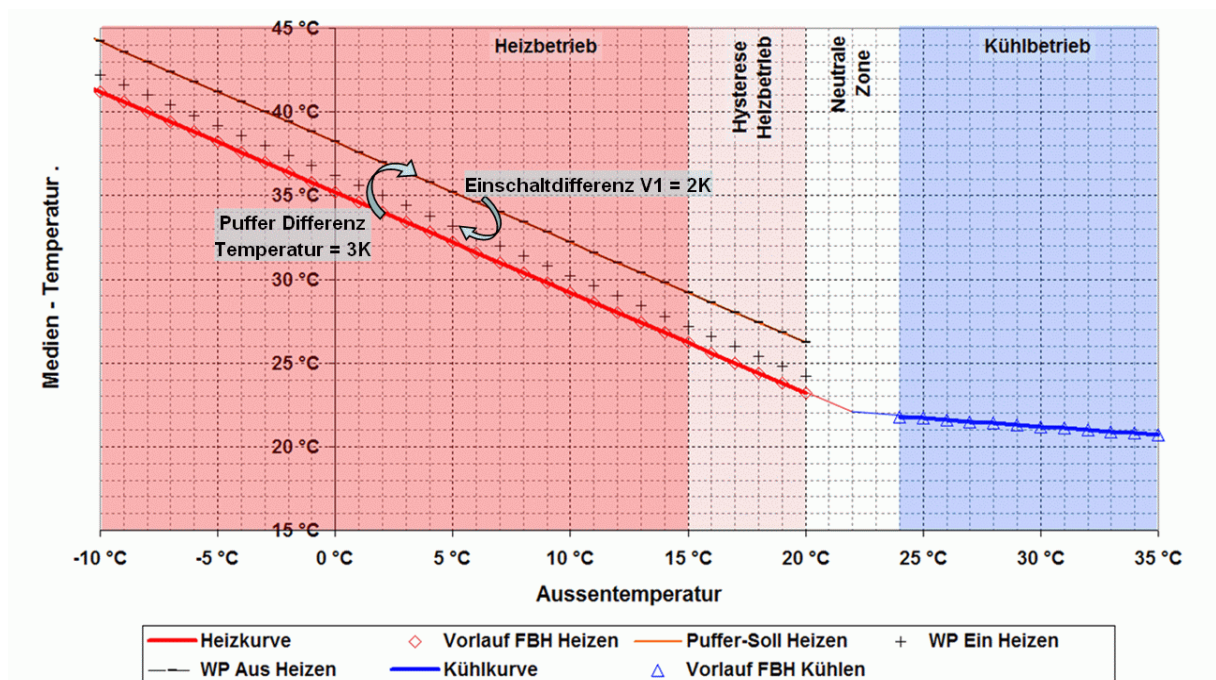


Abb. 11: Regelcharakteristik Heiz- / Kühlbetrieb und saisonale Umschaltung

Mit einer Mittelung der Aussentemperatur über einen Zeitraum von 24 Stunden kann das eher träge Verhalten eines gut isolierten und mit ausreichend Wärmespeicherkapazität ausgestatteten Gebäudes besser in der Regelung abgebildet werden, als mit einem kürzeren Mittelungsintervall. Mit einem längeren Mittelungsintervall verschieben sich jedoch auch die Grenzwerte für die Ein-/Ausschaltung von Heiz- und Kühlbetrieb hin zu niedrigeren Temperaturen. So liegt der maximale 1h-Mittelwert der Aussentemperatur in der Messperiode bei 35 °C der maximale 24h-Mittelwert (Tagesmittel) jedoch bei nur 26.5 °C.

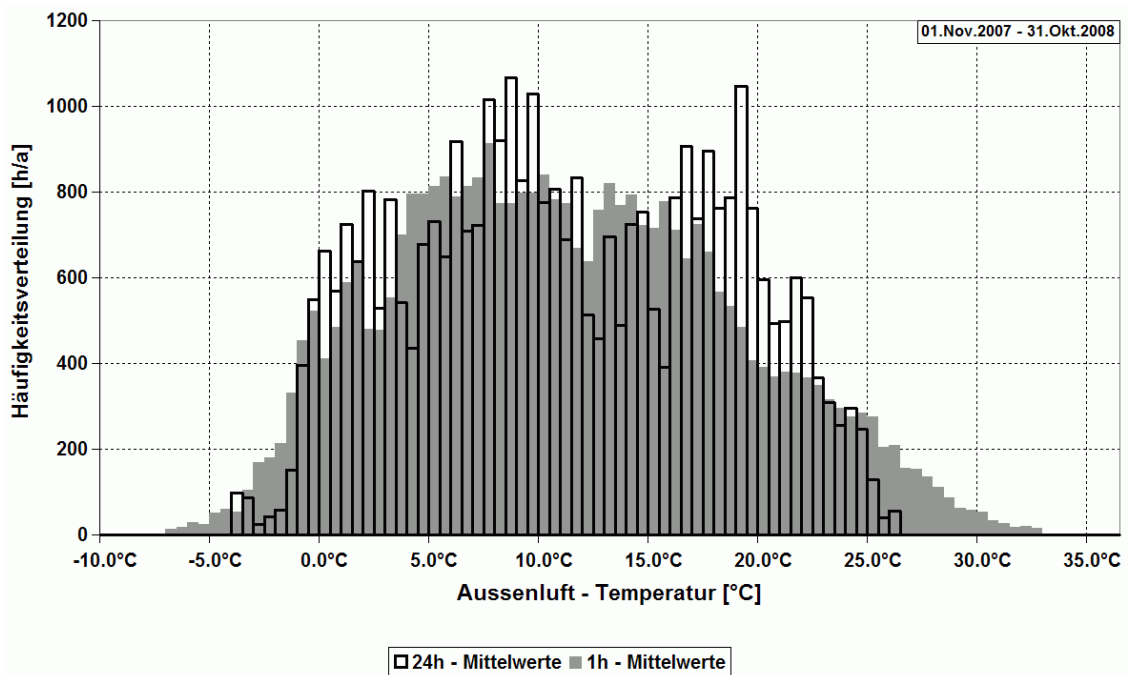


Abb. 12: Häufigkeitsverteilung der Aussenluft – Temperaturen in der Messperiode (01.11.2007 – 31.10.2008)

Die Inbetriebnahme der Wärmepumpe wurde mit dem Schwerpunkt auf der Sicherstellung zufriedenstellender Raumtemperaturen im Winter durchgeführt. Für die am Inbetriebnahme - Prozess beteiligten Personen waren daher die realisierten Temperaturen für die Heizgrenze nicht weiter absenkbar als die oben erwähnte Hysterese mit 15/20 °C. Damit weiterhin ein zu häufiges Wechseln zwischen Heiz- und Kühlbetrieb vermieden wird, muss die Grenztemperatur Kühlbetrieb mit einer Differenz zur Grenztemperatur Heizbetrieb angesetzt werden. Diese Differenz wurde mit 4 K festgelegt. Mit diesen Grenztemperaturen wäre bei einer 24h-Mittelwertbildung die Kühlung praktisch deaktiviert, so dass als Kompromiss eine 6h-Mittelwertbildung angewendet wurde.

Die Messdaten der Wärmepumpe im Heizbetrieb zeigen, dass oberhalb einer Aussenluft – Temperatur von 15 °C nur noch sehr selten Heizwärme erzeugt wird. Eine Interpolation der gemessenen Heizlast (12 h-Mittelwert) zeigt weiterhin, dass die Raumheizlast bei einer Aussenluft – Temperatur von etwa 17 °C auf 0 kW sinkt. Daraus kann gefolgert werden, dass oberhalb einer Aussentemperatur von 17 °C im Gebäude sicher keine Heizwärme mehr benötigt wird und der Heizbetrieb deaktiviert werden kann. Die ist für ein Gebäude nach MINERGIE-P®-Standard immer noch ein hoher Wert, der allerdings mit einer kaufvertraglich geforderten Raumtemperatur von 23 °C für eine Wohnung akzeptiert werden kann.

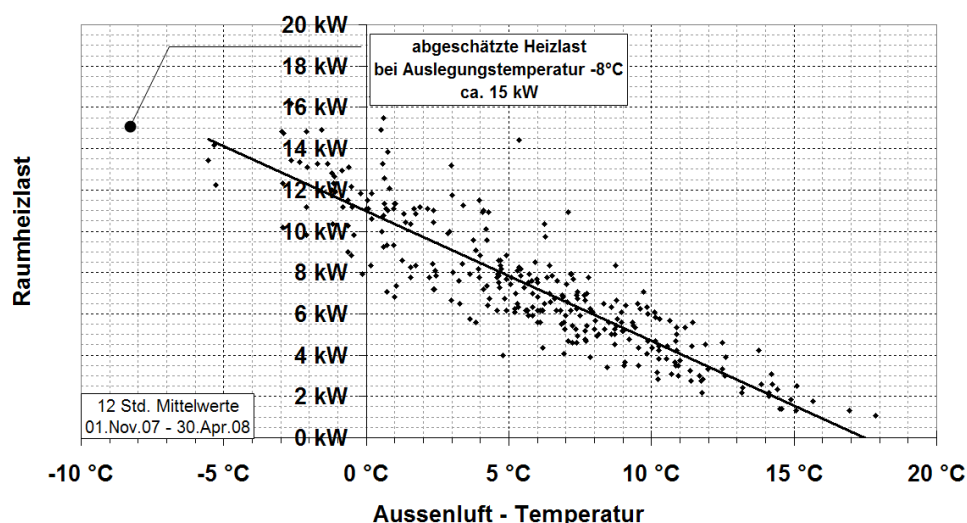


Abb. 13: Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes in Korrelation mit der Aussenluft - Temperatur

Der Kühlbetrieb zeigte einen eher geringen Einsatz der Kühlung mit $7 \text{ MJ/m}^2\text{a}$. Hierin zeigt sich auch der durch die Reglereinstellung gelegte Schwerpunkt auf den Heizbetrieb. Mit der für den Heizbetrieb niedrigeren Grenztemperatur von 17°C kann auch der Grenzwert für den Kühlbetrieb gesenkt werden und damit eine weiter reichende Nutzung der Kühlfunktion erreicht werden.

Es wurde an insgesamt 300 von 366 Tagen Heizbetrieb und an 73 Tagen Kühlbetrieb registriert. Davon war an 42 Tagen zeitversetzt sowohl Heiz- als auch Kühlbetrieb aktiviert. An den Tagen mit sowohl Heiz- als auch Kühlbetrieb wurden insgesamt 475 kWh Wärme zu und kurzzeitig später wieder abgeführt, also unproduktiver Mehrbedarf erzeugt. Dies entspricht 1% des Heizwärmebezugs oder 23% des Kühlenergiebezugs. Der erzeugte elektrische Mehrbedarf beträgt 181 kWh bei einem Systemnutzungsgrad für den Kühlbetrieb von 8.0 und für den Heizbetrieb von 3.9. Das entspricht 1.9% des gesamten elektrischen Energiebezugs für Raumheizung und -kühlung.

Im Weiteren wird als Bewertungsgrösse für die Reichweite von Heiz- und Kühlbetrieb die Häufigkeitsverteilung der 24h-Mittelwerte der Aussentemperatur herangezogen. Auf dieser Basis wird bewertet, in wie weit mit einer gewählten Reglereinstellung der Heizbedarf bzw. Kühlbedarf in kalten bzw. warmen Perioden gedeckt werden kann. Für die bisherige Reglereinstellung ergibt sich dabei die Darstellung in Abb. 14. Bei Aussentemperaturen im Bereich 15°C bis 20°C zeigt sich eine Überschneidung des Heiz- und Kühlbetriebes, welche den 42 Tagen entspricht, an denen zeitversetzt sowohl Heiz- als auch Kühlbetrieb aktiviert ist. Weiterhin werden durch den Kühlbetrieb nicht alle Stunden bei warmen Aussentemperaturen abgedeckt.

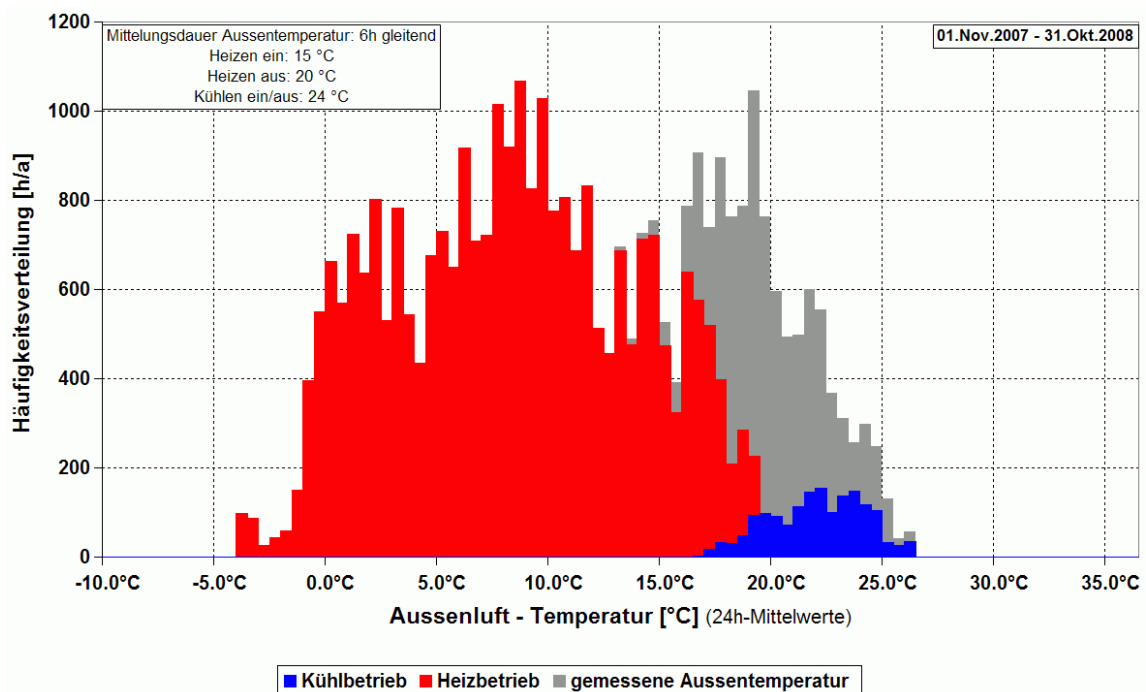


Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der Heiz- / Kühlbetriebsstunden nach den Reglergrundeinstellungen in Korrelation mit der Aussentemperatur dargestellt für die Messperiode (01.11.2007 – 31.10.2008)

Mit einer Optimierung der Reglereinstellungen kann sowohl die Nutzung der Kühlfunktion gesteigert werden als auch der unproduktive wechselnde Heiz- und Kühlbetrieb vermieden werden. Basierend auf einer Parameterstudie werden folgende Einstellungen empfohlen:

- eine gleitende Mittelwertbildung über 24 Stunden (vorher 6 Stunden)
- Grenztemperaturen Heizbetrieb: ein, wenn $T_{A,24h} < 15^\circ\text{C}$ (vorher 15°C)
aus, wenn $T_{A,24h} > 17^\circ\text{C}$ (vorher 20°C)
- Grenztemperatur Kühlbetrieb: ein, wenn $T_{A,24h} > 20^\circ\text{C}$ (vorher 24°C)

Damit ergibt sich das Bewertungsdiagramm in Abb. 15. Die Überschneidung von Heiz- & Kühlbetrieb am gleichen Tag wird vollständig vermieden. Oberhalb einer Aussentemperatur von 20°C werden durch den Kühlbetrieb alle Stunden bei warmen Aussentemperaturen abgedeckt.

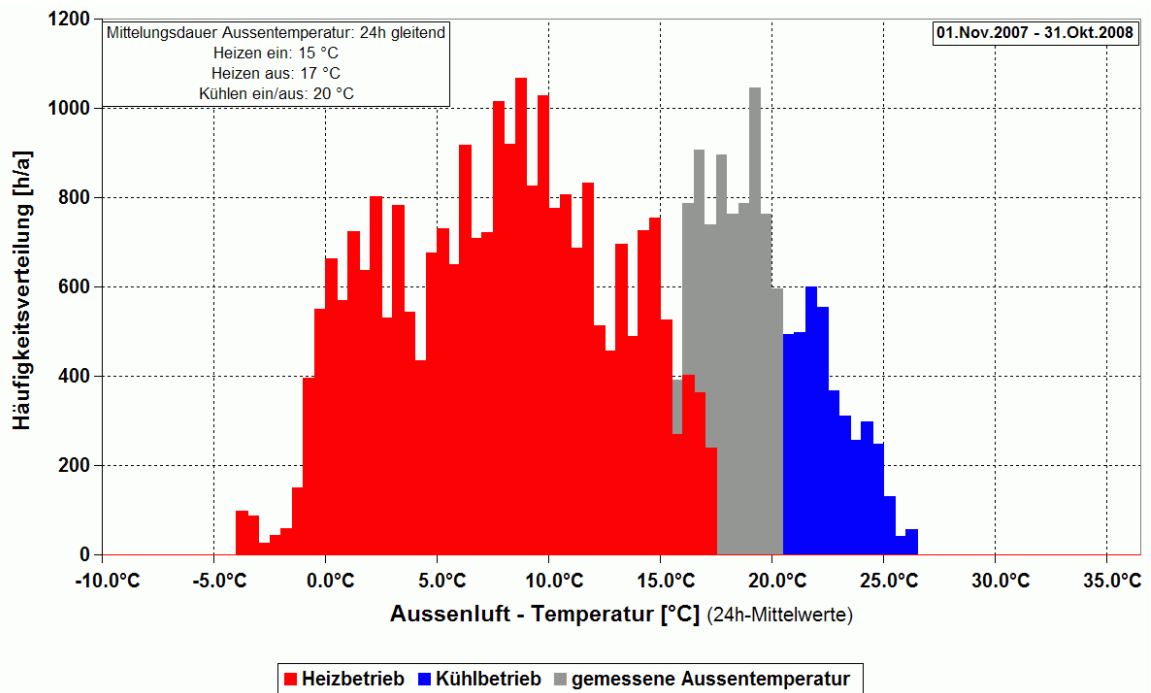


Abb. 15: Häufigkeitsverteilung der Heiz- / Kühlbetriebsstunden nach Optimierung in Korrelation mit der Aussenlufttemperatur dargestellt für die Messperiode (01.11.2007 – 31.10.2008)

3.1.5 Nutzerzufriedenheit

Gesamthaft kann aus den mündlichen und schriftlichen Rückmeldungen der Bewohner geschlossen werden, dass sie mit der thermischen Behaglichkeit insgesamt zufrieden sind. Die Raumtemperaturen werden als angenehm und gleichmässig empfunden. Die Raumluft – Feuchte wird im Winter teilweise als zu gering wahrgenommen. Die Messdaten zur Raumluft – Temperatur und – Feuchte sind im Kapitel 3.2.3 für die Winterperiode und im Kapitel 3.3.3 für die Sommerperiode wiedergegeben.

Der Bewohnerschaft von Wohnung 3 sind über die allgemeinen Angaben hinaus folgende Punkte aufgefallen. Die Fussbodenheizung wird in der Heizperiode nur sehr schwach, der Fussboden teilweise als zu kalt wahrgenommen. Die Einhaltung der sommerlichen thermischen Behaglichkeit wird mit einer starken Verschattung an den grossen Süd-orientierten Fenstern erreicht. Die zusätzliche Kühlfunktion wird nicht bewusst wahrgenommen.

Die Bewohnerschaft von Wohnung 1 merkt knapp ausreichende bis teilweise zu geringe Raumtemperaturen im Winter an. Weiterhin wird eine stickige und zu warme Raumluft im Sommer angemerkt. Dabei werden Raumtemperaturen von 26 °C als zu warm empfunden.

Zeitweise wird auf den Nord-orientierten Fenstern durch einen Beschlag auf der Aussenseite der Fensterscheiben die Aussicht über die Stadt und Richtung Schwarzwald beeinträchtigt. Über Umfang und Dauer können hier keine belastbaren Angaben gemacht werden.

3.2 WINTERPERIODE

Die Auswertung der Winterperiode wird für den Zeitraum 01. Nov. 2007 bis 30. Apr. 2008 vorgenommen, wobei 3 von 5 Wohnungen von zusammen 5 Erwachsenen und 1 Kleinkind bewohnt waren.

3.2.1 Energie

Abb. 16 zeigt links die erzeugte Wärme der Wärmepumpe sowie rechts die zur Erzeugung der Wärme bezogene Elektrizität. Für Warmwasser wurden von der Wärmepumpe 4'962 kWh Wärme erzeugt. Daraus ergibt sich eine spezifische Warmwasserbereitstellung von 4.96 kWh/Person/Tag bzw. ein Verbrauch von 61 l/Person/Tag bei einer mittleren Zapftemperatur von 55 °C. Das entspricht einem eher hohen Bedarf in einem typischen Bereich. Die erzeugte Wärme für Warmwasser beträgt in der Winterperiode 14 % der insgesamt erzeugten Wärme. Für Raumheizung wurden 30'414 kWh oder 86 % der Wärme erzeugt.

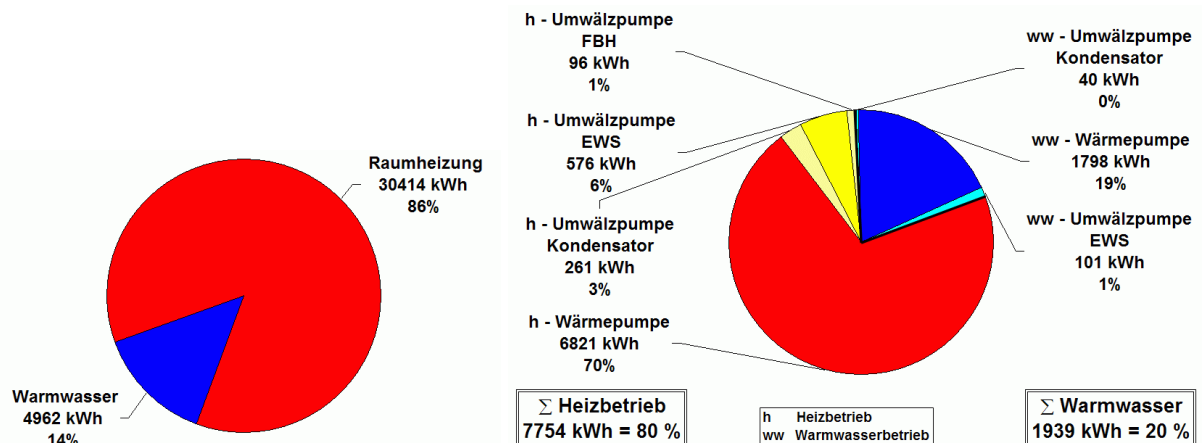


Abb. 16 links: erzeugte Wärme für Winterperiode, rechts: bezogene Elektrizität für Winterperiode (01.11.2007 – 30.04.2008)

Die aus der erzeugten Heizwärme resultierende spezifische erzeugte Raumwärmezufuhr liegt mit 103 MJ/m²/a verglichen mit dem rechnerischen Heizwärmebedarf gemäss SIA380/1 von 36 MJ/m²/a deutlich höher. Im Nachweis MINERGIE-P® wird der Standardwert der Jahresarbeitszahl für eine erdgekoppelte Wärmepumpe von 3.1 angesetzt. Mit dem Gewichtungsfaktor von 2 für elektrische Energie ergibt sich daraus ein gewichteter Endenergiebedarf für Heizung von 6.5 kWh/m²/a. Aus den Messdaten ergibt sich eine Jahresarbeitszahl für Heizung von 4.2, woraus ein gewichteter Endenergiebezug von 13.6 kWh/m²/a resultiert. In der gewichteten Endenergie, dem Mass für die dem Gebäude zugeführten Energie, stellt sich die Abweichung somit deutlich geringer dar als im Heizwärmebezug. Mögliche Ursachen für die Abweichung im Heizwärmebezug werden in Kapitel 3.2.4 anhand einer Sensitivitätsanalyse der Heizwärmebedarfsberechnung nach SIA 380/1 für den Nachweis MINERGIE-P® diskutiert. Anhand der aus den Messungen ableitbaren Randbedingungen wird eine realitätsnahe Rechenvariante abgeleitet. Offenkundige, mögliche Ursachen sind die höheren Raumtemperaturen, die Gebäudeaustrocknung in der ersten Heizperiode und eine aussergewöhnliche Belegung, da zwei Wohnungen noch nicht bezogen waren und die Bauarbeiten am Innenausbau bei geöffneten Fenstern während der Messungen weiterliefen. Eine weitere Aussage darüber, in wie weit der Heizwärmebedarf des Gebäudes mit dem berechneten Heizwärmebedarf übereinstimmt, soll die zweite Heizperiode zeigen, in der das Gebäude bestimmungsgemäss genutzt wird.

Die bezogene Elektrizität zur Erzeugung der Wärme verteilt sich zu 70 % bzw. 6'821 kWh auf die Wärmepumpe im Heizbetrieb, zu 19 % bzw. 1'798 kWh auf die Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb und zu 11 % auf die Umwälzpumpen. Die Umwälzpumpe der Fussbodenheizung hat mit nur 1 % einen sehr geringen Anteil am Elektrizitätsbezug. Diese Pumpe ist im Gegensatz zu den anderen Umwälzpumpen eine elektronisch geregelte hocheffiziente Synchronmotor-Pumpe, welche für die dynamischen Einsatzbedingungen mit wechselnden Massenströmen durch die Raumthermostaten optimal eingesetzt ist.

3.2.2 Kennzahlen Energieeffizienz

Abb. 17 zeigt Wochenmittelwerte des Wärmeerzeugernutzungsgrades für Heizung und Warmwasser. Der Wärmeerzeugernutzungsgrad ist das Verhältnis aus erzeugter Wärme durch die Wärmepumpe

und dem dafür notwendigen elektrischen Aufwand der Wärmepumpe inklusive Umwälzpumpen für die Erdwärmesonde sowie den Kondensator, da ein Pufferspeicher vorhanden ist. Der Wärmeerzeugernutzungsgrad im Warmwasserbetrieb liegt bei ungefähr 2.5, im Heizbetrieb bei 3.7 bis 4.3 und über beide Betriebsarten gewichtet bei 3.5 bis 3.9.

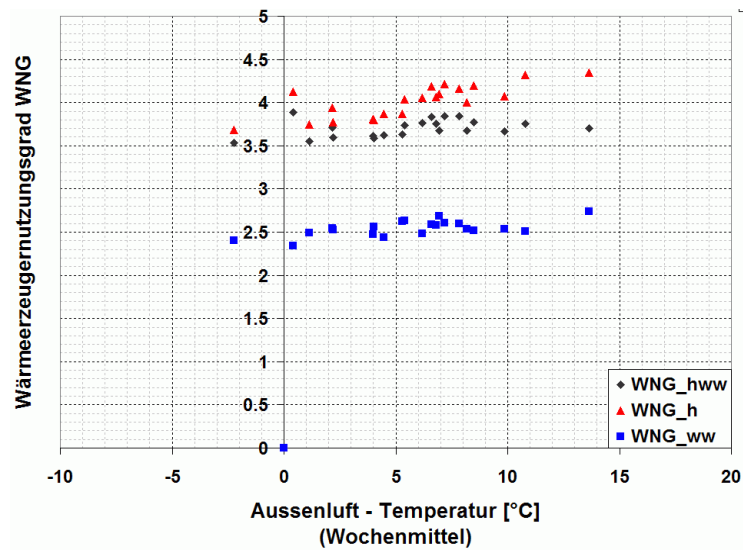


Abb. 17: Wärmeerzeugernutzungsgrad (WNG) der Wärmepumpe im Heiz- und Warmwasserbetrieb (01.11.2007 – 30.04.2008)

3.2.3 Raumkonditionen

Die Häufigkeitsverteilung der Raumtemperaturen in der Winterperiode, dargestellt in Abb. 18 links, zeigt, dass die Raumtemperaturen in den Wohnungen grösstenteils deutlich höher liegen als die in der Normrechnung angesetzten 20 °C. Die Raumtemperatur in Wohnung 1 hat über die Heizperiode einen Mittelwert von 20.0 °C, was dem Rechenwert entspricht, und eine Standardabweichung von 1.2 °C. Das 10% - Quantil liegt bei 18.5 °C, das 90% - Quantil bei 21.1 °C. Die Messwerte im Bereich 16...18°C sind zeitlich zusammenhängend (24. Dez. 07 - 09. Jan. 08) bei Aussentemperaturen zwischen -3°C und ca. 10°C und machen zusammen etwa 10% aus. In Wohnung 3 wurde eine Mitteltemperatur von 22.4 °C registriert mit einer Standardabweichung 0.4 °C, in Wohnung 5 eine Mitteltemperatur von 23.3 °C mit einer Standardabweichung von 0.5 °C.

Die relative Feuchte der Raumluft, dargestellt in Abb. 18 rechts, liegt für Wohnung 1 zwischen 30 %_{r.F.} und 55 %_{r.F.}, bei einem Mittelwert von 45 %_{r.F.}. In Wohnung 3 und Wohnung 5 beträgt die gemessene Raumluftfeuchte im Mittel 31 %_{r.F.}, wobei der Bereich in Wohnung 3 von 20 %_{r.F.} bis 45 %_{r.F.} reicht und in Wohnung 5 von 20 %_{r.F.} bis 50 %_{r.F.}. Zu jeweils etwa 45 % der Zeit liegen die Werte für Wohnung 3 & 5 unterhalb von 30 %_{r.F.} und sind damit eher niedrig.

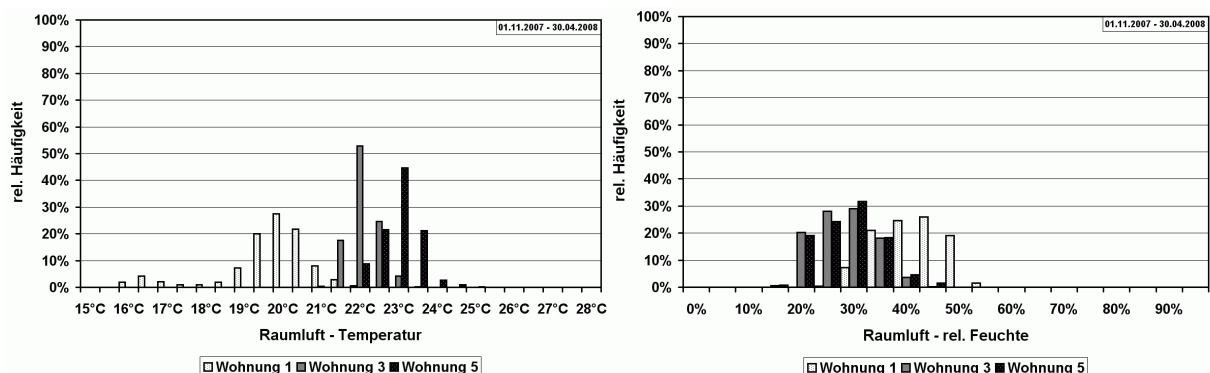


Abb. 18 Häufigkeitsverteilung in der Winterperiode (01.11.2007 – 30.04.2008) für die Wohnungen 1, 3 & 5
links: Temperaturen der Raumluft, rechts: rel. Feuchte der Raumluft

3.2.4 Sensitivitätsanalyse der Heizwärmebedarfsberechnung nach SIA380/1

Aufgrund der deutlichen Abweichung der gemessenen, erzeugten Heizwärme von dem planerischen Wert gemäss Rechenverfahren SIA380/1 [10] für den Nachweis MINERGIE-P® [11] wird im Folgenden eine Sensitivitätsanalyse der Parameter Luftwechsel, Raumtemperatur, Personenbelegung, Regelung, Elektrizitätsverbrauch, Beschattung und Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes durchgeführt. Es soll aufgezeigt werden, in wie weit sich die Diskrepanz mit möglichst realen Eingangsgrössen für den Berechnungsprozess erklären lässt.

Einfluss der Randbedingungen und Anpassung an Messdaten

Hierfür wurden die Randbedingungen der Berechnung nach SIA 380/1 für den MINERGIE-P® Nachweis soweit möglich mit den aus Messdaten bestimmten Werten der Realität angepasst. Die untenstehenden Abbildungen Abb. 19 bis Abb. 25 zeigen die Sensitivität des Heizwärmebedarfes Q_h auf diese Parameter. Enthalten sind auch die Werte gemäss MINERGIE-P® Nachweis und die aus den Messungen abgeleiteten, angepassten Werte.

Der MINERGIE-P® Standardwert für den Luftwechsel beträgt $0.27 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Aus den Volumenströmen in den Luft-Erdreich-Wärmetauschern lässt sich der thermisch wirksame Luftwechsel der Lüftungsanlage zu $0.125 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ berechnen. Inklusive dem Luftwechsel durch Gebäudeundichtigkeiten und den im Baubetrieb offenstehenden Fenstern und Türen wurde der tatsächliche Luftwechsel auf $0.35 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ geschätzt. Dieser erhöhte Luftwechsel ergibt einen Mehrbedarf von $5 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{a}$. Allerdings handelt es sich hierbei insgesamt auch nur um eine Abschätzung für einen Parameter, der den Heizwärmebedarf massgeblich beeinflusst, da der tatsächliche Luftwechsel über Fensteröffnungen und Baubetrieb nicht bekannt ist.

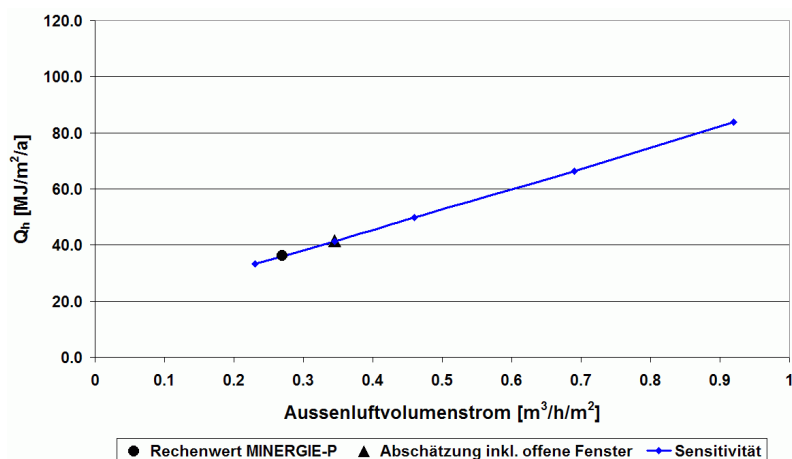


Abb. 19: Sensitivität des Luftwechsels in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Die aus Messdaten bestimmte mittlere Temperatur im Gebäudeinnern beträgt 22°C . Die Sensitivität des Wärmebedarfs auf die Raumtemperatur liegt bei rund 15% Verbrauchszunahme pro $^\circ\text{C}$ Temperaturänderung. Durch die erhöhten Raumtemperaturen entsteht ein Mehrverbrauch von $11 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{a}$.

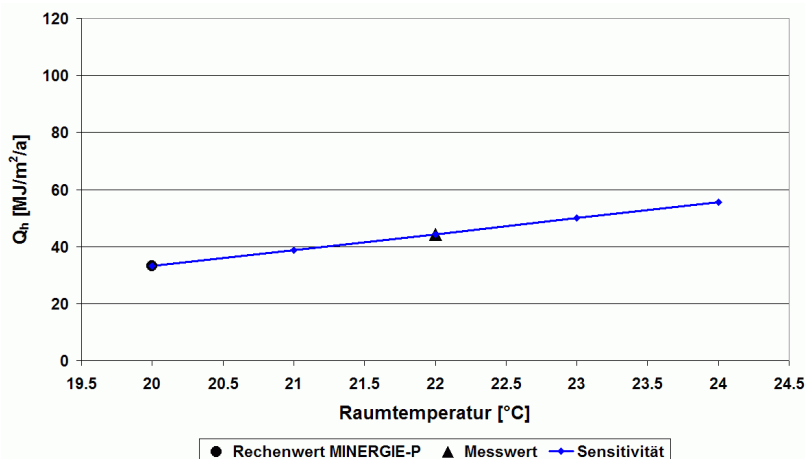


Abb. 20: Sensitivität der Raumtemperatur in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Die Qualität der Heizungsregelung lässt sich durch die Messungen nur insofern bestimmen, als dass alle vermessenen Räume die gewünschte Solltemperatur erreichten. Im betrachteten Gebäude arbeitet die Regelung also gut, weshalb auch in der angepassten Berechnung ein Reduktionsfaktor Regelung von 1 verwendet wurde. Die starke Sensitivität auf den Reduktionsfaktor für die Regelung zeigt Abb. 21.

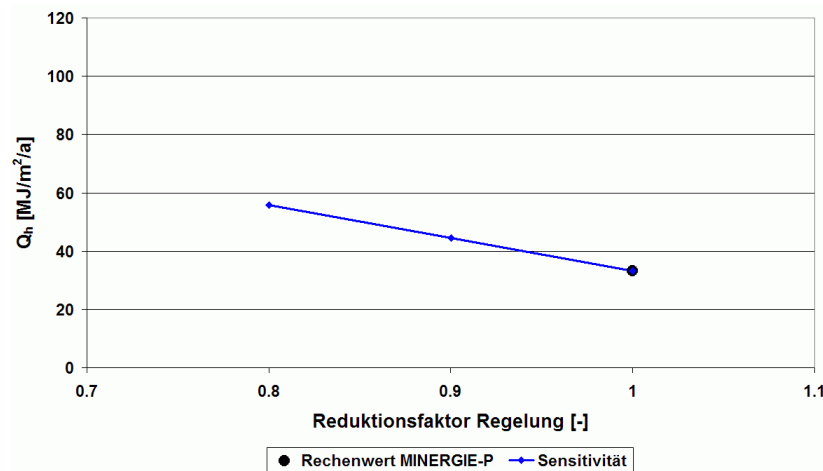


Abb. 21: Sensitivität des Reduktionsfaktors Regelung in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Verglichen mit der Standardnutzung gemäss MINERGIE-P® fällt der Flächenbedarf pro Bewohner mit 193 m²/Pers., insbesondere verursacht durch zwei leerstehende Wohnungen, massiv höher aus. Damit lässt sich ein Mehrverbrauch von 8 MJ/m²/a erklären.

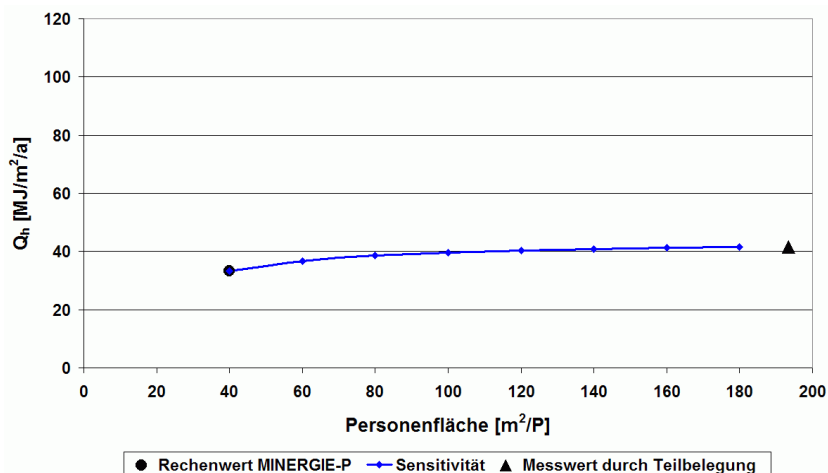


Abb. 22: Sensitivität der Personenfläche in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Der tatsächliche Elektrizitätsverbrauch für jede Wohnung sowie allgemein zugängliche Räume ist aus Messungen bekannt. Der elektrische Energiebezug von Wärmepumpe und Lüftungsanlage muss dabei berücksichtigt werden, er wird der jeweiligen Anlage und nicht dem allgemeinen Elektrizitätsverbrauch zugerechnet. Durch den aktiven Baubetrieb fällt der Bezug an elektrischer Energie gegenüber normaler Nutzung möglicherweise höher aus. Verglichen mit dem MINERGIE-P® Standardwert von 60 MJ/m²/a liegt der gemessene Verbrauch mit 44 MJ/m²/a trotzdem nennenswert tiefer (Abb. 23).

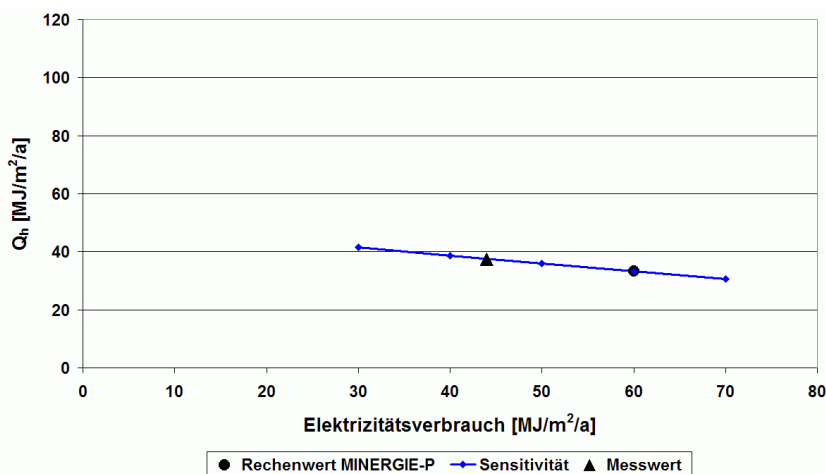


Abb. 23: Sensitivität des Elektrizitätsverbrauchs in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Die reale Beschattung der Fenster kann nicht aus Messdaten bestimmt werden. Mit dem im Nachweis errechneten Beschattungsfaktor von 0.51 für den Horizont erscheint die Verschattung als zu schwach angesetzt. Zudem kann aus den Aussagen der Bewohner über die Benutzung der Storen geschlossen werden, dass die reale Beschattung höher liegen muss als die in der Berechnung angenommene Beschattung alleine durch die Umgebung und auskragende Bauteile. Im Gegensatz zum verwendeten Wert von 0.51 gemäss Nachweis MINERGIE-P® wurde ein Wert von 0.4 angesetzt.

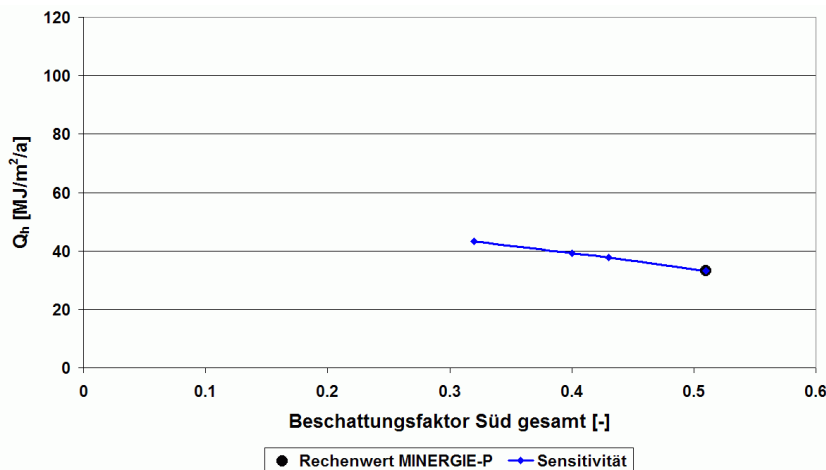


Abb. 24: Sensitivität des Beschattungsfaktors Süd in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes liesse sich nur mit grösserem Aufwand theoretisch berechnen. Wie Abb. 25 jedoch zeigt, beeinflusst diese Grösse den Heizwärmebedarf in der Rechnung im vorliegenden Fall massiver Bauweise ohnehin kaum.

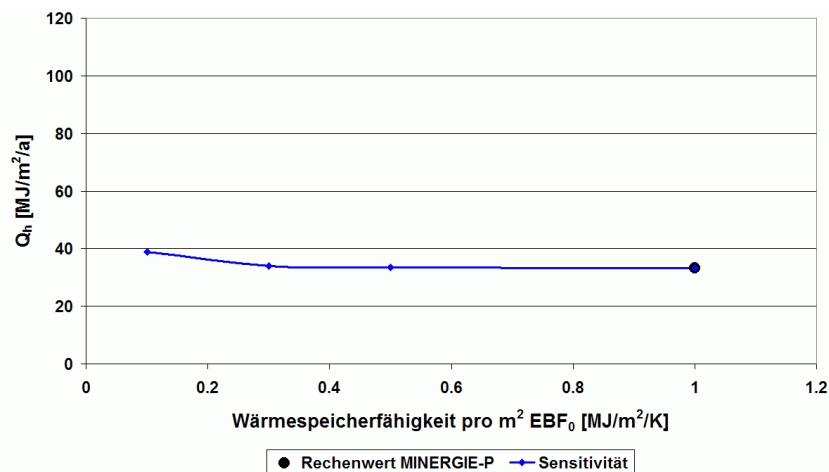


Abb. 25: Sensitivität der Wärmespeicherfähigkeit in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Die untenstehende Tabelle Tab. 6 zeigt die Unterschiede der Eingangsgrössen in die Bedarfsberechnung sowie den daraus resultierenden Einfluss auf den nach MINERGIE-P® berechneten Heizwärmebedarf.

	Rechenwert MINERGIE-P®	real bzw. geschätzt	Einfluss auf Q _h
Luftwechsel [m³/h/m²]	0.27	0.35	+5 MJ/m²/a
Raumtemperatur [°C]	20	22	+11 MJ/m²/a
Regelung [-]	1	1	-
Personenbelegung [m²/P]	40	193	+9 MJ/m²/a
Elektrizitätsverbrauch [MJ/m²/a]	60	44	+4 MJ/m²/a
Beschattung [-]	0.51	0.40	+6 MJ/m²/a
Wärmespeicherfähigkeit [MJ/m²/K]	1	1	-
Q_h [MJ/m²/a]	36	71	+35 MJ/m²/a

Tab. 6: Vergleich der Bedarfsberechnung der Heizwärme nach SIA 380/1 gerechnet mit MINERGIE-P Standardwerten respektive real gemessenen Werten

Mit den an die Messwerte angepassten Randbedingungen lässt sich ein rund doppelt so hoher Wärmebedarf wie mit Standardwerten nachvollziehen. Vergleicht man mit dem tatsächlichen Verbrauchswert der ersten Heizperiode von 103 MJ/m²/a, so bleibt noch immer ein Unterschied von rund 32 MJ/m²/a.

Schlussfolgerung

Der Vergleich zwischen MINERGIE-P® Standardwerten und den gemessenen Werten als Eingangsgrössen für die Bedarfsberechnung zeigt, dass eine wesentliche Erhöhung des Heizwärmebedarfs Q_h insbesondere durch die erhöhte Raumtemperatur, die markant grössere Personenfläche und den erhöhten Luftwechsel verursacht wird. Gerade die Abschätzung des Luftwechsels, welcher einen grossen Einfluss auf den Heizwärmebedarf hat, gelingt aber nur grob.

3.2.5 Dynamisches Verhalten im Winterbetrieb

Passt die Heizkurve zum Gebäude?

Nach Aussage des Heizungsplaners wurde die Fussbodenheizung auf eine Vorlauftemperatur von 30 °C bei einer Aussentemperatur von -8 °C und einer Raumtemperatur von 20 °C ausgelegt. Bei der Inbetriebnahme der Heizungsanlage wurde die Anlage auf eine Vorlauftemperatur von 40 °C bei einer Aussentemperatur von -8 °C und einer bestellten Raumtemperatur von 23 °C eingestellt. Die erhöhte Raumtemperatur von 23 °C anstelle 20 °C führt rechnerisch allerdings nur zu einer Vorlauftemperatur von 34.1 °C anstelle 30 °C, wobei der Rücklauf auf 28.5 °C anstelle 25 °C steigt. Mit dem Vorhandensein von Raumthermostaten wird jedoch eine zu hohe Vorlauftemperatur durch den Eingriff der Raumthermostaten korrigiert. Diese Korrektur tritt allerdings mit einer zeitlichen Verzögerung ein, die durch die Wärmespeicherfähigkeit des Bodens und die damit verzögerte Aufheizung des Raumes bedingt ist. Die eingestellte Heizkurve ist im Auslegungspunkt also um 6 °C höher eingestellt als die rechnerisch notwendige Heizkurve. Mit einer 2% besseren Effizienz je Grad niedrigerer Vorlauftemperatur in der Wärmepumpe besteht ein Effizienzsteigerungspotenzial von gut 10%.

Wird der Pufferspeicher im Heizbetrieb sinnvoll betrieben?

Im Fall des passiven Kühlbetriebs mit der Erdwärmesonde und dem Fussbodenheizkreis wird die Regelung der Kühlleistung über eine zentrale Beimischschaltung realisiert (siehe Hydraulikschaltung in Abb. 4). Dadurch wird für die Wärmepumpe im Heizbetrieb ein Pufferspeicher notwendig, der die konstante, erzeugte Wärmeleistung der Wärmepumpe abnehmen kann und zu ausreichend langen Betriebszeiten der Wärmepumpe im Heizbetrieb führen soll. Der Heizungspufferspeicher wird in dieser Anlage gleitend mit der Aussentemperatur gefahren. Über die Beimischschaltung wird dann die Vorlauftemperatur im Fussbodenkreis (FBH) aussentemperaturgeführt geregelt.

Die registrierte Anzahl Verdichterstarts war relativ hoch. Aus den Messdaten der Winterperiode zeigte sich weiter, dass die Wärmepumpe (WP) pro Einschaltung im Heizbetrieb (RH) nur auf eine mittlere Laufzeit von 21 min kommt und zu oft ein- und wieder ausschaltet (siehe auch Abb. 26, unten). Dies wird vermutlich durch den mit 325 Litern recht kleinen Pufferspeicher für eine Wärmepumpenleistung von 15.5 kW (Betriebspunkt B0/W35) mit zu kleiner Hysterese von 2 K hervorgerufen. Mit der Beimischschaltung zum Fussbodenkreis könnte der Pufferspeicher mit einer grösseren Hysterese betrieben werden. Bei gleichzeitiger Absenkung der Heizkurve, wie im vorhergehenden Abschnitt dargelegt, könnte eine Erhöhung der Wärmepumpen - Vorlauftemperatur vermieden werden. Weiterhin zeigt Abb. 26, dass die Wärmepumpe dank einer Hochtemperaturschaltung im Warmwasserbetrieb (WW) recht hohe Vorlauftemperaturen von bis zu 64 °C erreicht.

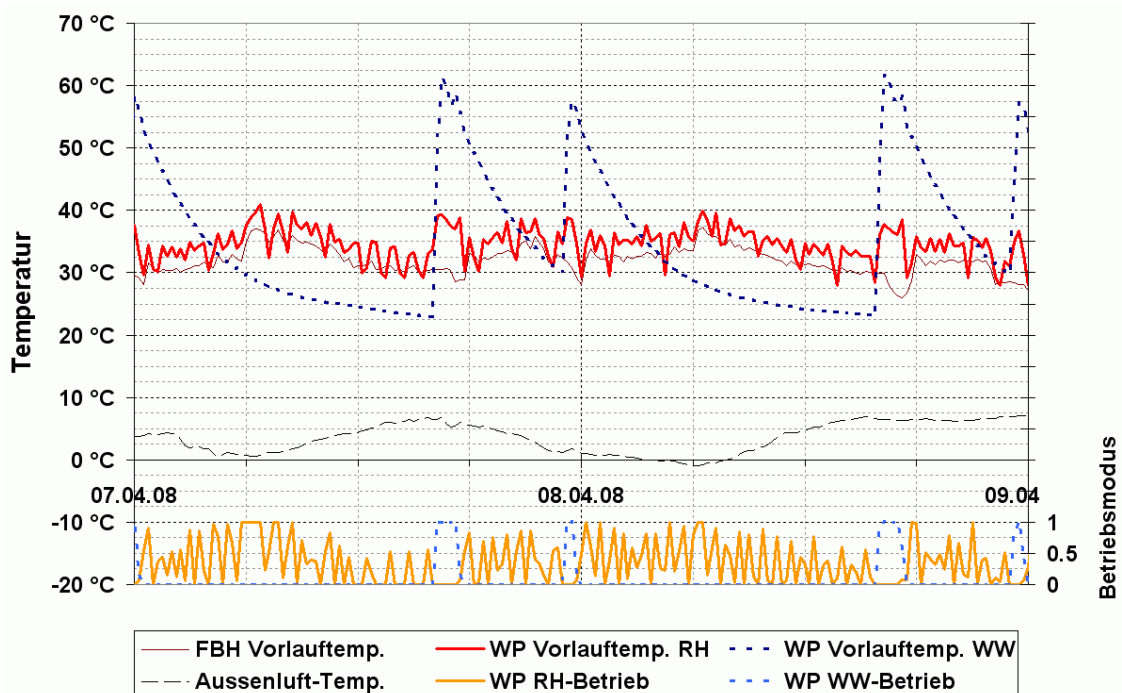


Abb. 26: Charakteristische Betriebsdynamik im Heiz- und Warmwasserbetrieb in der Winterperiode

3.3 SOMMERPERIODE

Die Auswertung der Sommerperiode wird für den Zeitraum 01. Mai 2008 bis 30. Okt. 2008 vorgenommen. In diesem Zeitraum sind 3 von 5 Wohnungen durchgehend von zusammen 5 Erwachsenen und 1 Kleinkind bewohnt. Die beiden weiteren Wohnungen wurden zum 01. Sep. 2008 bzw. 01. Okt. 2008 von insgesamt 4 Erwachsenen und 2 Kindern bezogen. Die mittlere Belegung über die Sommerperiode zur Berechnung des spezifischen Warmwasserbedarfs wird mit 7 Personen angenommen.

3.3.1 Energie

Abb. 27 zeigt links die erzeugte Wärme durch die Wärmepumpenanlage sowie rechts die zur Erzeugung der Wärme bezogene Elektrizität. Für Warmwasser wurden von der Wärmepumpe 4'642 kWh Wärme erzeugt. Daraus ergibt sich eine spezifische Warmwasserbereitstellung von 3.6 kWh/Person/Tag bzw. ein Verbrauch von 52 l/Person/Tag bei einer mittleren Zapftemperatur von 55 °C. Das entspricht einem typischen Bedarf. Die erzeugte Wärme für Warmwasser beträgt in der Sommerperiode 38 % der insgesamt erzeugten Wärme. Für Raumheizung wurden 5'630 kWh oder 45 % der Wärme erzeugt. Für die Raumkühlung wird mit 2'078 kWh bzw. 7 MJ/m² nur ein begrenzter Einsatz registriert. Auf die Ursachen wird in Kapitel 3.1.4 separat eingegangen.

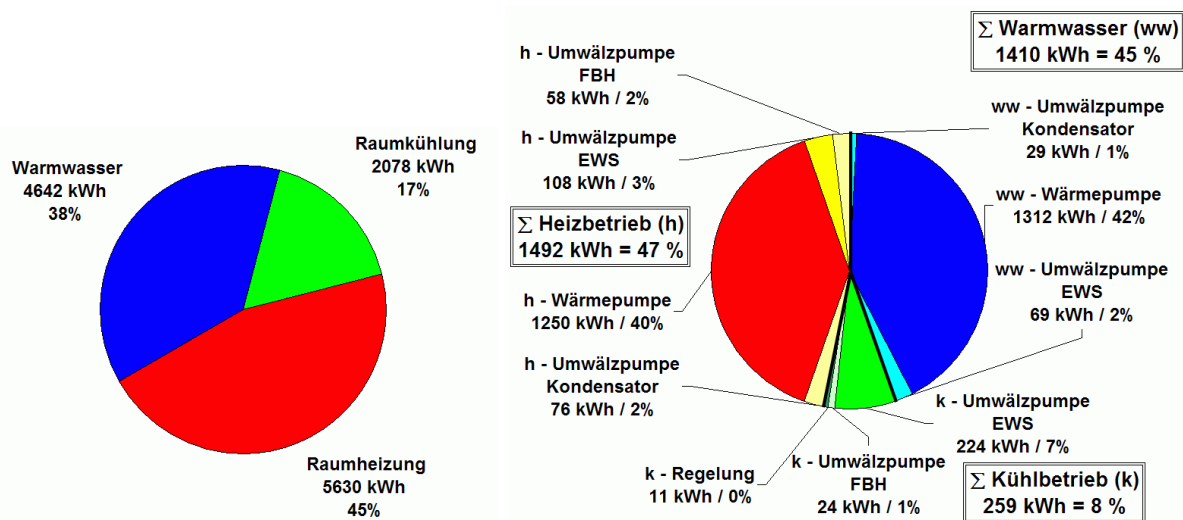


Abb. 27: links: erzeugte Wärme, rechts: bezogene Elektrizität für die Sommerperiode (01.05.2008 – 31.10.2008)

Die bezogene Elektrizität zur Erzeugung der Wärme verteilt sich zu 47 % bzw. 1'492 kWh auf die Wärmepumpe im Heizbetrieb, zu 45 % bzw. 1'410 kWh auf die Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb und zu 8 % bzw. 259 kWh auf den Kühlbetrieb. Im Heiz- und Warmwasserbetrieb hat die Wärmepumpe den deutlich grössten Anteil am Elektrizitätsbezug, die Umwälzpumpen haben im Verhältnis einen geringen Anteil. Im passiven Kühlbetrieb zeigt sich die Leistungsdifferenz zwischen den Umwälzpumpen für den Fussbodenheizkreis mit 30...40 W und der Erdwärmesonde mit 310 W.

3.3.2 Kennzahlen Energieeffizienz

Abb. 28 zeigt Wochenmittelwerte des Wärmeerzeugernutzungsgrades für Warmwasser und den passiven Kühlbetrieb. Der Wärmeerzeugernutzungsgrad ist das Verhältnis aus erzeugter Wärme durch die Wärmeerzeuger und dem dafür notwendigen elektrischen Aufwand der Wärmeerzeuger inklusive Umwälzpumpen für die Erdwärmesonde sowie den Kondensator. Im passiven Kühlbetrieb setzt sich der Aufwand aus der Regelung und der Umwälzpumpe der Erdwärmesonde zusammen. Der Wärmeerzeugernutzungsgrad im Warmwasserbetrieb liegt bei etwa 3.0 bei Aussentemperaturen von im Wochenmittel 15 °C und darüber und zwischen 2.5 und 3.0 unter 15 °C. Der Wärmeerzeugernutzungsgrad der passiven Kühlung liegt zwischen 7.7 und 12.3. Die relativ grosse Streubreite der Wärmeerzeugernutzungsgrade für die passive Kühlung liegt darin begründet, dass die abgeführte Wärme passiv durch die Temperaturverhältnisse in Raum und Erdwärmesonde bestimmt wird, der elektrische Aufwand für die Umwälzpumpen unabhängig davon alleine durch die Laufzeit bestimmt wird und somit in keinem direkten Zusammenhang mit der abgeführten Wärmemenge steht. Hiermit begründet ist auch der relativ kleine Wert von 3 für den Wärmeerzeugernutzungsgrad im Kühlbetrieb WNK-k bei einer Aussenlufttemperatur von 15 °C.

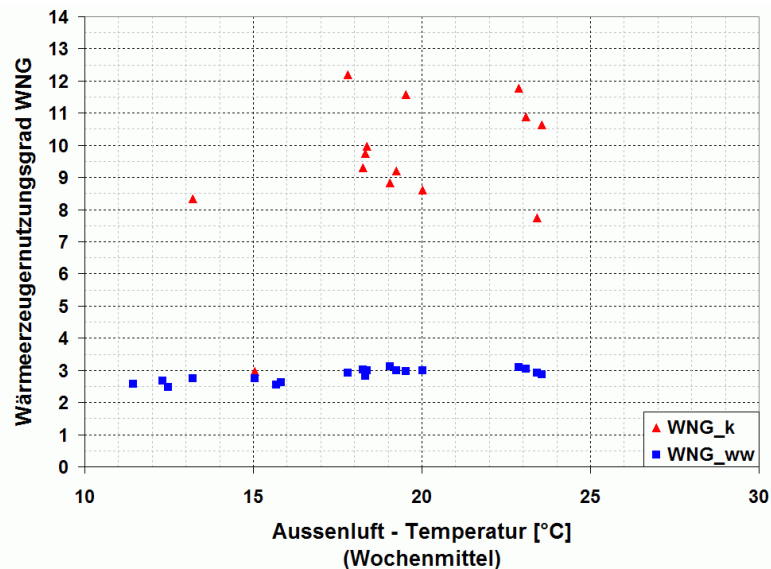


Abb. 28: Wärmeerzeugungsgrad (WNG) der Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb sowie der passiven Kühlung (01.05.2008 – 31.10.2008)

3.3.3 Raumkonditionen und Kondensationsrisiko

Die Häufigkeitsverteilung der Raumtemperaturen in der Sommerperiode, dargestellt in Abb. 29 links, zeigt, dass die Raumtemperaturen in den Wohnungen hauptsächlich im Bereich 22 °C bis 26 °C liegen. Die mittlere Raumtemperatur in Wohnung 1 liegt bei 24 °C bei einer Standardabweichung von 1.1 °C und einem Bereich von 21.8 °C bis 25.5 °C in dem 90% der Messwerte liegen. Die mittlere Raumtemperatur in Wohnung 3 liegt bei 23.9 °C bei einer Standardabweichung von 1.0 °C. In Wohnung 5 liegt die mittlere Raumtemperatur bei 23.8 °C bei einer Standardabweichung von 1.7 °C und einem Bereich von 20.5 °C bis 26 °C in dem 90% der Messwerte liegen. Es gibt nur wenige Stunden in denen eine Raumluft – Temperatur von 26 °C überschritten wird.

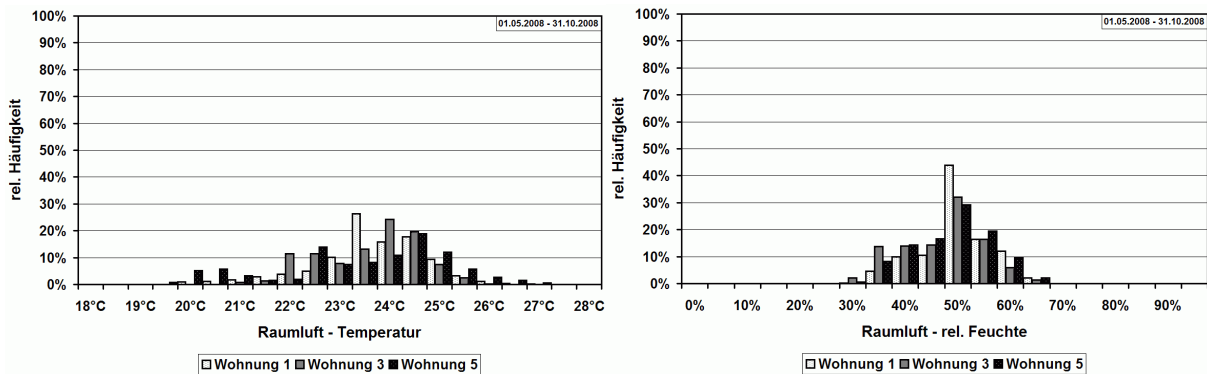


Abb. 29: Häufigkeitsverteilung im ersten Teil der Sommerperiode für die Wohnungen 1, 3 & 5 links: Temperaturen der Raumluft, rechts: rel. Feuchte der Raumluft (01.05.2008 – 31.10.2008)

Die relative Feuchte der Raumluft, in Abb. 29 rechts, variiert für die Wohnung 1 zwischen 35 %_{r.F.} und 65 %_{r.F.} bei einem Mittelwert von 53 %_{r.F.} und für die Wohnungen 3 und 5 zwischen 35 %_{r.F.} und 65 %_{r.F.} bei Mittelwerten von 50 %_{r.F.} respektive 52 %_{r.F.}. Die Raumluftfeuchte liegt damit in einem behaglichen Bereich.

Das Kondensationsrisiko auf der gekühlten Fussbodenoberfläche soll anhand der Oberflächentemperatur des Fussbodens abgeschätzt werden. Diese wurde nicht direkt gemessen, kann aber mit Hilfe der Raumluft – Temperatur und der Vorlauftemperatur des Fussbodenkreises im Kühlbetrieb abgeschätzt werden. Die Oberflächentemperatur des Fussbodenheizkreises liegt im aktiven Betrieb zwischen der Vorlauftemperatur des Fussbodenkreises und der Raumtemperatur.

In Abb. 30 sind die Raumluft – Temperatur (graue Punkte) und die Vorlauftemperatur des Fussbodenheizkreises (schwarze Punkte) im Kühlbetrieb über der Taupunkt – Temperatur der Raumluft aufgetragen. Die Taupunkt - Temperatur wird aus der gemessenen relativen Feuchte der Raumluft bestimmt. Die durchgezogene Linie zeigt die Taupunktgrenze. Die Oberflächentemperatur des Fussbo-

dens muss in der Abbildung also zwischen den schwarzen und den grauen Punkten liegen. Da nun sogar die Vorlauftemperatur des Fussbodenheizkreises immer oberhalb der Taupunktgrenze liegt kann auf ein vernachlässigbares Kondensationsrisiko auf der Fussbodenoberfläche geschlossen werden.

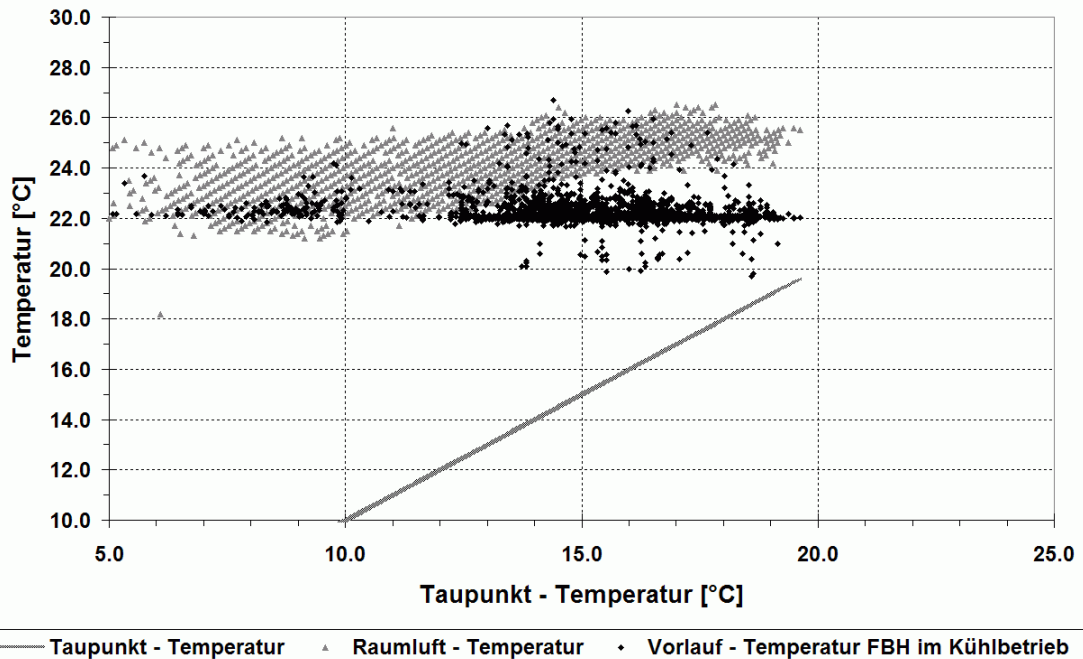


Abb. 30: Raumluft – Temperatur Wohnung 3 und Vorlauftemperatur des Fussbodenheizkreises zur Abschätzung des Kondensationsrisiko im Kühlbetrieb

3.3.4 Dynamisches Verhalten im Sommerbetrieb

In der Sommerperiode ist vor allem das dynamische Verhalten der passiven Kühlung mit Erdwärmesonde und Fussbodenheizkreis von Interesse. In den Abbildungen Abb. 31 & Abb. 32 sind die Temperaturen an der Erdwärmesonde und die Temperaturen im Fussbodenheizkreis im Zusammenhang mit der erzeugten Wärme für Warmwasser bzw. in den Heizpufferspeicher abgegebene Wärme und der über die Raumkühlung abgeführten Wärme dargestellt.

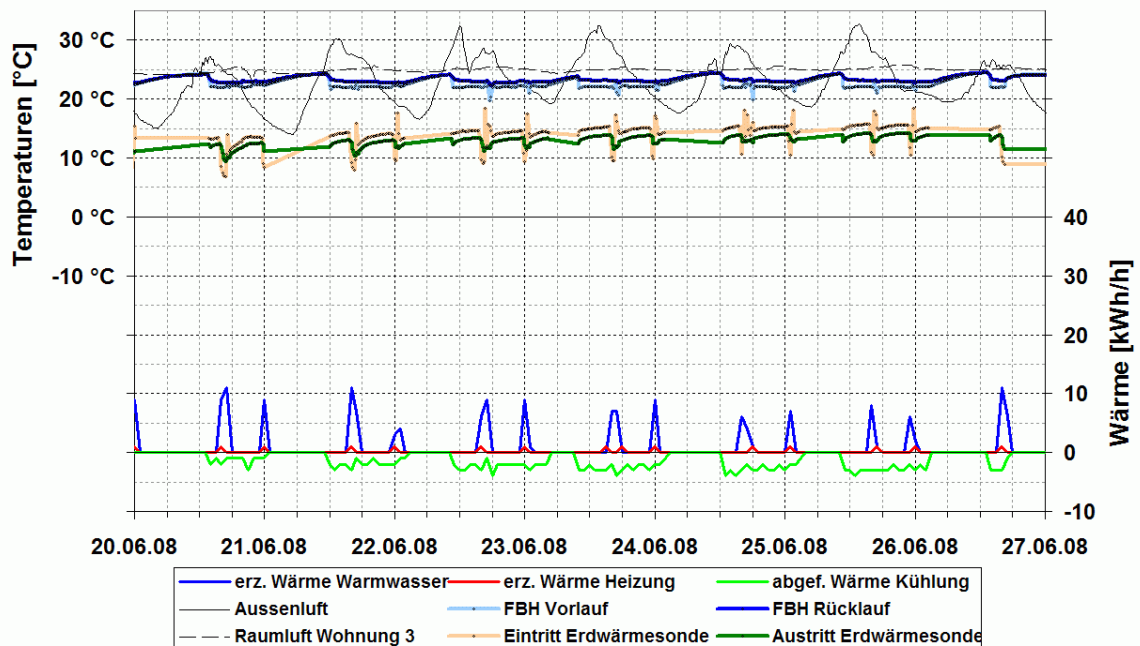


Abb. 31: Wochenverlauf der Temperaturen in der Erdwärmesonde & Fussbodenheizung bei Kühlbetrieb mit parallelem Warmwasserbetrieb

Mit der realisierten hydraulischen Schaltung kann und wird, wie in Abb. 31 & Abb. 32 dargestellt, bei laufendem passivem Kühlbetrieb parallel mit der Wärmepumpe Warmwasser aufgeheizt. Im Erdwärmesondenkreis ist der Wärmetauscher zur Anbindung der passiven Kühlfunktion an den Fussbodenheizkreis nach der Erdwärmesonde und vor dem Verdampfer der Wärmepumpe eingebunden. Durch die so erreichte Pufferwirkung der Erdwärmesonde zusammen mit der Leistungsregelung des Fussbodenheizkreises über die Beimischschaltung erfolgt kein unerwünschter Einfluss des Warmwasserbetriebs auf die Kühlleistung im Fussbodenkreis.

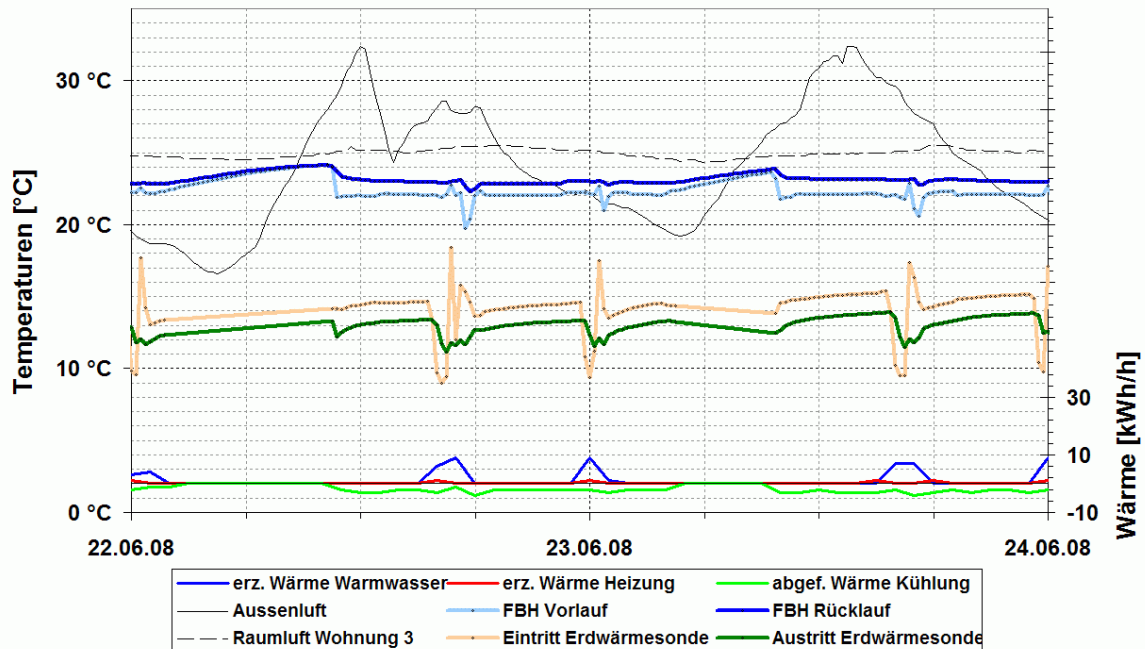


Abb. 32: Vergrößerung aus dem Wochenverlauf der Temperaturen in der Erdwärmesonde & Fussbodenheizung bei Kühlbetrieb mit parallelem Warmwasserbetrieb

Im parallelen Warmwasser – Betrieb kehrt sich die Temperaturdifferenz an der Erdwärmesonde, verglichen mit dem reinen Kühlbetrieb um. Die Austrittstemperatur aus der Erdwärmesonde senkt sich um etwa 2 - 5 K gegenüber dem reinen Kühlbetrieb ab. Die Temperaturdifferenz über die Erdwärmesonde im reinen Kühlbetrieb liegt im Bereich 1 - 2 K. Die kurzzeitig erhöhten Temperaturen am Eintritt der Erdwärmesonde nach dem parallelen Warmwasserbetrieb entstehen durch eine Warmwasser - Nachlaufphase in der die Umwälzpumpe der Erdwärmesonde kurz abschaltet und die Kondensatorrestwärme mit dem Kondensatorpumpennachlauf in den Heizungspufferspeicher transferiert wird. Das Umschaltventil für den Kühlbetrieb bleibt in dieser Zeit in Kühlstellung.

Wie auch in Abb. 31 & Abb. 32 ersichtlich findet der Kühlbetrieb meist nachmittags bis nachts statt. Mit der für die Freigabe des Kühlbetriebs verwendeten und über 6 Stunden gleitend gemittelten Aussen-temperatur wird der Kühlbetrieb um etwa diesen Zeitraum verzögert gegenüber der äusseren Warm-phase aktiviert.

3.4 EMPFEHLUNGEN & OPTIMIERUNGEN

3.4.1 Reglereinstellungen Heiz- und Kühlbetrieb

Basierend auf der Betrachtung der saisonalen Umschaltung Heiz- und Kühlbetrieb in Kapitel 3.1.4 und dem Vergleich der eingestellten und rechnerischen Heizkurve sowie dem Betriebsverhalten des Heizpufferspeichers in Kapitel 3.2.5 werden die im Folgenden beschriebenen Änderungen an der Reglerparametrierung vorgeschlagen. In Abb. 33 ist die daraus abgeleitete Regelcharakteristik für den Heiz- & Kühlbetrieb zusammen mit der Anpassung der saisonalen Umschaltung dargestellt.

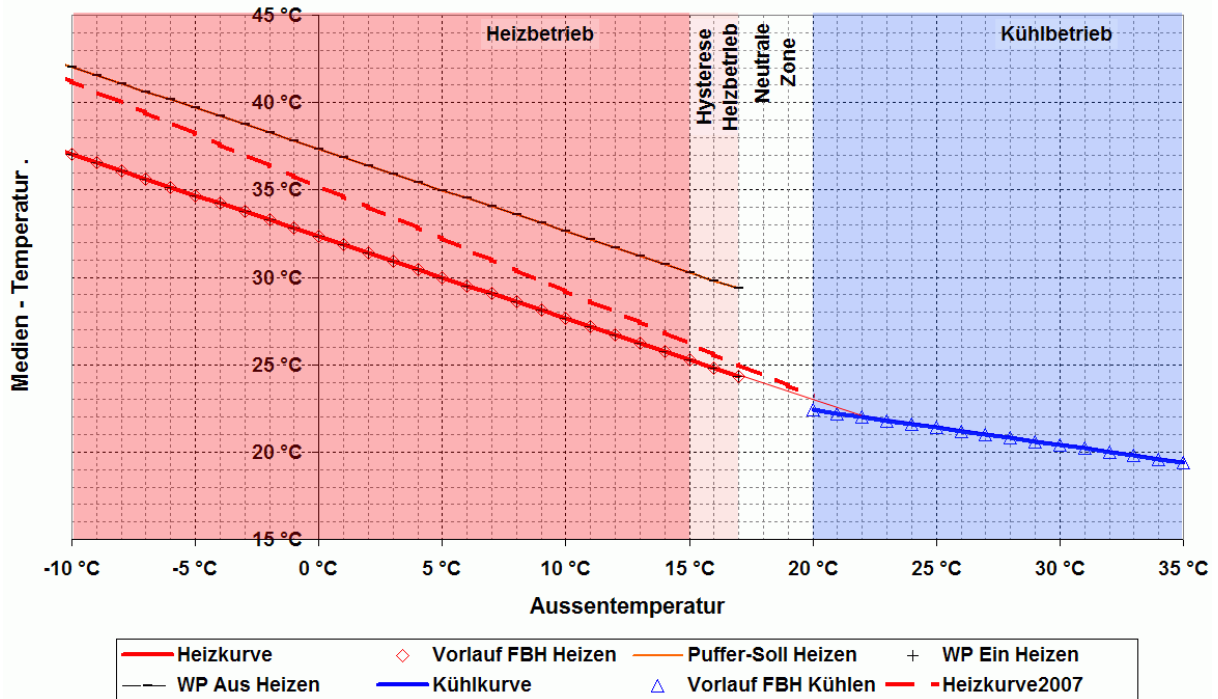


Abb. 33: Regelcharakteristik Heiz- / Kühlbetrieb und saisonale Umschaltung nach Optimierung

Die Heizkurve wird auf eine Steigung von 0.47 abgesenkt, wobei der Fusspunkt mit 22 °C beibehalten wird. Daraus ergibt sich im Auslegungspunkt bei einer Aussentemperatur von -8 °C eine Vorlauftemperatur von 36 °C anstelle der bisher eingestellten 40 °C. Es bleibt eine Reserve von 2 K gegenüber der rechnerischen Vorlauftemperatur von 34 °C. In Abb. 33 ist die ursprüngliche Heizkurve zum Vergleich gestrichelt dargestellt. Mit der niedrigeren Heizkurve kann die Hysterese des Pufferspeichers auf 5 K erhöht werden und gleichzeitig die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe in Auslegungsfall um 2 K gesenkt werden. Für die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb wird die Mittelwertbildung der Aussentemperatur von 6 Stunden auf 24 Stunden verlängert. Die Hysterese Heizbetrieb kann im Ausschaltspunkt auf 17 °C gesenkt werden, der Einschaltspunkt von 15 °C wird beibehalten. Die Freigabe des Kühlbetriebs kann auf 20 °C gesenkt werden. In Tab. 7 sind die im Regler der Wärmepumpe zu ändernden Parameter aufgeführt.

Anfang Januar 2009 wurden mit den angepassten Regelparametern auch bei einer längeren Kälteperiode mit Aussentemperaturen bis zu -7 °C im Tagesmittel die aus der Heizperiode 2007 / 2008 gewohnten Raumtemperaturen in den Wohnungen erreicht.

Parameter	alter Wert	neuer Wert
Heizungsdaten Nullpunkt	22 °C	22 °C
Heizungsdaten Steilheit	0.6	0.47
Puffer Differenz Temperatur	3 K	5 K
Einschaltdifferenz V1	2 K	5 K
Sommerbetrieb ein	20 °C	17 °C
Winterbetrieb ein	15 °C	15 °C
Mittelwert Intervall	6 h	24 h
Kühlbetrieb ein	24 °C	20 °C

Tab. 7: Parametereinstellungen der optimierten Regelung

Die mit der beschriebenen Regleroptimierung angestrebten Ziele sind:

- Steigerung der sommerlichen thermischen Behaglichkeit durch weitergehende Ausnutzung des passiven Kühlbetriebs
- Vermeidung von kurzzeitig wechselndem Heiz- und Kühlbetrieb und damit verbundenem Energiemehrbedarf
- Steigerung der Wärmepumpeneffizienz durch geringeren Temperaturhub und längere Laufzeiten
- geringerer Heizwärmeeinsatz bei gleicher thermischer Behaglichkeit in der Heizperiode

3.4.2 Information der Nutzer, Anlagenbetreiber und Planer

Eine der wichtigsten Aufgaben der Planer und des Bauherren ist die dauerhafte Sorge dafür, dass die notwendigen Informationen zur rechten Zeit verfügbar sind und weitergegeben werden. Dazu gehört mit an erster Stelle, dass der Anspruch und das Ziel, welche mit dem gewählten Heiz- und Kühlsystem einhergehen, klar kommuniziert werden. Ein energetisch hocheffizientes Gebäude, wie das im Projekt betrachtete, soll eine angenehme, behagliche Wohnumgebung schaffen. Dabei kann beispielsweise im Winter der Anspruch gestellt werden, dass eine definierte Mindesttemperatur eingehalten wird. Im Sommer kann mit der passiven Kühlfunktion eine Verbesserung der thermischen Behaglichkeit erreicht werden, es kann aber nicht von einem klimatisierten Raum mit dem Anspruch auf die Einhaltung einer definierten Temperatur ausgegangen werden.

Das vorliegende System ermöglicht es, mit einem thermisch trägen Wärmeübergabesystem sowohl im Winter zu heizen als auch im Sommer zu kühlen und dabei einen grossen Anteil energetisch günstiger Umgebungswärme zu nutzen. Dafür muss die Informationskette von der Auslegung im Planungsstadium über die Realisierung bis zur Inbetriebnahme gewährleistet sein. Für eine gute Parametrierung der Regelung müssen die Informationen über die Auslegung des Wärmeübergabesystems, den Heizwärmebedarf bzw. Baustandard und die Heizgrenze bei realen Raumtemperaturen bekannt sein. Eine typische Häufigkeitsverteilung der Aussentemperaturen am Standort im Stundenmittel und Tagesmittel hilft die Grenzwerte für die automatische saisonale Umschaltung zwischen Heizbetrieb und Kühlbetrieb festzulegen.

Weiterhin sollen einige spezifische Hinweise für eine Anlage mit erdgekoppelter Wärmepumpe und passiver Kühlfunktion über die Fussbodenheizung aufgeführt werden, die bei der Realisierung einer solchen Anlage hilfreich sein könnten:

- Die minimale Oberflächentemperatur des Fussbodens sollte 20 °C nicht unterschreiten, dies vorwiegend aus Behaglichkeitsgründen, aber auch zur Vermeidung von Feuchte – Kondensation.
- Klassische Raumthermostaten für den reinen Heizbetrieb können in Räumen, die nicht gekühlt werden sollen, wie z.B. Bad und Küche, den Kühlbetrieb einfach verhindern.
- Die Umwälzpumpe im Fussbodenkreis muss auch für den Kühlbetrieb geeignet sein und damit für Medientemperaturen bis ca. 15 °C geeignet sein.
- Bei Wohnungsweiser Abrechnung müssen die Wärmezähler den Heiz- und den Kühlbetrieb erfassen können und abhängig von der Temperaturdifferenz Vorlauf – Rücklauf separat die Wärme- bzw. Kältemenge erfassen. Im Kühlbetrieb wird mit relativ kleinen Spreizungen im Fussbodenkreis im Bereich 1...5K gearbeitet, die durch die Wärmezähler erfasst werden müssen.
- Für den Fussbodenkreis empfiehlt sich eine hocheffiziente elektronisch geregelte Permanentmagnet-Motor Umwälzpumpe, damit, wie hier im Messprojekt gezeigt, ein geringer elektrischer Energiebezug realisiert werden kann.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

4.1 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Messungen im Gebäude CosyPlace konnten von Herbst 2007 bis Herbst 2008 erfolgreich durchgeführt werden. Es zeigte sich eine gute Funktionstüchtigkeit der Wärmepumpenanlage im Heiz-, Warmwasser- und Kühlbetrieb. Beeinflusst wurde die Messperiode von einem unerwartet späten Bezug zweier Wohnungen erst im September bzw. Oktober 2008. Damit verbunden war eine noch andauernde Bautätigkeit in der ersten Heizperiode.

Insgesamt wurde eine gute thermische Behaglichkeit in der Heizperiode erreicht. Die Raumtemperaturen lagen hauptsächlich im Bereich 20 °C bis 24 °C. Die Raumluft – Feuchte während der Heizperiode war mit 20%_{r.F.} bis 50%_{r.F.} zeitweise eher niedrig. Während der Sommerperiode wurde mit einem eher geringen Einsatz der Kühlfunktion eine zufriedenstellende thermische Behaglichkeit erreicht. Die Raumtemperaturen lagen hauptsächlich im Bereich 20 °C bis 26 °C. Die Raumluftfeuchte lag in einem behaglichen Bereich von 35%_{r.F.} bis 65%_{r.F.}.

Die Wärmepumpe zeigte eine gute Effizienz im Heizbetrieb mit einem Wärmeerzeugernutzungsgrad von 4.0 und eine ebenso gute Effizienz im Warmwasser – Betrieb mit einem Wärmeerzeugernutzungsgrad von 2.9 bei einer Warmwassertemperatur von 55 °C. Im passiven Kühlbetrieb mit der Erdwärmesonde wurde ein Wärmeerzeugernutzungsgrad von 8.8 erreicht. Die abgeführte Kühlwärme war mit 2'078 kWh eher gering. Dies ist auch auf eine sehr konservative Reglereinstellung zurückzuführen. In der Heizperiode zeigte sich ein unerwartet hoher Heizwärmebezug des Gebäudes mit 103 MJ/m²/a gegenüber einem Rechenwert für den Nachweis MINERGIE-P® von 36 MJ/m²/a, der aber immer noch deutlich unter den gesetzlichen Mindestanforderungen liegt. In einer Sensitivitätsanalyse der Nachweisrechnung konnte, mit aus den Messwerten abgeleiteten Randbedingungen, ein rechnerischer Heizwärmebedarf von 71 MJ/m²/a nachvollzogen werden.

Die Austrittstemperatur der Erdwärmesonde lag in der Winterperiode im Bereich 1.5 °C bis 11.3 °C bei einem Mittelwert von 5.3 °C. Zum Anfang Juni hin stieg die Austrittstemperatur ohne Kühlbetrieb auf etwa 10 °C. Mit aktivem Kühlbetrieb von Anfang Juli an stieg die Austrittstemperatur der Erdwärmesonde weiter auf rund 15 °C die auch über eine längere Kühlperiode Ende Juli gehalten wurde. An Tagen ohne Kühlbetrieb in der Sommerperiode, nur mit Warmwasserbetrieb, sank die Austrittstemperatur relativ rasch auf Werte im Bereich 11 °C bis 12 °C.

Die stark an sicherer Wärmebereitstellung im Winter orientierte Reglereinstellung konnte basierend auf den Messdaten dahingehend optimiert werden, dass sowohl die Heizwärmebereitstellung im Winter gesichert ist, als auch der Kühlung mehr Leistungsfähigkeit zugestanden wird. Der bisher schon geringe durch Wechselbetrieb generierte Wärmemehrbedarf sollte weiter gesenkt werden können.

4.2 AUSBLICK / WEITERES VORGEHEN

Die Erfassung und Auswertung einer zweiten Messperiode, in der das Gebäude bestimmungsgemäss genutzt wird, wäre aus Sicht der Autoren empfehlenswert, um den Einfluss von Bewohnern, Bauaustrocknung und optimierter Reglereinstellung auf den Wärmebedarf einordnen zu können. Daher wird die Erfassung der Messdaten zurzeit fortgesetzt. Zusammen mit der zusätzlichen Erfahrung bei der automatisierten Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb kann ein wichtiger Beitrag für Planung, Erstellung und Betrieb qualitativ hochwertiger Bauten mit Heiz- und Kühlfunktion geleistet werden, um die Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft zu realisieren.

Neben der messtechnisch nachgewiesenen Betriebstauglichkeit im Mehrfamilienhaus wird ein ähnliches Messprojekt in einem MINERGIE® Einfamilienhaus durchgeführt. Dort kommt ebenfalls eine Wärmepumpe mit Erdwärmesonde zum Einsatz, die allerdings auf eine Niedertemperatur - Fussbodenheizung ohne Raumthermostaten arbeitet. Beide Projekte werden weiterhin in eine theoretische Untersuchung weiterer Wärmepumpenschaltungen zum Heizen und Kühlen einfließen [3]. Alle drei Projekte wiederum bilden den nationalen Beitrag zum Annex 32 im Wärmepumpenprogramm der Internationalen Energieagentur [4].

5 SYMBOLVERZEICHNIS

5.1 VARIABLEN

Variable	Beschreibung	Einheit
θ	Temperatur	°C
φ	relative Luftfeuchte	% _{rF}
Z	Zustand	-
Q	Wärmemenge	kWh
E	Energiemenge	kWh
V	Volumen	l
COP	Leistungszahl	-
JAZ	Jahresarbeitszahl	-
WNG	Wärmeerzeugernutzungsgrad	-
SNG	Systemnutzungsgrad	-

5.2 INDICES

Index	Beschreibung
AUL	Aussenluft
Aus	Austritt
EH	Ergänzungsheizung
Ein	Eintritt
EWS	Erdwärmesonde
FBH	Fussbodenheizung
h	Heizung
k	Kühlung
Komp	Kompressor
Kond	Kondensator
kw, KW	Kaltwasser
RGL	Regelung
RH	Raumheizung
RL	Rücklauf
SOL	Solaranlage
UWP	Umwälzpumpe
VE	Lüftung
VL	Vorlauf
Verd	Verdampfer
Whg, WHG	Wohnungen
WP	Wärmepumpe
WVÜ	Wärmeverteilung & -übergabe
ww, WW	Warmwasser
WHG1	Wohnung 1
WHG2	Wohnung 2
WHG3	Wohnung 3
WHG4	Wohnung 4
WHG5	Wohnung 5

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] gribi-theurillat AG: **CosyPlace – Edles Wohnen am Bruderholz**, Prospekt, Basel, 2007
- [2] Th. Afjei, R. Dott, A. Huber: **Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen**, Schlussbericht BFE Forschungsprogramm REN, MuttENZ, Aug. 2007
- [3] R. Dott, C. Wemhöner, Th.. Afjei: **Standardlösungen für energieeffizientes Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen (SEK)**, Jahresbericht BFE Forschungsprogramm UAW, MuttENZ, Dez. 2008
- [4] C. Wemhöner, Th. Afjei: **Operating Agent IEA HPP Annex 32**, Jahresbericht BFE Forschungsprogramm UAW, MuttENZ, Dez. 2008, <http://www.annex32.net>
- [5] EN13757:2003; **Kommunikationssysteme für Zähler und deren Fernablesung**; 08-2003; Schweizerische Normen Vereinigung - SNV; Winterthur
- [6] SN EN 14511:2007, **Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und Kühlung**; CEN; Brüssel; BE; November 2007
- [7] SIA 2024:2006; **Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik**; 2006; SIA, Zürich
- [8] SN EN ISO 7730; **Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD- Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005)**; 02-2006; Schweizerische Normen Vereinigung - SNV; Winterthur
- [9] Olesen, B. W. 1997. **Flächenheizung und Kühlung; Einsatzbereiche für Fussboden-, Wand- und Deckensysteme**, Proceedings Velta Congress 97, pp. 35. Norderstedt, Germany
- [10] SIA 380/1:2001, **Thermische Energie im Hochbau**, 02-2001, SIA, Zürich
- [11] **Reglement zur Nutzung der Qualitätsmarke MINERGIE®**; Verein MINERGIE®; Bern; <http://www.minergie.ch>