



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 28. Februar 2010

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

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
Andreas Genkinger, FHNW, andreas.genkinger@fhnw.ch
Andreas Witmer, FHNW, andreas.witmer@fhnw.ch

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. Die Messungen konnten in der Periode von November 2007 bis September 2009 erfolgreich durchgeführt 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.

Insgesamt wurde eine gute thermische Behaglichkeit erreicht, mit Raumtemperaturen mehrheitlich im Bereich 19 - 24 °C während der Winterperioden und 21 - 26 °C im Sommer. Die relative Raumluftfeuchte war mit 21 % r.F. bis 62 % r.F. im Winter zeitweise eher niedrig. Mit einem jährlichen Wärmeenergieerzeugernutzungsgrad im Warmwasserbetrieb von 2.7, im Heizbetrieb von 4.3 und im passiven Kühlbetrieb bis 15.2 im Wochendurchschnitt wurde –dank Optimierungen aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse– eine effiziente Anlage realisiert. Die abgeführte Wärmemenge im Kühlbetrieb konnte von 7 MJ/m² im ersten auf 12 MJ/m² im zweiten Betriebsjahr gesteigert werden. Der Heizwärmebezug ist mit 103 MJ/m² im ersten und 111 MJ/m² im zweiten Winter absolut gesehen eher gering, jedoch deutlich höher als der rechnerische Nachweiswert während der Planung.

Resumée

Le premier immeuble collectif selon la norme suisse MINERGIE-P® dans la ville de Bâle a été construit en 2007. Le bâtiment est chauffé par une pompe à chaleur géothermique combinée avec un plancher chauffant à basse température. En plus, un rafraîchissement passif par le circuit du plancher a été réalisé dans cet immeuble: Il est possible de coupler les deux sondes géothermiques de 130 m chacune directement avec le circuit du plancher par un seul échangeur de chaleur additionnel. Une étude théorique précédente a montré que ce système de rafraîchissement douce est capable d'augmenter le confort thermique en été à basse consommation d'énergie. L'installation est non seulement très efficace dans le mode de rafraîchissement passif puisqu'il a besoin de l'énergie uniquement pour les pompes de circulation, mais les coûts additionnels sont aussi assez bas.

Mais il manque des expériences pratiques. Pour cela, la mise en service de l'installation a été accompagnée par une campagne de mesures de 2 ans, du novembre 2007 au septembre 2009. Toutes les mesures pourraient être accomplies avec succès.

Avec des températures intérieures entre 19 - 24 °C en hiver et entre 21 - 26 °C en été, un bon confort thermique a été atteint. En hiver, l'humidité aérienne était surtout entre 21 % - 62 %, soit plutôt sèches quelquefois. Le coefficient de performance annuel (COPA), y compris l'énergie électrique des pompes de circulation (sondes et condenseur) atteint 2.7 pour la production de l'eau chaude sanitaire. Après des optimisations des réglages, le COPA pour la chauffage pourrait être amélioré de 4.0 en première année d'opération à 4.3 en deuxième. Le COP en mode de rafraîchissement passif atteint des valeurs en moyen hebdomadaire jusque à 15.2. La puissance du rafraîchissement passif atteint une valeur moyenne de 5 kW qui correspond à une puissance spécifique de 10 W/m² pour les 3 appartements rafraîchis. Les besoins de chaleur pour le chauffage étaient plus basse que pour les bâtiments standard, mais avec 103 MJ/m² dans la première respectivement 111 MJ/m² dans la deuxième saison de chauffage, ils étaient plus haut que la valeur calculée.

Abstract

The first multi-family apartment house according to the swiss 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 successfully accomplished in the period November 2007 until September 2009.

A good thermal comfort could be reached with room temperatures in the winter period in the range 19 - 24 °C and 21 - 26 °C in the summer period. The room air humidity in the winter seasons was temporarily rather dry, measured values were mostly within a range of 21 %_{r.H.} to 62 %_{r.H.}. The generator seasonal performance factor showed an energy efficient system in domestic hot water mode with 2.7 for both years, while heating mode efficiency could be improved from 4.0 to a value of 4.3 for the second year of operation. In passive cooling mode weekly average of the generator performance factor reached values as high as 15.2 after optimizations during the second summer period. Cooling power reached an average value of 5 kW for the 3 apartments whose inhabitants were using the passive cooling. The heat supply for space heating was lower than standard buildings yet with 103 MJ/m² in the first respectively 111 MJ/m² in the second heating season higher than the calculated value.

Inhaltsverzeichnis

1	AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG	7
1.1	Motivation.....	7
1.2	Beteiligte und Projektumfeld	7
1.3	Gebäude CosyPlace	8
2	GRUNDLAGEN UND VORGEHEN	10
2.1	Lösungsansatz.....	10
2.2	Anlagenfunktionen & Parametereinstellungen	11
2.3	Messkonzept.....	14
2.4	Auswertemethodik und Gütekriterien.....	17
2.4.1	Energetische Bewertung.....	17
2.4.2	Behaglichkeitsbewertung.....	19
3	ERGEBNISSE	22
3.1	Klimatische Rahmenbedingungen	22
3.2	Messperiode 2007/2008	22
3.2.1	Energiebedarf Winterbetrieb 2007/2008.....	23
3.2.2	Energiebedarf Sommerbetrieb 2008.....	23
3.2.3	Kennzahlen Energieeffizienz	24
3.2.4	Raumkonditionen Winterbetrieb 2007/2008	26
3.2.5	Raumkonditionen Sommerbetrieb 2008	27
3.2.6	Nutzerzufriedenheit.....	27
3.3	Erkenntnisse und Optimierungen	27
3.3.1	Welche Heizkurve passt zum Gebäude?	27
3.3.2	Saisonale Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb	28
3.3.3	Wird der Pufferspeicher im Heizbetrieb sinnvoll betrieben?.....	32
3.3.4	Optimierte Regelung	33
3.4	Messperiode 2008/2009	34
3.4.1	Energie Winterbetrieb 2008/2009	35
3.4.2	Energie Sommerbetrieb 2009.....	36
3.4.3	Kennzahlen Energieeffizienz	37
3.4.4	Raumkonditionen Winter 2008/2009	38
3.4.5	Raumkonditionen Sommer 2009	39
3.4.6	Nutzerzufriedenheit.....	40
3.5	Verlauf der Erdwärmesonden-Temperatur	41
3.6	Kondensationsrisiko	43
3.7	Dynamisches Verhalten im Winterbetrieb.....	45
3.8	Dynamisches Verhalten im Sommerbetrieb	47
3.9	Sensitivitätsanalyse der Heizwärmebedarfsberechnung nach SIA 380/1	49
3.10	Information der Nutzer, Anlagenbetreiber und Planer	53
4	SCHLUSSFOLGERUNGEN	55
4.1	Schlussfolgerungen	55
4.2	Verdankung.....	55
4.3	Ausblick.....	55
5	SYMBOLVERZEICHNIS	57
5.1	Variablen	57

5.2	Indices.....	57
6	LITERATURVERZEICHNIS.....	59
7	ANHANG.....	60
7.1	Saisonale Messdaten Wärme.....	60
7.2	Saisonale Messdaten Elektrizität.....	61
7.3	Saisonale Messdaten Raumklima	61
7.4	Dynamischer Verlauf der Erdwärmesonden-Temperaturen	62

1 AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG

1.1 MOTIVATION

Die sommerliche Kühlung von Gebäuden gewinnt zunehmend an Bedeutung. Hauptgründe sind klimatische Veränderungen hin zu höheren Aussentemperaturen sowie höhere innere thermische Lasten in Verbindung mit modernen Bauweisen, die einen zunehmenden Anteil an transparenten Flächen aufweisen. Hinzu kommt ein gestiegener Lebensstandard mit hohen Ansprüchen an die thermische Behaglichkeit. Aus diesen Gründen gewinnt der Energiebedarf für Kühlung auch im Wohnbereich an Bedeutung, er sollte jedoch möglichst effizient gedeckt werden. Werden die bautechnischen Massnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz ausgeschöpft, so bietet eine passive Kühlung über den Fussboden eine kostengünstige Möglichkeit dazu.

Eine effiziente Bereitstellung behaglicher Bedingungen in Gebäuden ist also 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 und
- die gesamte Anlage auf den Heizfall ausgelegt ist, jedoch auch zur Kühlung eingesetzt wird.

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

1.2 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 |

Von der Firma EMB Pumpen AG wurde die Umwälzpumpe im Fussbodenkreis zur Verfügung gestellt.

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 internationalen Projekts mit dem Titel "Economic heating and cooling systems for low energy houses" (IEA HPP Annex 32) im Wärmepumpenprogramm (HPP) der Internationalen Energieagentur (IEA) ein [4].

1.3 GEBÄUDE COSYPLACE

Das Gebäude „CosyPlace“ (Abb. 1) ist das erste MINERGIE-P® Gebäude auf Stadtbasler Kantonsgebiet und unter der Nummer BS-001-P zertifiziert [1],[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 respektive Oktober 2008 bezogen.



Abb. 1: Nordansicht des Gebäudes „CosyPlace“ zum Erstbezug im Spätsommer 2007

Das Gebäude ist ein massiv gebautes Mehrfamilienhaus mit 5 Wohneinheiten an einer nordorientierten Hanglage in Basel-Stadt. Das technische Konzept (Abb. 2) sieht folgendermassen aus: Die hoch Wärme dämmende Gebäudehülle (1) und die Dreifach-Wärmeschutzverglasung (2) sorgen für einen MINERGIE-P® entsprechenden geringen Heizwärmebedarf. Das Gebäude verfügt über drei Vollgeschosse mit zusätzlichem Attikageschoss und unterirdischer Einstellhalle. Die Wärmeübertragung erfolgt sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb 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 Fussbodenkreis 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/m², die Norm-Heizlast nach SIA 384.201 11.8 kW bei einer Auslegungstemperatur von -8 °C und 20 °C Innentemperatur. Die Fussbodenheizung ist auf 30 °C Vorlauf- und 25 °C Rücklauftemperatur ausgelegt.

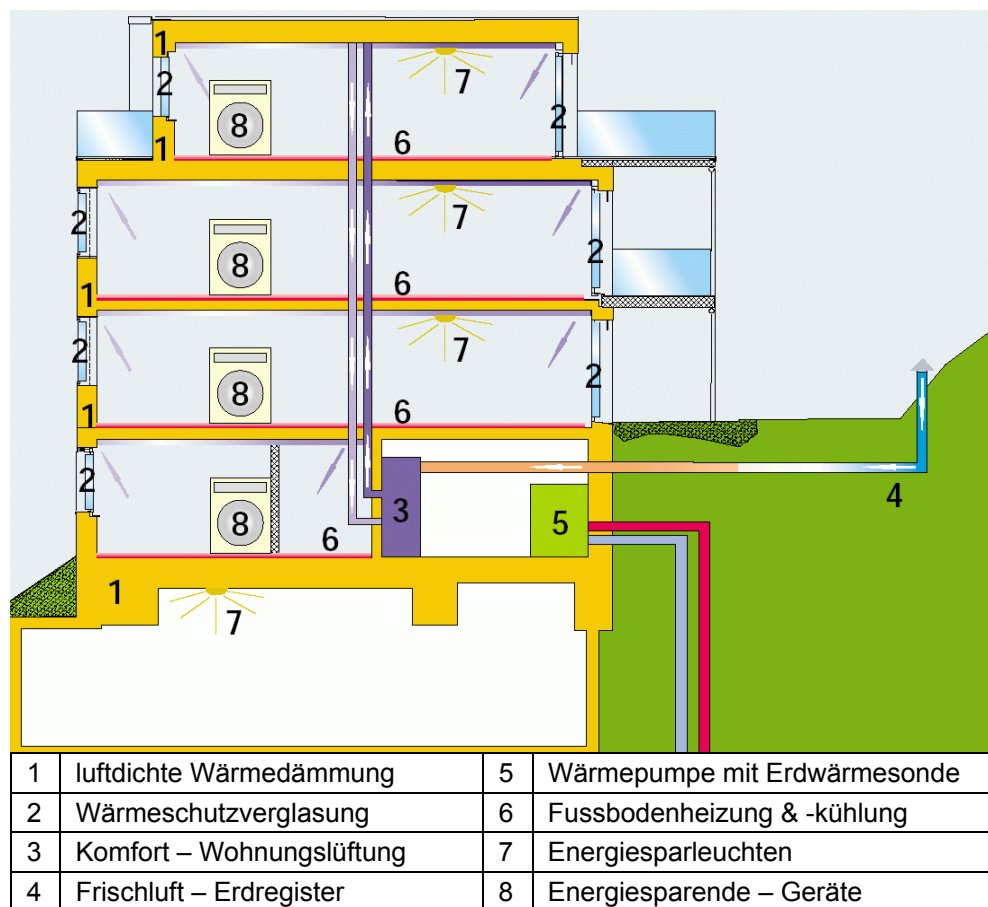


Abb. 2: Schematische Gebäudedarstellung mit technischem Konzept [1]

2 GRUNDLAGEN UND VORGEHEN

2.1 LÖSUNGSANSATZ

Nachdem die Ergebnisse aus [2] die theoretische Machbarkeit und Einsatzgrenzen sowie das Potenzial einer hocheffizienten und einfachen Kühloption zeigten, wurde eine reale Anlage gesucht, um Erfahrungen für die Umsetzung zu gewinnen und mögliche Probleme im Praxisbetrieb aufzuzeigen. Dafür bot sich das 2007 am Unteren Batterieweg in Basel 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 zur Wärmeübergabe realisiert.

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. Es muss aber zentral entschieden werden, ob Heizwärme oder Kühlung bereitgestellt wird. Hierbei liegt die Präferenz auf der Bereitstellung von Heizwärme und einem möglichst geringen Zusatzaufwand für die Wärmeabfuhr im Sommer. Es kann also sein, dass nicht das volle Kühlpotenzial ausgeschöpft wird. Weiterhin arbeitet die Wärmepumpe im Heizbetrieb auf einen Pufferspeicher um eine Mindest-Leistungsabnahme sicherzustellen. Der Fussbodenheizkreis wird über eine Beimischschaltung aus dem Pufferspeicher gespiesen. Alle Raumheizkreise -inklusive Badezimmer- sind mit Raumthermostaten ausgerüstet. Eine Überschreitung der eingestellten Temperatur im Heizfall bzw. Unterschreitung im Kühlfall führt zum Schliessen des jeweiligen Raumheizkreises.

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

Die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erfolgt automatisch, abhängig von der gleitend gemittelten Aussentemperatur. Für die Auswertung wurden die Zeiträume daher kalendarisch bestimmt, eine Übersicht gibt folgende Tabelle 1 wieder.

	von	bis		von	bis
Winter 07/08	01.11.2007	30.04.2008	Sommer 08	01.05.2008	31.10.2008
Winter 08/09	01.10.2008	31.03.2009	Sommer 09	01.04.2009	30.09.2009

Tab. 1: Laufzeiten aller Messperioden im Gesamtprojekt

Aufgrund des verzögerten Bezugs der Wohnungen im Jahr 2007 überschneiden sich zwei Messperioden im Oktober 2008

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

- Welche Raumtemperaturen und Raumluftfeuchten werden erreicht?
- Wie viel Wärme wird dem Gebäude 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 und Verteilung von Heizwärme, Warmwasser und Kälte aufgewendet?
- Mit welcher Effizienz (Arbeitszahl bzw. Nutzungsgrad) werden Heizwärme, Warmwasser und 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 mit Sommer-Bypass. Die Frischluft wird über zwei Luft-Erdreich-Wärmetauscher vorkonditioniert. Sie wird dann 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 (je eines pro Wohnung) kann über eine Steuereinheit in der jeweiligen Wohnung in drei Stufen gewählt werden.

Die Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser erfolgt wie in Kapitel 1.3 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. Das Wärmeübergabesystem wird demnach für beide Funktionen verwendet. Die Verteilung der Wärme für alle Wohnungen erfolgt über ein einziges System. Es kann also nur entweder in allen Wohnungen geheizt oder in allen Wohnungen gekühlt werden. In einer Wohnung heizen, in einer anderen kühlen ist systembedingt nicht möglich. Die zentrale Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erfolgt automatisch, abhängig von der gleitend gemittelten 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, in zeitlich kurz aufeinander folgenden Abständen zu heizen und zu kühlen. Dies würde im Wesentlichen dazu führen, dass die thermische Speichermasse des Fussbodens aufgeheizt und wieder abgekühlt wird, im Raum aber kaum eine Veränderung feststellbar wäre. Es würde mit dem wechselnden Aufheizen und Abkühlen also Energie verschwendet, ohne einen entsprechenden Nutzen zu erzielen.

Die Reglereinstellung für die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb wurde bei der Inbetriebnahme der Anlage mit Priorität auf ausreichende Wärmebereitstellung im Heizbetrieb festgelegt (siehe Kapitel 3.3.2). Sie erfolgt anhand einer gleitend über 6 Stunden gemittelten Aussentemperatur. Abb. 3 zeigt die Regelcharakteristik, so wie diese bei Inbetriebnahme eingestellt wurde. Nebst der Heiz- und Kühlkurve sind in der Abbildung mit farbigen Flächen Heizbetrieb (rot), Hysterese Heizbetrieb (hellrot), neutrale Zone (weiss) und Kühlbetrieb (blau) dargestellt. Für den Heizbetrieb wird eine Hysterese verwendet: Beim Unterschreiten einer Grenztemperatur von 15 °C wird der Heizbetrieb aktiviert und bei Erreichen von 20 °C wieder deaktiviert. Oberhalb der neutralen Zone wird der Kühlbetrieb bei einer Grenztemperatur von 24 °C ohne Hysterese aktiviert bzw. deaktiviert.

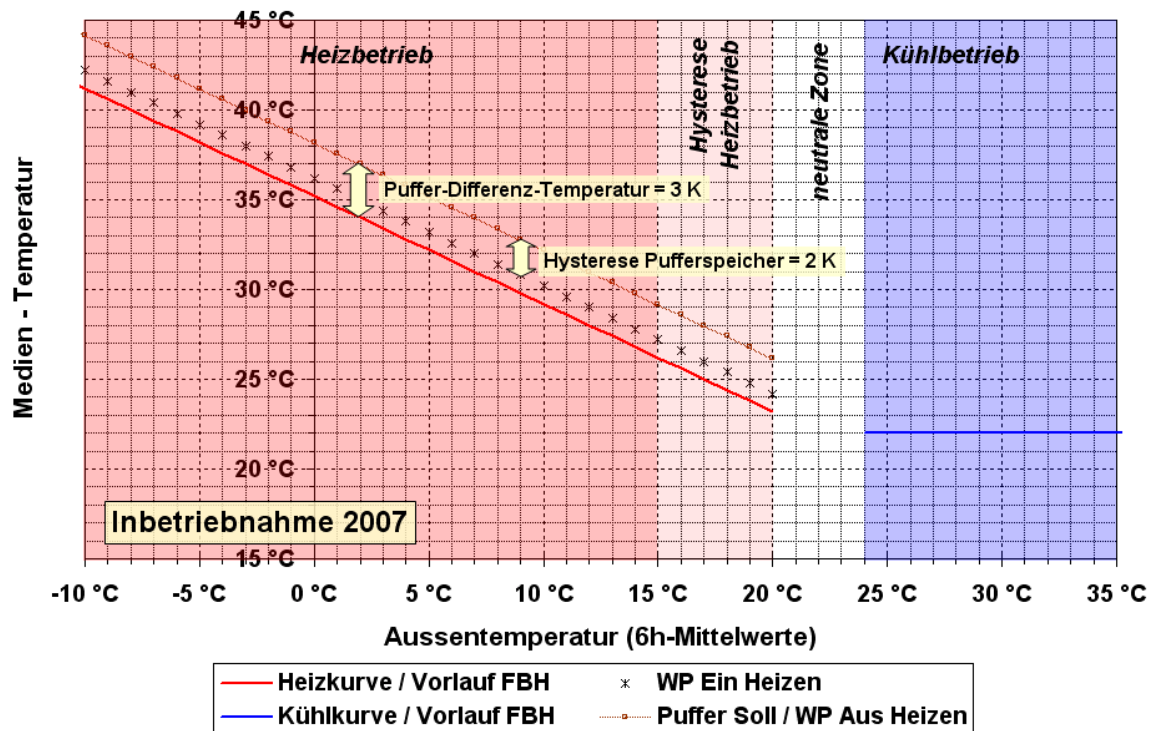


Abb. 3: Regelcharakteristik Heiz- und Kühlbetrieb bei Inbetriebnahme (2007)

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.

Im Kühlbetrieb wurde vom gleichen Fusspunkt ausgehend eine Steigung von 0.1 K/K eingestellt, allerdings die Vorlauftemperatur auf minimal 22 °C begrenzt, um eine allfällige Kondensationsgefahr auf der gekühlten Bodenoberfläche zu unterbinden. Mit diesen Einstellungen wird die Vorlauftemperatur im Kühlfall auf konstante 22 °C geregelt.

Die gewünschte Vorlauftemperatur wird über eine Beimischschaltung im Fussbodenkreis geregelt (Prinzipschema in Abb. 4 oben). Im Heizbetrieb wird das warme Wasser aus dem Pufferspeicher nach Bedarf dem im Fussbodenkreis zirkulierenden Wasser beigemischt. Der Pufferspeicher wird von der Wärmepumpe geladen und bis zu einer Soll- / Ausschaltemperatur 3 K oberhalb der Heizkurve aufgeheizt (Puffer-Differenz-Temperatur). Fällt die Temperatur im Pufferspeicher auf einen Wert 2 K unterhalb der Solltemperatur (Hysterese Pufferspeicher), so wird die Ladung des Pufferspeichers mit der Wärmepumpe aktiviert. Die Temperatur im Pufferspeicher liegt also stets einige Grade über der eingestellten Vorlauftemperatur des Fussbodenkreises.

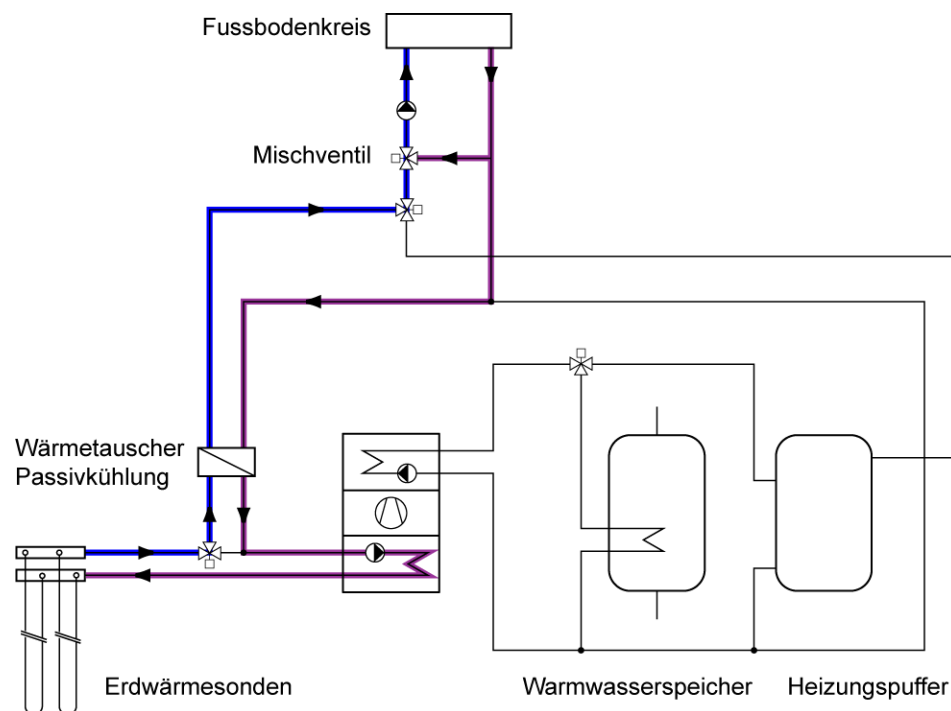
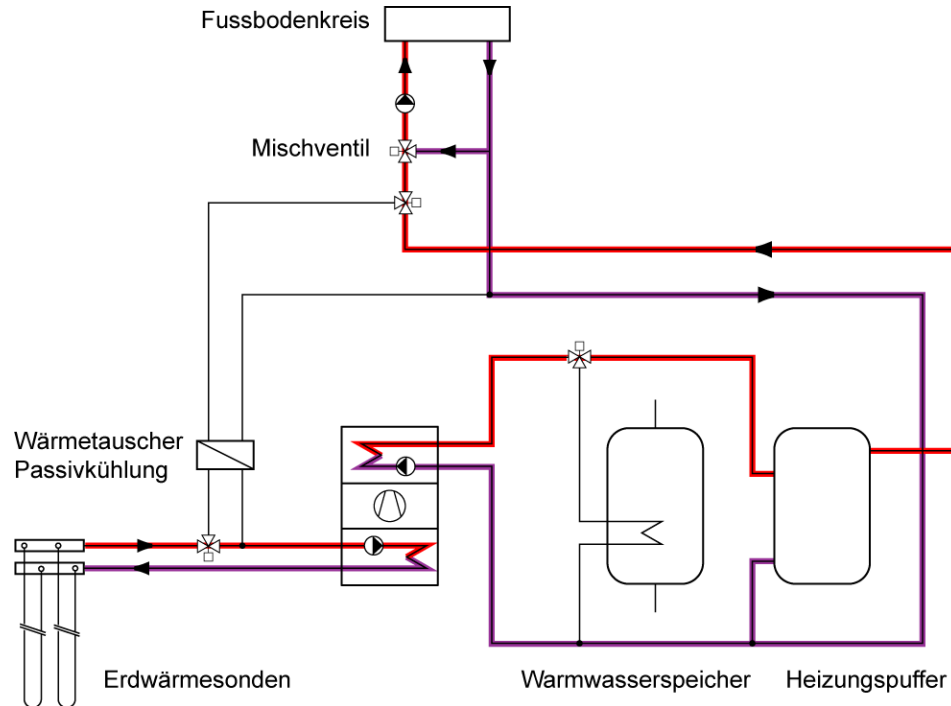


Abb. 4: Prinzipschema der Wärmepumpenanlage im CosyPlace
Heizbetrieb (oben) und Kühlbetrieb (unten)

Im Kühlfall wird die Sole aus der Erdwärmesonde über ein Umschaltventil zu einem Wärmetauscher geleitet, welcher den Fussbodenkreis direkt an die Erdwärmesonde koppelt (Abb. 4 unten). Die Kühl-

kurve gibt die Soll-Temperatur des Fussbodenkreisvorlaufs im Kühlfall vor. Die Kühlkurve wird 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.

2.3 MESSKONZEPT

Die Messpunkte wurden so gewählt, dass die Energieflüsse und Zustandsbeschreibungen der erwähnten Bilanzgrenzen ermittelt werden können. In Abb. 5 sind die Messpunkte im Anlagenschema der Wärme- und Kälteversorgung dargestellt. Die detaillierte Beschreibung der Messpunkte befindet sich in der darauf folgenden Tab. 2. 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. Messwerte zum Klima (Temperatur & Luftfeuchte) werden durch autonome Datenlogger erfasst.

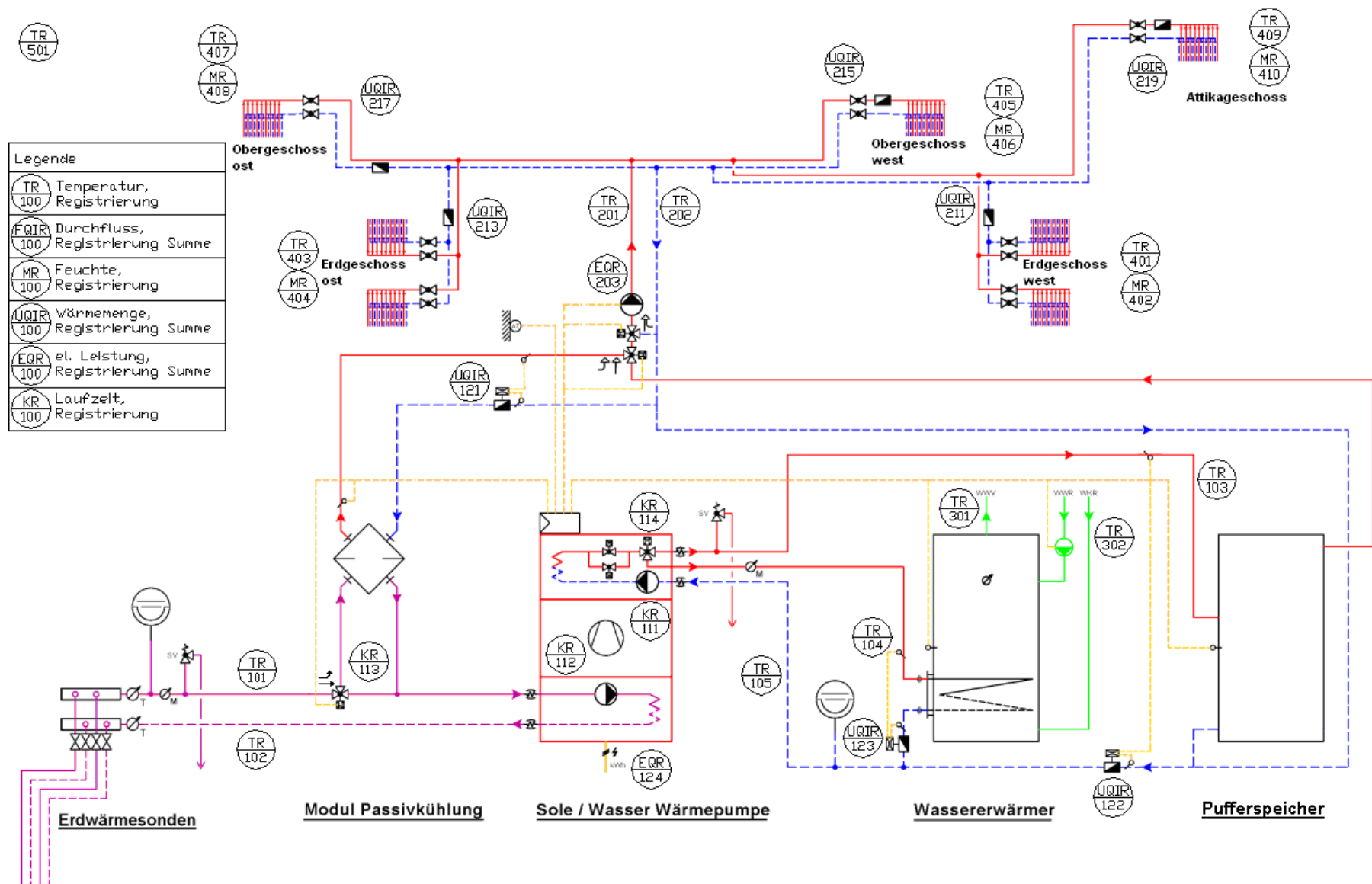


Abb. 5: Messpunkte der Feldmessung CosyPlace, dargestellt im Anlagenschema

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 E_{Komp} , $E_{\text{UWP-EWS}}$, $E_{\text{UWP-Kond}}$, $E_{\text{UWP-WVÜ}}$, E_{RGL})	EEZ
125	$E_{\text{UWP-EWS}}$	kWh	elektrischer Energiebezug UWP Erdwärmesonde	rechn.
126	$E_{\text{UWP-Kond}}$	kWh	elektrischer Energiebezug UWP Kondensator	rechn.
128	E_{RGL}	kWh	elektrischer Energiebezug Wärmepumpe Regelung	rechn.
129	E_{Komp}	kWh	elektrischer Energiebezug Wärmepumpe Kompressor	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
213	$Q_{\text{h-WHG2}}$	kWh	Nutzwärme Raumheizung Wohnung 2	WMZ
215	$Q_{\text{h-WHG3}}$	kWh	Nutzwärme Raumheizung Wohnung 3	WMZ
217	$Q_{\text{h-WHG4}}$	kWh	Nutzwärme Raumheizung Wohnung 4	WMZ
219	$Q_{\text{h-WHG5}}$	kWh	Nutzwärme Raumheizung Wohnung 5	WMZ
301	θ_{ww}	°C	Temperatur Austritt WW-Speicher	PT100
302	θ_{kw}	°C	Temperatur Kaltwasser Eintritt WW-Speicher	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 Wohnung 1	PT100 kap.F.
402	ϕ_{WHG1}	% r.F.	rel. Raumluf-Feuchte Wohnung 1	
405	θ_{WHG3}	°C	Raumluf-Temperatur Wohnung 3	PT100 kap.F.
406	ϕ_{WHG3}	% r.F.	rel. Raumluf-Feuchte Wohnung 3	
409	θ_{WHG5}	°C	Raumluf-Temperatur Wohnung 5	PT100 kap.F.
410	ϕ_{WHG5}	% r.F.	rel. Raumluf-Feuchte Wohnung 5	
501	θ_{AL}	°C	Temperatur Aussenluft	PT100 kap. F.
502	ϕ_{AL}	% r.F.	relative Feuchte Aussenluft	

100: Wärmeerzeuger

200: Wärmeverteilung & -übergabe

300: Trinkwasser

400: Gebäude

500: Wetter

Tab. 2: Messstellenliste der Feldmessung „CosyPlace“

Die wohnungsweise installierten Wärmemengenzähler (Messst.-Nr. 211 bis 219) erlauben keine Kältemessung oberhalb einer Vorlauftemperatur von 19.4 °C.

2.4 AUSWERTEMETHODIK UND GÜTEKRITERIEN

Die Datenerfassung erfolgt für die Wärmemengen- und Durchflusszähler über die Auslesung der Zählerstände über den M-Bus. Diese werden viertelstündlich von einem PC abgefragt und gespeichert. Die elektrischen Energiezähler, Temperaturen und Statusgrößen (Betriebsmodus) 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 Datenabfrage und -sicherung 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. 2) 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 Effizienz-Kennzahlen

Die folgende Grafik (Abb. 6) zeigt die verwendeten Definitionen der Effizienz-Kennzahlen und Bilanzgrenzen für die Bewertung einer Wärmeversorgung mittels Wärmepumpen.

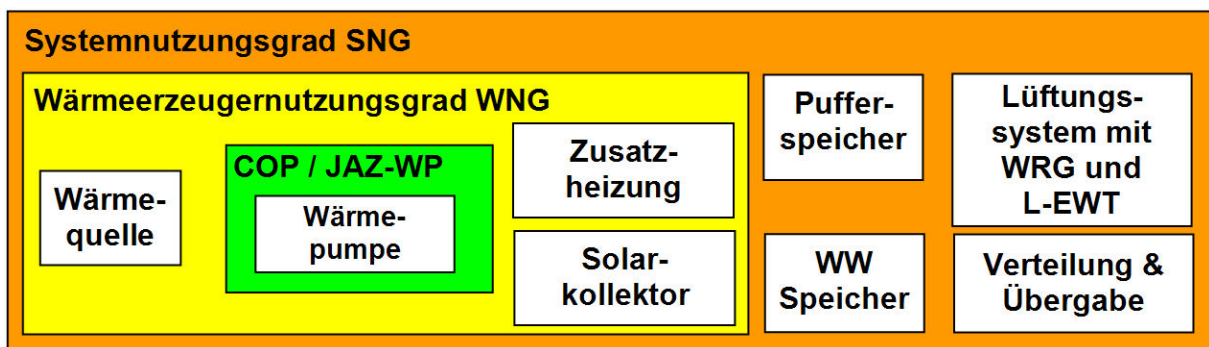


Abb. 6: Definition der Effizienz-Kennzahlen und Bilanzgrenzen für die Bewertung einer Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe

- 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 weist das Verhältnis der durch die Wärmepumpe erzeugten Wärme zu dem zugehörigen Energiebedarf im Kompressor ($E_{WP-Komp}$), in der Regelung (E_{WP-RGL}) und den Ventilatoren und Umwälzpumpen (je nach Vorhandensein) für die Überwindung der internen Druckverluste an Verdampfer ($E_{WP-UWP-Verd}$) und Kondensator ($E_{WP-UWP-Kond}$) aus. Es gelten die Bilanzgrenzen der SN EN 14511 [6].

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

$$WNG_{hww} = \frac{Q_{h-WP} + Q_{ww-WP} + Q_{hww-ZH} + Q_{hww-SOL}}{E_{WP-Komp} + E_{WP-RGL} + E_{WP-UWP-Verd} + E_{WP-UWP-Kond} + E_{ZH} + E_{SOL}} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Der Wärmeerzeugernutzungsgrad ist das Verhältnis der von allen Wärmeerzeugern (inkl. allfälliger Zusatzheizung (ZH) und Solarkollektoren (SOL)) erzeugten Wärme zu dem dafür erforderlichen Energieaufwand.

- **Systemnutzungsgrad SNG:**

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

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 Effizienz-Kennzahlen und Auswertungen basierend auf den Messpunkten

Basierend auf den obgenannten Definitionen der Effizienz-Kennzahlen und Bilanzgrenzen für die Bewertung einer Wärmeversorgung werden diese nachfolgend für das konkrete Messobjekt auf die mit den Messpunkten erfassbaren Bilanzgrenzen umgesetzt. Der Systemnutzungsgrad wird ohne Berücksichtigung der Lüftungsanlage bestimmt, da diese nicht im Messprogramm enthalten ist. Die Wärmepumpe kommt ohne Zusatzheizung (direktelektrischer Heizstab) aus.

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 Kompressor, Wärmepumpe Regelung, Umwälzpumpe Erdwärmesonde, Umwälzpumpe Kondensator und Umwälzpumpe Wärmeverteilung & -übergabe)
- **Wärmeerzeugernutzungsgrad (WNG) Heizung (h), Warmwasser (ww) & Kombination (hww)**
Durch die Wärmepumpe erzeugte Wärme für Heizung & Warmwasser dividiert durch den elektrischen Energiebezug der Wärmepumpe (E_{WP}) für den Kompressor (Komp) und die Regelung (RGL) sowie der Umwälzpumpen für die Erdwärmesonde (UWP-EWS) und –da ein Pufferspeicher vorhanden ist– den Kondensator (UWP-Kond). Mit (Messstelle 124)

$$E_{WP} = E_{Komp} + E_{RGL} + E_{UWP-EWS} + E_{UWP-Kond} + E_{UWP-WVÜ} \quad \text{Gl. 2.4}$$

gilt:

$$WNG_h = \frac{Q_{h-WP}}{[E_{WP} - E_{UWP-WVÜ}]_h} \quad \text{Gl. 2.5}$$

$$WNG_{ww} = \frac{Q_{ww-WP}}{[E_{WP} - E_{UWP-WVÜ}]_{ww}} \quad \text{Gl. 2.6}$$

$$WNG_{hww} = \frac{Q_{h-WP} + Q_{ww-WP}}{[E_{WP} - E_{UWP-WVÜ}]_{hww}} \quad \text{Gl. 2.7}$$

- **Systemnutzungsgrad (SNG) Heizung (h), Warmwasser (ww) & Kombination (hww)**
In den Wohnungen genutzte Wärme für Raumheizung & Warmwasser dividiert durch den gesamten dafür erforderlichen elektrischen Energiebezug der Wärmepumpe für den Kompressor (Komp) und die Regelung (RGL) sowie der Umwälzpumpen für die Erdwärmesonde (UWP-EWS), den Kondensator (UWP-Kond) und die Wärmeverteilung und -übergabe (UWP-WVÜ). Die in den Wohnungen bezogene Nutzwärme wird über Wärmemengenzähler messtechnisch erfasst:

$$\sum Q_{h-WHG} = Q_{h-WHG1} + Q_{h-WHG2} + Q_{h-WHG3} + Q_{h-WHG4} + Q_{h-WHG5} \quad \text{Gl. 2.8}$$

$$\sum Q_{ww-WHG} = Q_{ww-WHG1} + Q_{ww-WHG2} + Q_{ww-WHG3} + Q_{ww-WHG4} + Q_{ww-WHG5} \quad \text{Gl. 2.9}$$

Für die Raumheizung werden die von der Wärmepumpe erzeugte Wärme (Messstelle 122) und die Nutzwärme als identisch betrachtet, da sich die Wärmeerzeugung innerhalb des Dämmperimeters befindet und somit die Wärmeverluste der Anlage zur Nutzwärme beitragen:

$$\sum Q_{h-WHG} \equiv Q_{h-WP} \quad \text{Gl. 2.10}$$

Die erzeugte Wärme für die Warmwasserbereitstellung wird am Austritt der Wärmepumpe gemessen (Messstelle 123), die Nutzwärme Warmwasser wird aus der wohnungsweise gemessenen Zapfmengen und der Austrittstemperatur am Warmwasserspeicher bestimmt. Die mittlere Austrittstemperatur des Warmwassers betrug während der gesamten Messdauer rund 50°C. Mit Gleichung 2.4 ist der Systemnutzungsgrad:

$$SNG_h = \frac{Q_{h-WP}}{[E_{WP}]_h} \quad \text{Gl. 2.11}$$

$$SNG_{ww} = \frac{\sum Q_{ww-WHG}}{[E_{WP}]_{ww}} \quad \text{Gl. 2.12}$$

$$SNG_{hww} = \frac{Q_{h-WP} + \sum Q_{ww-WHG}}{[E_{WP}]_{hww}} \quad \text{Gl. 2.13}$$

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

$$WNG_k = \frac{Q_{k-EWS}}{[E_{UWP-EWS} + E_{RGL}]_k} \quad \text{Gl. 2.14}$$

- **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). Analog zum Heizfall wird die im Kühlbetrieb an die Sonden abgeführte Wärme mit der Nutzkälte in den Wohnungen identifiziert.

$$SNG_k = \frac{\sum Q_{k-EWS}}{[E_{UWP-EWS} + E_{RGL} + E_{UWP-WVÜ}]_k} \quad \text{Gl. 2.15}$$

2.4.2 Behaglichkeitsbewertung

Globale Behaglichkeit

Die Raumluft-Temperatur, die relative Luftfeuchte und die Oberflächen-Temperaturen der Umhüllungsflächen sind die wichtigsten Größen zur Evaluation der globalen thermischen Behaglichkeit in einem Raum. Die Raumluft- und 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 dies bei den gemessenen Raumlufttemperaturen auch der Fall ist. Somit werden die Raumluft-Temperatur, die mittlere Oberflächen-Temperatur und 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 Vermeidung von Temperaturspitzen sowie eine leichte Absenkung der Raumtemperaturen im Sommer 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. 7 an.

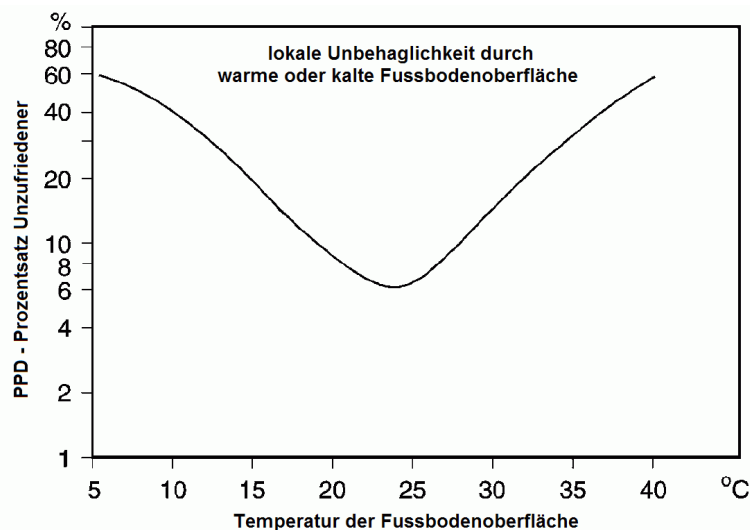


Abb. 7: lokales Unbehagen durch warme oder kalte Oberflächentemperaturen des Fussbodens für beschuhte Füße gemäss SN EN ISO 7730

Neben der Beschreibung in Abb. 7 lassen sich unterschiedliche Hinweise auf das Temperaturempfinden von nackten Füßen abhängig vom Oberflächenmaterial finden (siehe [9]), die in Tab. 3 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. 3: Behagliche Fussboden-Oberflächentemperaturen

3 ERGEBNISSE

Für die Ergebnisse werden die Messungen zwischen dem 01. November 2007 und dem 30. September 2009 ausgewertet. Dabei werden wegen der aussentemperaturabhängigen, automatischen Umschaltung zwischen Sommer- und Winterbetrieb die Auswertungsperioden kalendarisch festgelegt (Tab. 1). Durch den verspäteten Bezug der Wohnungen im Herbst 2007 überschneiden sich zwei der jeweils sechsmonatigen Messperioden im Oktober 2008.

Nach der Übersicht über die klimatischen Rahmenbedingungen der beiden Messjahre sollen in Kapitel 3.2 die wesentlichen Ergebnisse der Messperioden 2007/2008 dargestellt werden, soweit sinnvoll aufgeteilt in Sommer- und Winterbetrieb. Es folgt eine Diskussion der Erkenntnisse und der daraus resultierenden Optimierungen, welche im Hinblick auf die Messperioden 2008/2009 vorgenommen wurden. Die Ergebnisse dieses zweiten Betriebsjahres folgen danach im gleichen Muster wie die Auswertung der Perioden 2007/2008.

Die Lüftungsanlage mit Erdwärmetauscher und Wärmerückgewinnung bleibt bei den Betrachtungen ausgeklammert.

Wie ein Kapitel 2.4.1 erwähnt, wird die von der Wärmepumpe im Heizbetrieb erzeugte Wärme als Nutzwärme identifiziert, da sich die Wärmepumpe innerhalb des Dämmperimeters befindet. Die Messungen zeigen, dass die Differenz zu den wohnungsweise installierten Wärmemengenzählern zwischen 5 % und 10 % der erzeugten Wärme liegt, begründet durch Verluste im Heizungs-Pufferspeicher und Verteilsystem.

3.1 KLIMATISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die gemessenen Klimadaten aller vier Auswertungsperioden sind in Tab. 4 zusammengefasst. Keine der vier Messperioden war durch extreme Wetterereignisse wie beispielsweise länger anhaltende Hitzeperioden im Sommer geprägt. Die kalendarisch festgelegte Wintersaison 2008/2009 war mit 2647 Heizgradtagen $HGT_{20/12}$ leicht kälter als die Vorjahresperiode 2007/2008 mit 2423 Heizgradtagen $HGT_{20/12}$. Ebenso wurden mit 282 kWh/m² für die erste Winterperiode gegenüber 345 kWh/m² für die Zweite 18 % weniger Globalstrahlungssumme registriert. Insgesamt fiel der Winter 2008/2009 damit leicht kälter aus als im Vorjahr.

Mit je 9 Hitzetagen und 105 gegenüber 113 Kühlgradtagen $KGT_{20/20}$, dafür 916 kWh/m² gegenüber 811 kWh/m² Globalstrahlungssumme waren die beiden Sommerperioden klimatisch vergleichbar. Die Normwerte der Messstation Basel-Binningen DRY weisen rund 30 % weniger Kühlgradtage auf als diejenigen der beiden gemessenen Sommerperioden.

	$HGT_{20/12}$	G_H		$KGT_{20/20}$	G_H
Winter 07/08	2'423	345 kWh/m ²	Sommer 08	113	811 kWh/m ²
Winter 08/09	2'648	282 kWh/m ²	Sommer 09	105	916 kWh/m ²
Winter DRY SIA 2028	2'608	285 kWh/m ²	Sommer DRY SIA 2028	72	830 kWh/m ²

Tab. 4: Klimadaten aller Messperioden (kalendarisch festgelegt)

Datengrundlage: Wetterstation Gymnasium Bäumlhof, Basel respektive SIA 2028, DRY Klimastation Basel-Binningen

3.2 MESSPERIODE 2007/2008

Während der Messperiode 2007/2008 waren lediglich drei von 5 Wohnungen, mit zusammen 5 Erwachsenen und einem Kleinkind bewohnt. Die beiden weiteren Wohnungen wurden am 01. Sep. 2008 bzw. 01. Okt. 2008 von insgesamt 3 Erwachsenen und 2 Kindern bezogen. Sämtliche Raumthermostaten dieser zunächst unbelegten Wohnungen wurden bei einer Begehung im Herbst 2007 auf 20 °C eingestellt.

Die Auswertung der ersten Winterperiode wird für den Zeitraum 01. Nov. 2007 bis 30. Apr. 2008 vorgenommen, diejenige der Sommerperiode für den Zeitraum 01. Mai 2008 bis 30. Okt. 2008. Als mittlere Belegung über die Sommerperiode zur Berechnung des spezifischen Warmwasserbedarfs wird mit 7 Personen gerechnet.

3.2.1 Energiebedarf Winterbetrieb 2007/2008

Abbildung 8 zeigt links die erzeugte Wärme der Wärmepumpe sowie rechts die zur Erzeugung und Verteilung dieser Wärme bezogene Elektrizität. Für Warmwasser wurden 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 50 °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.

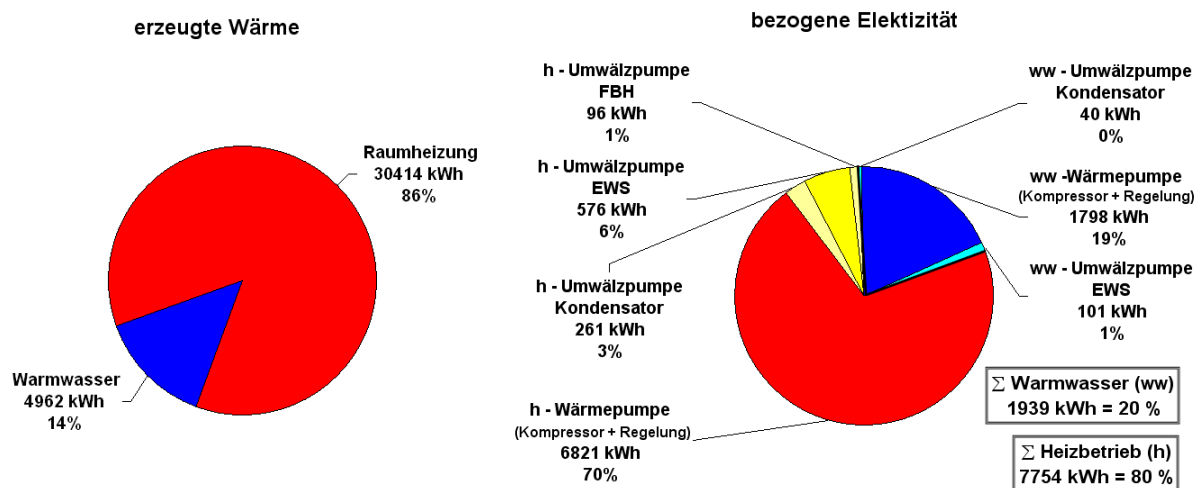


Abb. 8 links: erzeugte Wärme, rechts: bezogene Elektrizität für die Winterperiode (01.11.2007 – 30.04.2008)

Die aus der erzeugten Heizwärme resultierende spezifische Raumwärmezufuhr liegt mit 103 MJ/m² deutlich höher als die 36 MJ/m², welche nach SIA 380/1 berechnet wurden. 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. Aus den Messdaten ergibt sich eine real erreichte Jahresarbeitszahl für den Heizbetrieb von 4.3, woraus ein gewichteter Endenergiebezug von 13.3 kWh/m² resultiert. In der gewichteten Endenergie, dem Mass für die dem Gebäude zugeführten Energie, stellt sich die Abweichung im Heizbetrieb somit deutlich geringer dar als im Heizwärmebezug, dies aufgrund der real höheren Effizienz der Anlage. Mögliche Ursachen für die Abweichung im Heizwärmebezug werden in Kapitel 3.9 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. Eine offenkundige, mögliche Ursache ist die gegenüber dem Standardrechenwert erhöhte Raumtemperatur (22 °C gegenüber 20 °C). Die Messdaten der zweiten Periode zeigen hingegen, dass Bauaustrocknung und unvollständige Gebäudebelegung keinen wesentlichen Einfluss auf den Bedarf haben.

Die bezogene Elektrizität zur Erzeugung und Verteilung der Wärme verteilt sich zu 19 % bzw. 1'798 kWh auf die Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb, zu 70 % bzw. 6'821 kWh auf die Wärmepumpe im Heizbetrieb 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 aufgrund der Raumthermostaten optimal eingesetzt ist.

3.2.2 Energiebedarf Sommerbetrieb 2008

Abbildung 9 zeigt links die erzeugte resp. abgeführte Wärme sowie rechts die zur Bereitstellung und Verteilung bezogene Elektrizität. Für Warmwasser wurden von der Wärmepumpe 4'642 kWh Wärme erzeugt. Die spezifische Warmwasserbereitstellung beträgt damit 3.6 kWh/Person/Tag, der personenbezogene Verbrauch liegt bei 52 l/Person/Tag (mittlere Zapftemperatur: 50 °C) -ein typischen Bedarf. Die erzeugte Wärme für Warmwasser beträgt in der Sommerperiode 45 % der gesamthaft erzeugten Wärme. Für Raumheizung wurden 5'630 kWh oder 55 % der Wärme erzeugt. Für die Raumkühlung

wird in der ersten Sommerperiode mit 2'078 kWh bzw. 7 MJ/m² nur ein begrenzter Einsatz registriert. Auf die Ursachen wird in Kapitel 3.3.2 separat eingegangen.

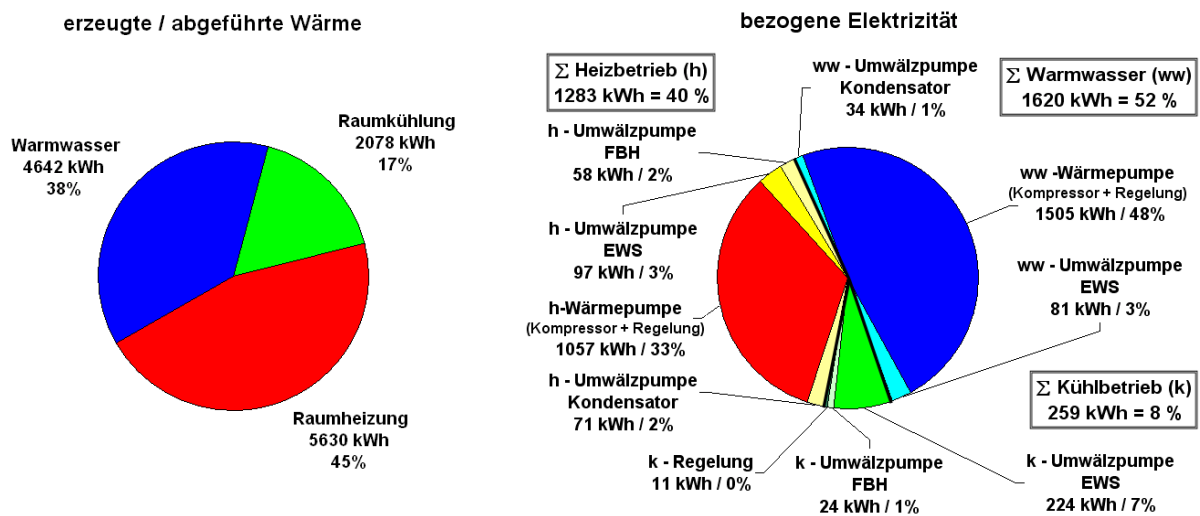


Abb. 9: links: erzeugte Wärme, rechts: bezogene Elektrizität für die Sommerperiode (01.05.2008 – 31.10.2008)

Die bezogene Elektrizität verteilt sich zu 48 % bzw. 1'505 kWh auf die Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb und zu 33 % bzw. 1'057 kWh auf die Wärmepumpe im Heizbetrieb. Für die Bereitstellung der Raumkälte wurden von der Wärmepumpe lediglich 11 kWh Elektrizität bezogen, einzig zur Regelung der Anlage. Von den gesamthaft benötigten 588 kWh für die Umwälzpumpen fallen 42 % oder 248 kWh im Kühlbetrieb an. Im Heiz- und Warmwasserbetrieb hat die Wärmepumpe den deutlich grössten Anteil am Elektrizitätsbezug, die Umwälzpumpen beziehen verhältnismässig wenig Elektrizität. Im passiven Kühlbetrieb zeigt sich deutlich die Leistungsdifferenz zwischen den Umwälzpumpen für den Fussbodenkreis mit 30...40 W und der Erdwärmesonde mit 310 W Leistungsaufnahme, die benötigte Betriebselektrizität für den Kühlbetrieb fällt grösstenteils zu Lasten der Erdwärmesonden Umwälzpumpe an.

3.2.3 Kennzahlen Energieeffizienz

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. Die Definition ist in Kapitel 2.4.1 detailliert angegeben. Für Raumheizung und Warmwasser dient einzig die Wärmepumpe als Wärmeerzeuger. Ein direkt-elektrischer Heizstab ist nicht im Einsatz. Für die Raumkühlung werden die Umwälzpumpe der Erdwärmesonde und der zeitliche Anteil der Wärmepumpen-Regelung als Aufwand zur Wärmeabfuhr (Kälteerzeugung) gewertet.

Abbildung 10 zeigt für die Sommerperiode 2008 Wochenmittelwerte des Wärmeerzeugernutzungsgrades für Warmwasser (WNG_ww) und den passiven Kühlbetrieb (WNG_k). Der Wärmeerzeugernutzungsgrad im Warmwasserbetrieb liegt zwischen rund 2.5 und 3.0. Mit zunehmender Aussenluft-Temperatur steigt er leicht an. Der Wärmeerzeugernutzungsgrad der passiven Kühlung liegt zwischen 3.0 und 12.3. Die relativ grosse Streubreite der Wärmeerzeugernutzungsgrade für die passive Kühlung liegt darin begründet, dass die abgeführte Wärme einzig durch die Temperaturverhältnisse in Raum und Erdwärmesonde bestimmt wird. Der elektrische Aufwand für die Umwälzpumpen jedoch ist unabhängig davon alleine durch die Laufzeit gegeben und steht somit in keinem direkten Zusammenhang zur abgeführten Wärmemenge. Hiermit begründet sich auch der relativ kleine Wert von 3.0 für den Wärmeerzeugernutzungsgrad im Kühlbetrieb bei einer Aussenlufttemperatur von 15 °C.

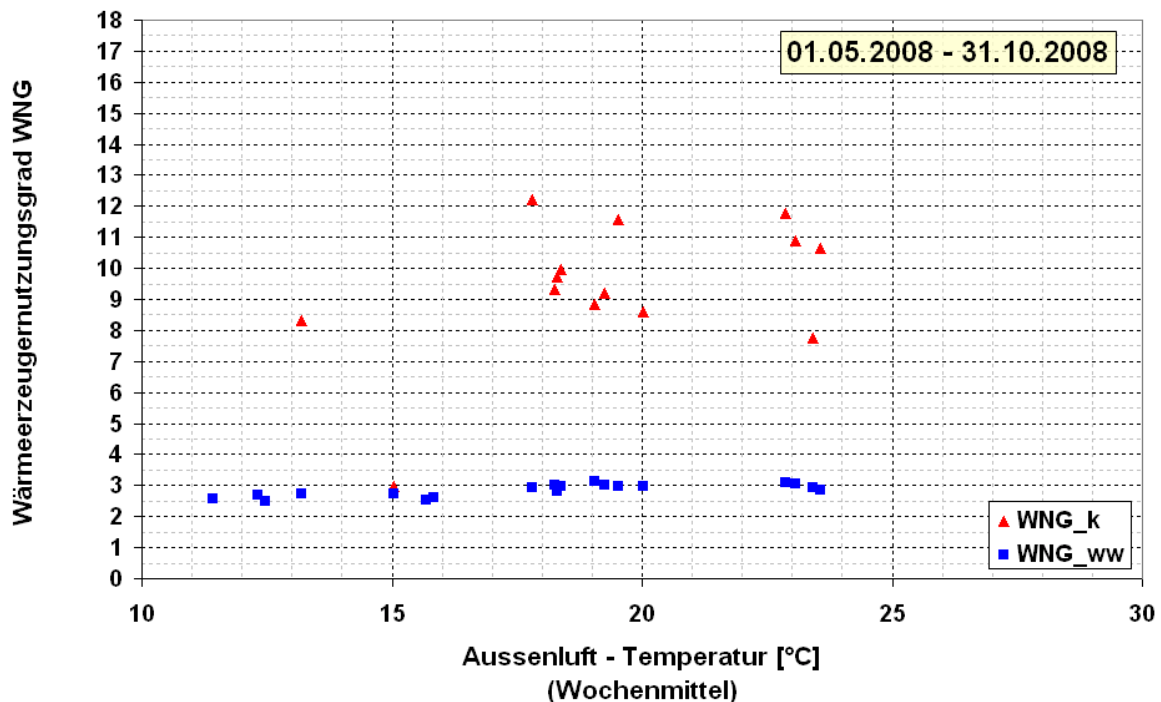


Abb. 10: Wochenmittelwerte des Wärmeerzeugernutzungsgrades (WNG) der Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb sowie der passiven Kühlung (01.05.2008 – 31.10.2008)

In untenstehender Tab. 5 sind die Wärmeerzeugernutzungsgrade für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser der beiden Auswertungsperioden im ersten Betriebsjahr aufgeführt.

	Raumheizung	Raumkühlung	Warmwasser	gesamt
Winter 07/08	4.0	-	2.6	3.7
Sommer 08	4.6	8.8	2.9	4.0
Jahr	4.1	8.8	2.7	3.8

Tab. 5: Wärmeerzeugernutzungsgrad für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser im ersten Betriebsjahr (01.11.2007 – 31.10.2008)

Im Warmwasserbetrieb weist die Wärmepumpe aufgrund des höchsten Temperaturhubes den geringsten Wärmeerzeugernutzungsgrad von 2.7 übers Jahr auf. Mit einem Wert von 2.6 in der Winterperiode und 2.9 in der Sommerperiode zeigt sich der Einfluss der Wärmequellentemperatur (Erdwärmesondenaustritt), welche im Winter einen Mittelwert von 3.8 °C erreichte, im Sommer jedoch einen wesentlich höheren Mittelwert von 12.7 °C. Im Wärmeerzeugernutzungsgrad für Raumheizung zeigt sich mit einem Wert von 4.1 für das gesamte erste Betriebsjahr der durch die Niedertemperatur-Fussbodenheizung geringe notwendige Temperaturhub in der Wärmepumpe und die damit verbundene gute Effizienz. In der kalendarischen Sommerperiode 2008 wird auch im Heizbetrieb mit einem Wärmeerzeugernutzungsgrad von 4.6 eine erhöhte Effizienz aufgrund höherer Wärmequellentemperaturen (Erdsonde) erreicht. 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.

Der Systemnutzungsgrad ist definiert als Nutzwärme dividiert durch den gesamten Aufwand zur Wärmeerzeugung, -verteilung und -übergabe. Dadurch, dass die Lüftungsanlage hier nicht betrachtet wird, unterscheidet sich der Systemnutzungsgrad vom Wärmeerzeugernutzungsgrad nur durch die Umwälzpumpe im Fussbodenkreis (Heizbetrieb) und die nicht nutzbaren Wärmespeicherverluste der Warmwasserbereitstellung. In Tabelle 6 sind die Systemnutzungsgrade für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser aufgeführt.

	Raumheizung	Raumkühlung	Warmwasser	gesamt
Winter 07/08	3.9	-	1.2	3.4
Sommer 08	4.4	8.0	1.4	3.1
Jahr	4.0	8.0	1.3	3.3

Tab. 6: Systemnutzungsgrad für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser im ersten Betriebsjahr, ohne Lüftungsanlage (01.11.2007 – 31.10.2008)

Der Systemnutzungsgrad für Raumheizung liegt mit 4.0 nur um 0.1 niedriger als der Wärmeerzeugernutzungsgrad. Hierin zeigt sich wiederum die geringe elektrische Leistungsaufnahme der elektronisch geregelten, hocheffizienten Permanentmagnet-Synchronmotor-Pumpe im Fussbodenkreis. Diese kann den Gesamtvolumenstrom an die infolge der Raumthermostaten wechselnden Einzelvolumenströme anpassen. Derselbe Effekt zeigt sich auch im hohen Systemnutzungsgrad der Raumkühlung von 8.0. Die grössere Differenz zwischen Wärmeerzeuger- und Systemnutzungsgrad im Kühlbetrieb ist bedingt durch den bereits geringen Aufwand zur Kälteerzeugung, welcher alleine von der Umwälzpumpe im Erdwärmesondenkreis und der Regelung erbracht wird.

3.2.4 Raumkonditionen Winterbetrieb 2007/2008

Die Häufigkeitsverteilung der Raumtemperaturen in der ersten Winterperiode, dargestellt in Abb. 11 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. Die Standardabweichung beträgt 1.2 °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 % der Auswertungsperiode 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. 11 rechts, liegt für Wohnung 1 zwischen 29 %_{r.F.} und 60 %_{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 16 %_{r.F.} bis 47 %_{r.F.} reicht und in Wohnung 5 von 17 %_{r.F.} bis 51 %_{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.

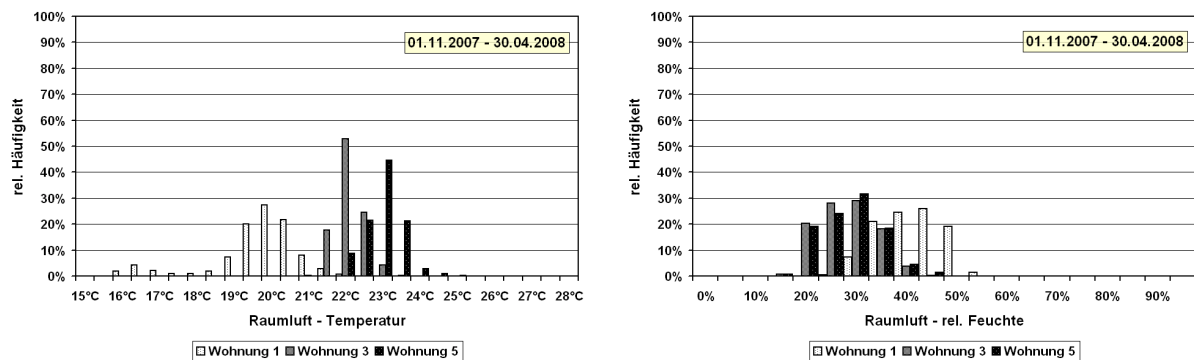


Abb. 11 Häufigkeitsverteilung in der ersten Winterperiode (01.11.2007 – 30.04.2008) für die Wohnungen 1, 3 & 5. Links: Temperaturen der Raumluft, rechts: rel. Feuchte der Raumluft

3.2.5 Raumkonditionen Sommerbetrieb 2008

Die Häufigkeitsverteilung der Raumtemperaturen in der Sommerperiode, dargestellt in Abb. 12 links, zeigt, dass die Raumtemperaturen in den Wohnungen hauptsächlich im Bereich 20 °C bis 26 °C liegen. Die mittlere Raumtemperatur in Wohnung 1 liegt bei 24.0 °C, die Standardabweichung beträgt 1.1 °C. Die mittlere Raumtemperatur in Wohnung 3 liegt bei 23.9 °C (Standardabweichung 1.0 °C) und in Wohnung 5 liegt die mittlere Raumtemperatur bei 23.8 °C (Standardabweichung 1.7 °C). Es gibt nur wenige Stunden in denen eine Raumluft-Temperatur von 26 °C überschritten wird.

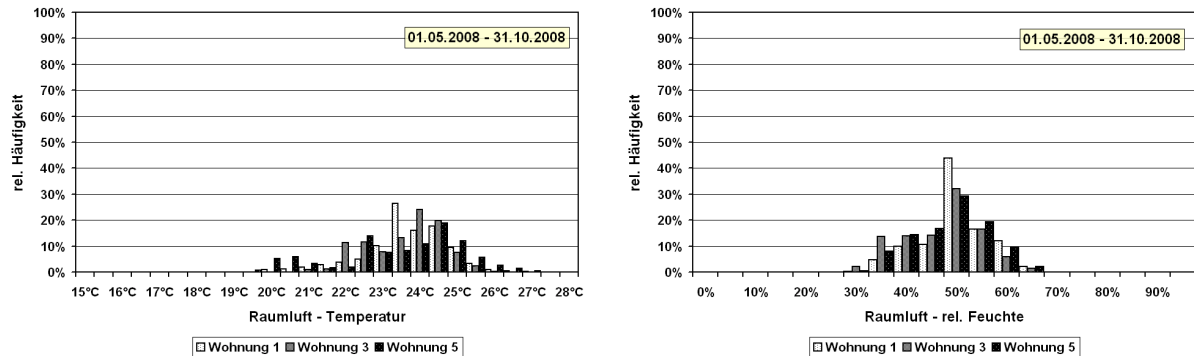


Abb. 12: Häufigkeitsverteilung während der Sommerperiode 2008 für die Wohnungen 1, 3 & 5
links: Temperaturen der Raumluft, rechts: rel. Feuchte der Raumluft (01.05.2008 – 31.10.2008)

Die relative Feuchte der Raumluft (Abb. 12 rechts) variiert für die Wohnung 1 zwischen 33 % r.F. und 72 % r.F. bei einem Mittelwert von 53 % r.F. und für die Wohnungen 3 und 5 zwischen 27 % r.F. und 73 % r.F. respektive 31 % r.F. und 71 % r.F. bei Mittelwerten von 50 % r.F. respektive 52 % r.F.. Auch die Raumluftfeuchte liegt während der Sommerperiode 2008 damit in einem behaglichen Bereich.

3.2.6 Nutzerzufriedenheit

Zusammenfassend kann aus den mündlichen und schriftlichen Rückmeldungen der Bewohner geschlossen werden, dass sie mit der thermischen Behaglichkeit insgesamt zufrieden sind. Die Raumtemperaturen wurden als angenehm und gleichmässig empfunden. Die Raumluft-Feuchte wurde im Winter jedoch teilweise als zu gering wahrgenommen. Die Messdaten zur Raumluft-Temperatur und -Feuchte sind in den vorigen Kapiteln 3.2.4 für die Winterperiode und 3.2.5 für die Sommerperiode wiedergegeben.

Der Bewohnerschaft von Wohnung 3 ist über die allgemeinen Angaben hinaus folgender Punkt aufgefallen: Die Fussbodenheizung wird in der Heizperiode nur sehr schwach, der Fussboden teilweise als zu kalt 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 Kondensations-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. Grundsätzlich ist dieses Verhalten für sehr gut wärmedämmende Fenster zwar normal, mag aber als störend empfunden werden.

3.3 ERKENNTNISSE UND OPTIMIERUNGEN

3.3.1 Welche Heizkurve passt 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 kaufvertraglich zugesicherten –und auch gemessenen– erhöhten Raumtemperaturen von 23 °C anstelle 20 °C ergibt sich rechnerisch eine Vorlauftemperatur von 34.1 °C anstelle 30 °C, wobei der Rücklauf auf 28.5 °C anstelle 25 °C steigt.

Tatsächlich wurde bei der Inbetriebnahme der Heizungsanlage eine Vorlauftemperatur von 40 °C bei einer Aussentemperatur von -8 °C und einer bestellten Raumtemperatur von 23 °C eingestellt. Die eingestellte Heizkurve ist im Auslegungspunkt also um 6 °C höher als die rechnerisch notwendige

Heizkurve. Mit dem Vorhandensein von Raumthermostaten wird jedoch eine zu hohe Vorlauftemperatur durch deren Eingriff 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. Mit einer 2% besseren Effizienz je Grad niedrigerer Vorlauftemperatur in der Wärmepumpe besteht ein Effizienzsteigerungspotenzial von rund 10%. Dieses wurde –wie im nachfolgenden Kapitel beschrieben– auf die Heizsaison 2008/2009 hin realisiert.

3.3.2 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 Erfahrung, wie eine hohe thermische Behaglichkeit bei gleichzeitig energieeffizienter Betriebsweise erreicht werden kann. Sich kurzfristig abwechselnder Heiz- und Kühlbetrieb sollte vermieden werden. Im Folgenden werden Optimierungsmöglichkeiten dargelegt. Deren Realisierung auf das zweite Betriebsjahr hin, sowie Anpassungen aufgrund der Erfahrungen im Verlauf des Sommers 2009 konnten die Effizienz und im Kühlbetrieb auch den Nutzen der Wärmepumpenanlage beträchtlich steigern.

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 Inbetriebnahme im Jahr 2007 wurden die Werte so festgelegt, dass unterhalb einer Grenztemperatur von 15 °C der Heizbetrieb aktiviert (Einschaltpunkt) und oberhalb von 20 °C wieder deaktiviert (Ausschaltpunkt) wird. Der Kühlbetrieb wird an einer Grenztemperatur von 24 °C ohne Hysterese aktiviert bzw. deaktiviert (Abb. 13). Die Grenztemperaturen beziehen sich auf eine gleitend über 6 Stunden gemittelte Aussentemperatur.

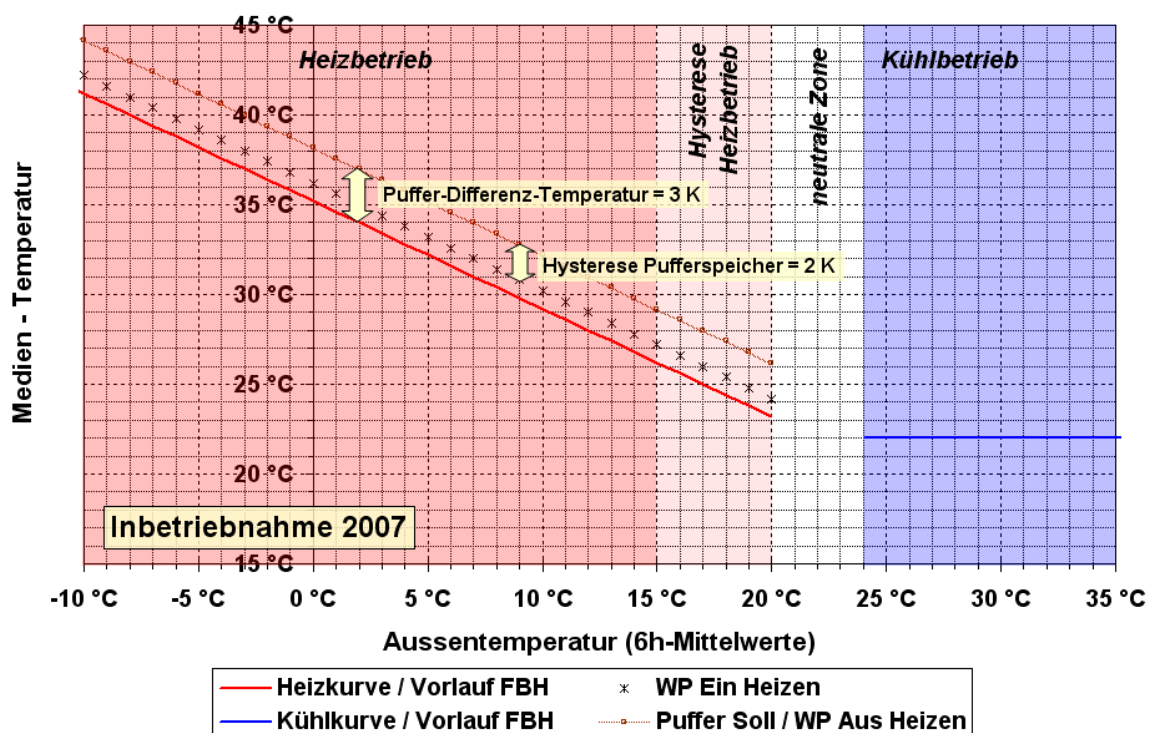


Abb. 13: Regelcharakteristik Heiz- / Kühlbetrieb und saisonale Umschaltung bei Inbetriebnahme (2007)

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 jedoch besser in der Regelung abgebildet werden, als mit einem kürzeren Mittelungsintervall. Durch ein längeres Mittelungsintervall sollte jedoch auch der Grenzwerte für die Ein-/Ausschaltung vom Kühlbetrieb hin zu niedrigeren Temperaturen verschoben werden. So liegt der maximale 1h-Mittelwert der Aussentemperatur in der Messperiode Sommer 2008 bei 35 °C der maximale 24h-Mittelwert jedoch bei nur 26.5 °C (Abbildung 14).

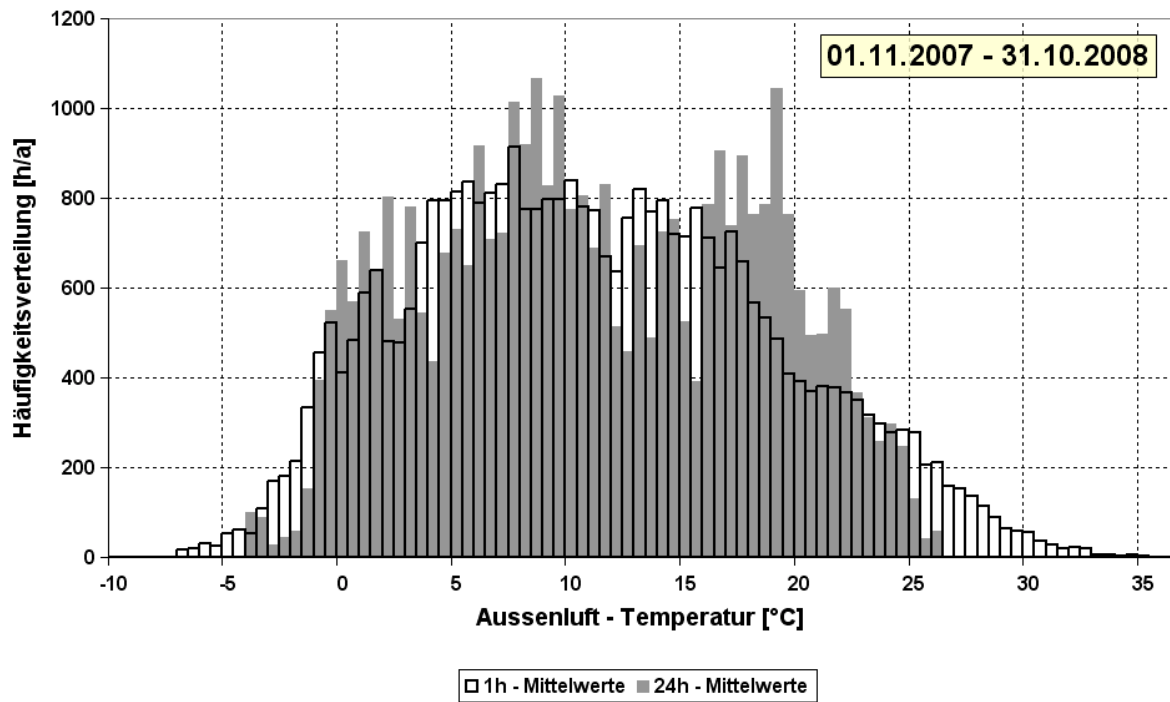


Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der Aussenluft-Temperaturen in der Messperiode (01.11.2007 – 31.10.2008)

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

Die Auswertung der Messdaten der Wärmepumpe im Heizbetrieb während des ersten Betriebsjahres zeigen nun, dass oberhalb einer Aussenluft-Temperatur von 15 °C nur noch sehr selten Heizwärme erzeugt wird (Abb. 15). Eine Interpolation der gemessenen Heizlast (12h-Mittelwert) ergibt, 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. Der Ausschaltpunkt für den Heizbetrieb kann also von 20 °C auf 17 °C gesenkt werden. Dies ist für ein Gebäude nach MINERGIE-P®-Standard immer noch ein hoher Wert, der allerdings mit einer kaufvertraglich zugesicherten Raumtemperatur von 23 °C für eine der Wohnungen akzeptiert werden kann.

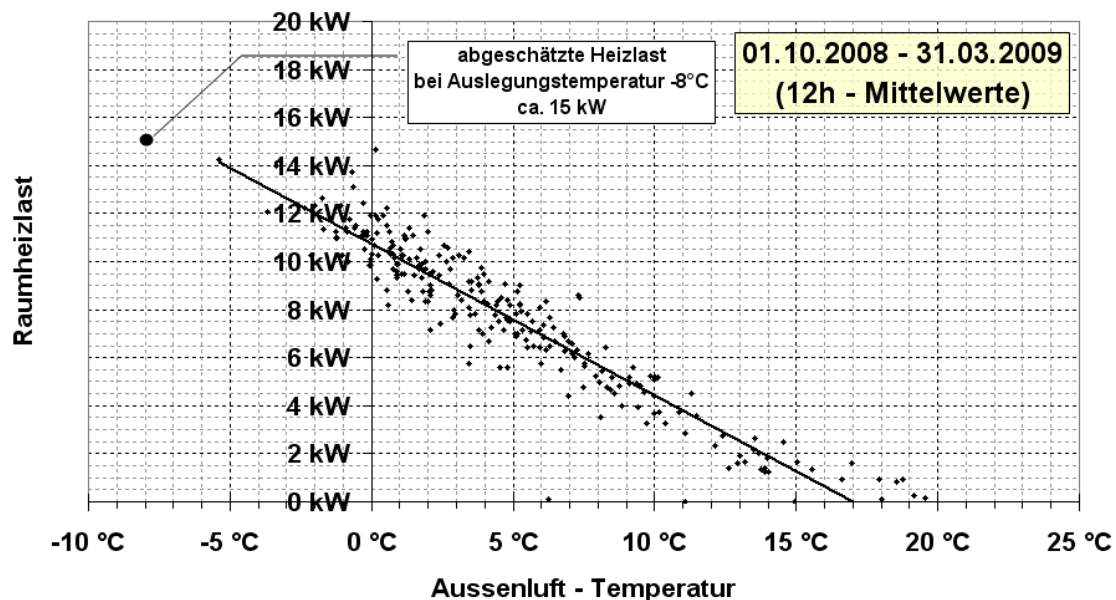


Abb. 15: Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes in Korrelation mit der Aussenluft-Temperatur

Überdies zeigte sich im ersten Betriebsjahr mit abgeführten 7 MJ/m² Wärme ein eher geringer Einsatz der Kühlung, unter anderem eine Folge des durch die Reglereinstellung gelegten Schwerpunkts auf den Heizbetrieb. Mit einer für den Heizbetrieb abgesenkten Grenztemperatur von 17 °C kann auch die Grenztemperatur für den Kühlbetrieb gesenkt werden, womit eine weiter reichende Nutzung der Kühlfunktion erreicht werden kann.

Von den wohnungsweise installierten Wärmemengenzählern wurde im 1. Betriebsjahr an insgesamt 272 von 366 Tagen Heizwärmebezug registriert. An 73 Tagen wurde Kühlbetrieb im Gebäude erfasst. An 27 Tagen wurde zeitversetzt sowohl Heizwärmezufuhr im Heizbetrieb als auch Wärmeabfuhr im Kühlbetrieb registriert. An den Tagen mit sowohl Heiz- als auch Kühlbetrieb wurden insgesamt 402 kWh Wärme zu und kurzzeitig später wieder abgeführt, also unproduktiver Mehrbedarf erzeugt. Dies entspricht 1 % der bereitgestellten Heizwärme oder 19% des Kühlenergiebezugs. Der erzeugte elektrische Mehrbedarf beträgt 151 kWh bei einem Systemnutzungsgrad für den Kühlbetrieb von 8.0 und für den Heizbetrieb von 4.0. Das entspricht 2 % des gesamten elektrischen Energiebezugs für Raumheizung und -kühlung.

Als weitere Bewertungsgrösse für die Reichweite von Heiz- und Kühlbetrieb wird 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. Als Bewertungsgrundlage dienen die Messwerte der Aussentemperaturen vom ersten Betriebsjahr, aus denen sich für vorgegebene Reglereinstellungen der Betriebszustand der Anlage für jede Stunde ermitteln lässt. Mit der ursprünglichen Reglereinstellung ergibt sich dabei die Darstellung in Abbildung 16. Bei Aussentemperaturen im Bereich 15 °C bis 20 °C zeigt sich eine Überschneidung des Heiz- und Kühlbetriebes, welche den obgenannten 27 Tagen entspricht, an denen zeitversetzt sowohl Heiz- als auch Kühlbetrieb aktiviert ist. Zudem werden durch den Kühlbetrieb nicht alle Stunden bei warmen Aussentemperaturen abgedeckt.

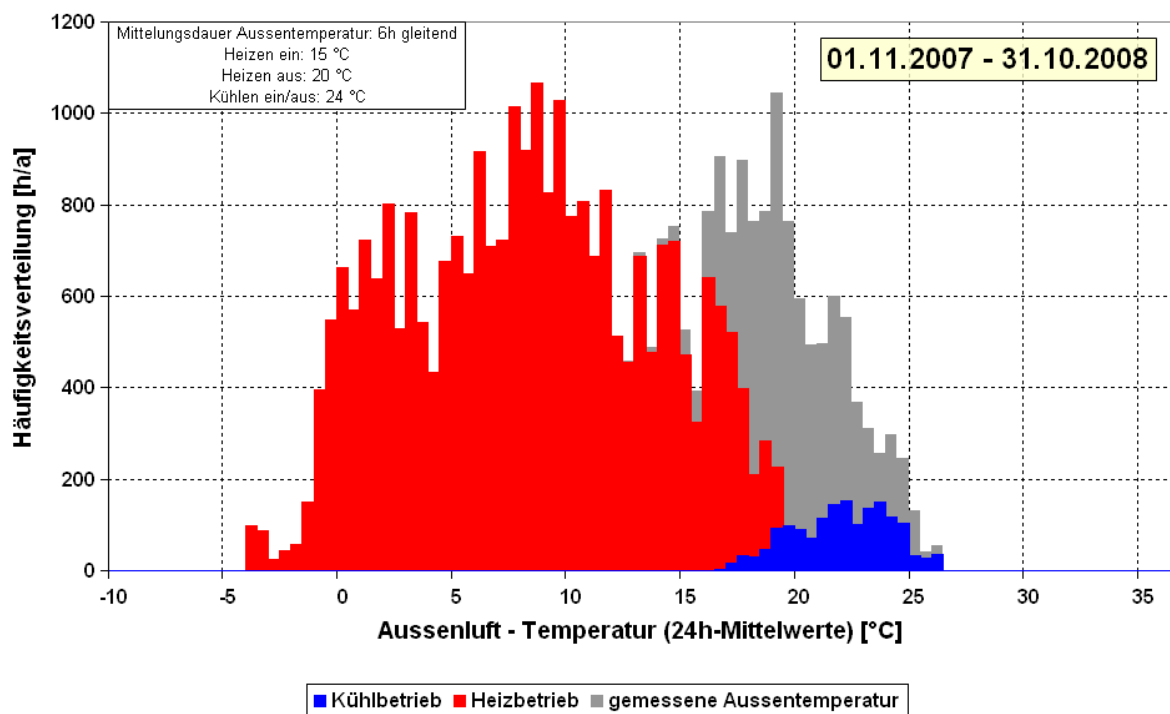


Abb. 16: Häufigkeitsverteilung der Heiz- / Kühlbetriebsstunden nach den Reglergrundeinstellungen in Korrelation mit der Aussentemperatur dargestellt für das erste Jahr der Messungen (01.11.2007 – 31.10.2008)

Mit einer Optimierung der Reglereinstellungen kann sowohl die Nutzung der Kühlfunktion gesteigert als auch der unproduktive wechselnde Heiz- und Kühlbetrieb vermieden werden. Basierend auf einer Parameterstudie werden folgende Einstellungen der Heiz- respektive Kühlgrenze sowie der Mittlungsdauer der Aussentemperatur als optimal betrachtet:

- gleitende Mittelwertbildung 24h-Intervall
- Grenztemperaturen Heizbetrieb: ein, wenn $T_{A,24h} < 15\text{ °C}$
aus, wenn $T_{A,24h} > 17\text{ °C}$
- Grenztemperaturen Kühlbetrieb: ein, wenn $T_{A,24h} > 20\text{ °C}$
aus, wenn $T_{A,24h} < 20\text{ °C}$

Damit ergibt sich das Bewertungsdiagramm in Abb. 17. 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.

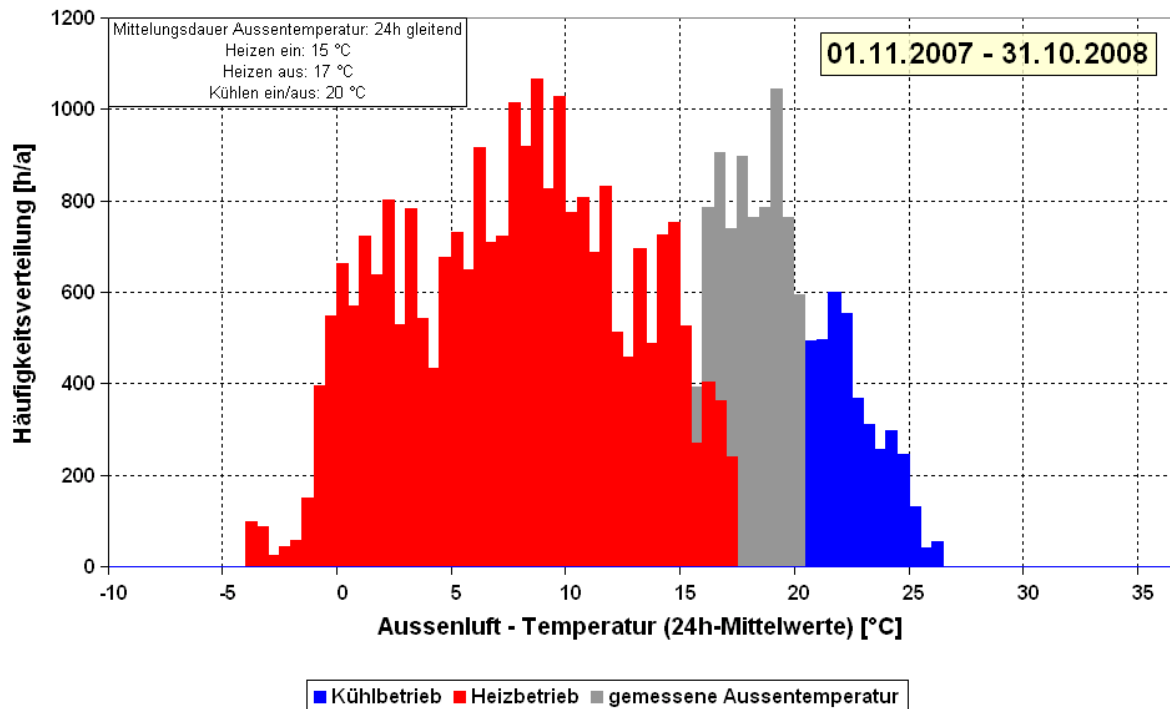


Abb. 17: Häufigkeitsverteilung der Heiz- / Kühltbetriebsstunden nach Optimierung in Korrelation mit der Aussentemperatur dargestellt für das erste Jahr der Messungen (01.11.2007 – 31.10.2008)

3.3.3 Wird der Pufferspeicher im Heizbetrieb sinnvoll betrieben?

Im Fall des passiven Kühltbetriebs mit der Erdwärmesonde und dem Fussbodenheizkreis wird die Regelung der Kühlleistung über eine zentrale Beimischschaltung realisiert (siehe Hydraulikschaltung in Kapitel 2.3). Durch die Verwendung von Raumthermostaten in sämtlichen Räumen (inkl. Badezimmer) kann im Heizbetrieb keine Mindestwärmeabnahme für die Wärmepumpe sichergestellt werden. Deshalb wird 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 in der ersten Winterperiode war relativ hoch. Aus den Messdaten zeigte sich weiter, dass die Wärmepumpe pro Einschaltung im Heizbetrieb nur auf eine mittlere Laufzeit von 21 min kommt und zu oft ein- und wieder ausschaltet (siehe auch Kapitel 3.7). 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 kann der Pufferspeicher mit einer grösseren Hysterese betrieben werden. Bei gleichzeitiger Absenkung der Heizkurve, wie im Abschnitt 3.3.1 dargelegt, kann eine Erhöhung der Wärmepumpen-Vorlauftemperatur vermieden werden.

3.3.4 Optimierte Regelung

Basierend auf dem Vergleich der eingestellten und rechnerischen Heizkurve sowie der Betrachtung der saisonalen Umschaltung Heiz- und Kühlbetrieb im Kapitel 3.3.2 sowie dem Betriebsverhalten des Heizpufferspeichers im vorigen Kapitel 3.3.3 wurden im September 2008 die im Folgenden beschriebenen Änderungen an der Reglerparametrierung vorgenommen. In Abb. 18 ist die daraus abgeleitete Regelcharakteristik für den Heiz- & Kühlbetrieb zusammen mit der Anpassung der saisonalen Umschaltung dargestellt.

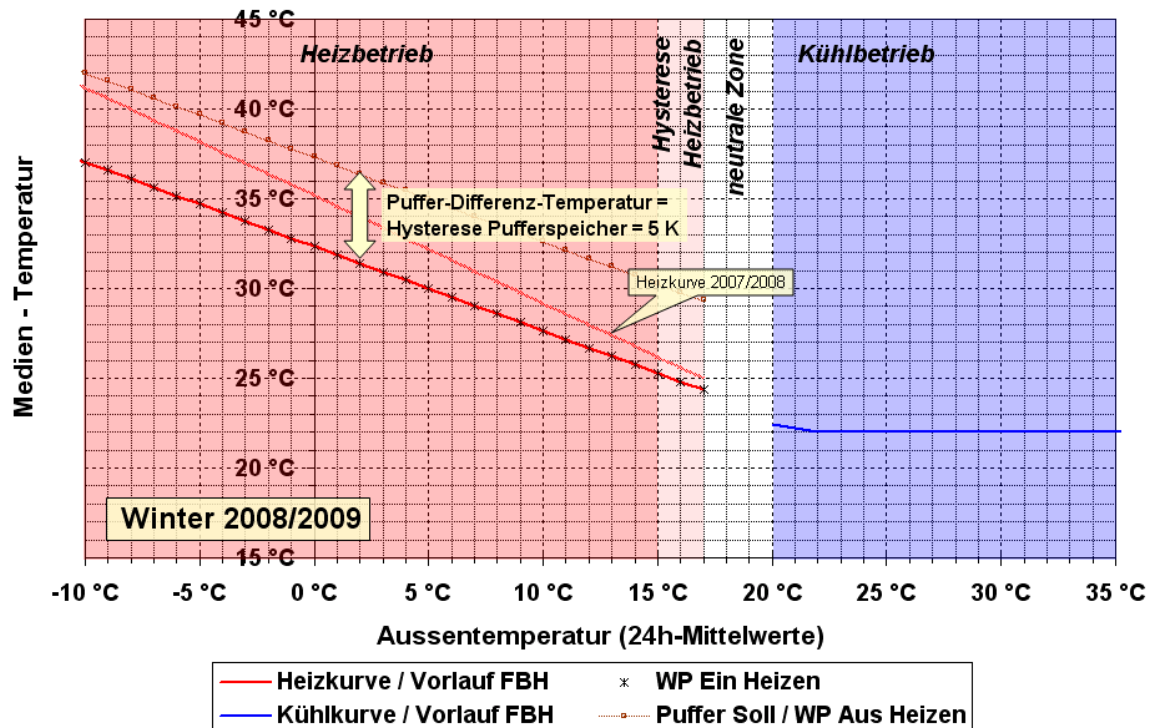


Abb. 18: Regelcharakteristik Heiz- / Kühlbetrieb und saisonale Umschaltung nach Optimierung im September 2008

Die Steigung der Heizkurve wird auf einen Wert von 0.47 K/K 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 rund 34 °C. In Abb. 18 ist die ursprüngliche Heizkurve zum Vergleich ebenfalls dargestellt. Mit der niedrigeren Heizkurve kann die Hysterese des Pufferspeichers auf 5 K erhöht werden. Dennoch bleibt damit die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe im Auslegungsfall um 2 K tiefer als mit den ursprünglichen Parameter-Einstellungen. Für die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb wird die Mittelwertbildung der Aussentemperatur von 6 Stunden auf 24 Stunden verlängert. Die Hysterese Heizbetrieb kann im Ausschaltpunkt auf 17 °C gesenkt werden, der Einschaltpunkt von 15 °C wird beibehalten. Die Freigabe des Kühlbetriebs kann auf 20 °C reduziert werden. In Tab. 7 sind die im Regler der Wärmepumpe im September 2008 geänderten Parameter aufgeführt.

Parameter	alter Wert	neuer Wert
Heizkurve Fusspunkt	22 °C	22 °C
Heizkurve Steilheit	0.6 K/K	0.47 K/K
Puffer-Differenz-Temperatur	3 K	5 K
Hysterese Pufferspeicher	2 K	5 K
Mittelwert Aussenlufttemperatur Intervall	6 h	24 h
Sommerbetrieb ein	> 20 °C	> 17 °C
Winterbetrieb ein	< 15 °C	< 15 °C
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 Nutzung des passiven Kühlbetriebs
- Vollständige Vermeidung von kurzzeitig wechselndem Heiz- und Kühlbetrieb und damit verbundene Energiemehrbedarf
- Steigerung der Wärmepumpeneffizienz durch geringeren Temperaturhub und längere Laufzeiten
- geringerer Heizwärmeeinsatz bei gleicher thermischer Behaglichkeit in der Heizperiode

3.4 MESSPERIODE 2008/2009

Während die Effizienz im Heizbetrieb durch die in Kapitel 3.3.4 beschriebenen Regleroptimierungen gesteigert werden konnte, zeigte die Kühlfunktion vorerst einen weiterhin geringen Einsatz. Die Messungen zeigen aber auch, dass in der ganzen Sommerperiode -mit Ausnahme der bewusst ungekühlten Wohnung 5- lediglich eine Überhitzungsstunde (Raumtemperatur über 26 °C) erfasst wurde. Die Bewohner wurden in einem Schreiben vom 10. Juni nochmals über die nötigen Einstellungen an den Raumthermostaten für den Kühlbetrieb informiert. Die Rückmeldungen einer Umfrage zum Kühlbetrieb vom 05. August 2009 ergaben, dass die Bewohner mit einer Ausnahme das Raumklima als zu warm empfanden. In vier Wohnungen wurden die Raumthermostaten auf Sommerbetrieb umgestellt, die Raum-Sollwerte teils auf das Minimum (10 °C) abgesenkt.

Am 05.08.2009 wurde daher die Begrenzung der Vorlauftemperaturen im Kühlfall (Kondensationsschutz) von den bisher eingestellten 22 °C auf 17 °C abgesenkt. Ebenso wurde der Nullpunkt der Kühlkurve auf 17 °C reduziert, wodurch die Vorlauftemperatur im Kühlfall konstant auf 17 °C geregelt wird. Die untenstehende Tabelle 8 fasst die vorgenommenen Änderungen zusammen, alle übrigen Einstellparameter wurden nicht weiter verändert.

Parameter	alter Wert (bis 04.08.2009)	neuer Wert (ab 05.08.2009)
Kühlkurve Fusspunkt	22 °C	17 °C
Kühlkurve Steilheit	0.1 K/K	0.1 K/K
Begrenzung Vorlauftemperatur (Kondensationsschutz)	22 °C (eingestellt 20 °C)	17 °C (eingestellt 15 °C)

Tab. 8: Parametereinstellungen der für den Sommerbetrieb optimierten Regelung

Ein in der Regelung zur Begrenzung der minimalen Vorlauftemperatur (Kondensationsschutz) vorhandener nicht veränderbarer Offset von 2 °C wurde ebenfalls korrigiert. Ohne diesen manuellen Eingriff wird die Vorlaufbegrenzung stets 2 °C oberhalb des eingestellten Wertes aktiv. Um die gewünschten 17 °C Vorlauftemperatur zu erreichen, muss am Regler daher 15 °C eingestellt werden. Ohne diese Korrektur würde das Kühlpotential nicht wie gewünscht genutzt.

3.4.1 Energie Winterbetrieb 2008/2009

Abbildung 19 zeigt links die erzeugte Wärme sowie rechts die zur Erzeugung und Verteilung dieser Wärme bezogene Elektrizität. Für Warmwasser wurden von der Wärmepumpe 7'258 kWh Wärme erzeugt. Die spezifische Warmwasserbereitstellung beträgt damit 3.80 kWh/Person/Tag, der gemessene Verbrauch beträgt 56 l/Person/Tag (Zapftemperatur rund 50 °C). Diese Menge liegt im Bereich eines typischen Bedarfs. Die erzeugte Wärme für Warmwasser beträgt in dieser zweiten Winterperiode 18 % der insgesamt erzeugten Wärme. Für Raumheizung wurden 32'850 kWh oder 82 % der Wärme erzeugt.

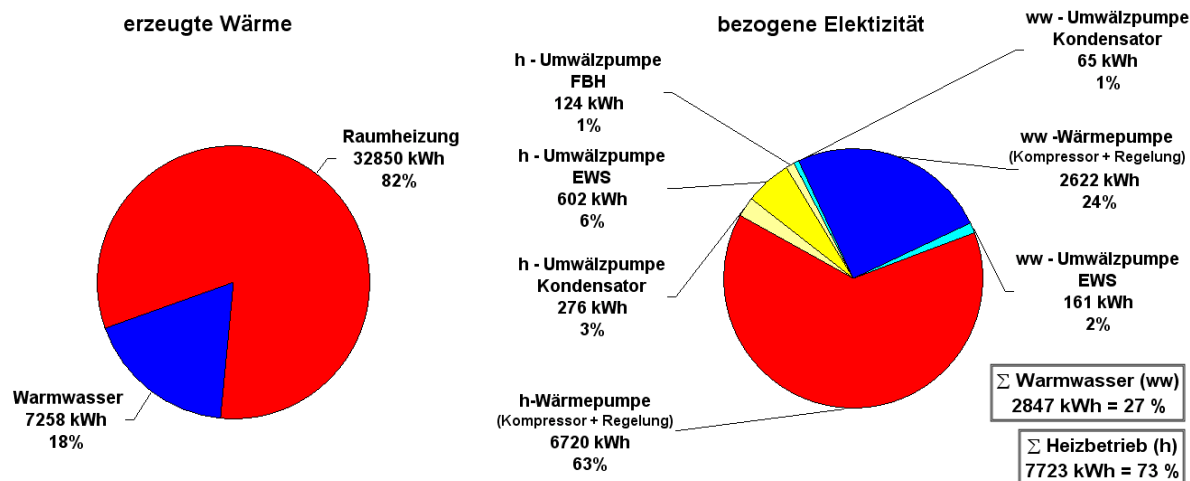


Abb. 19: Auswertung Winter (01.10.2008-31.03.2009)
Erzeugte Wärme (links) und bezogene Elektrizität (rechts)

Die nachfolgende Tabelle 9 fasst die Werte zur Wärmeproduktion beider Winterperioden vergleichend zusammen.

	HGT _{20/12}	Personen- belegung	Raumheizung erz. Wärme = Nutzwärme	Warmwasser erz. Wärme	Warmwasser Nutzwärme
Winter 08/09	2'648 (+225)	10.5 (+5)	32'850 kWh (+2'436 kWh)	7'258 kWh (+2'296 kWh)	4'713 kWh (+2'392 kWh)

Tab. 9: Erzeugte Wärme und Nutzwärme für Raumheizung und Warmwasser in der zweiten Winterperiode. Werte in Klammern geben die Änderung gegenüber dem Vorjahr an.

Die Wintersaison 2008/2009 war etwas kälter als die Vorangegangene (vgl. Kapitel 3.1). Die bereitgestellte Raumwärme liegt mit 111 MJ/m² (Vorjahr 103 MJ/m²) auch leicht höher als im vorgängigen Winter und deutlich höher als der gemäss SIA 380/1:2001 berechnete Heizwärmebedarf von 36 MJ/m².

Dank Verbesserungen in der Regelung, insbesondere durch Absenkung der Vorlauftemperaturen, konnte die Anlageneffizienz im Heizbetrieb gesteigert werden. Dies zeigt sich im Elektrizitätsbezug der Wärmepumpe, dieser ist mit 6'720 kWh gegenüber 6'821 kWh geringfügig kleiner als im Vorjahr, obwohl mehr Raumwärme produziert wurde. Für den Heizbetrieb der Wärmepumpe ergibt sich daraus eine Jahresarbeitszahl von nun 4.7 gegenüber 4.3.

Die zur Wärmebereitstellung bezogene Elektrizität verteilt sich zu 24 % resp. 2'622 kWh auf die Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb und zu 63 % bzw. 6'720 kWh auf den Heizbetrieb. 13 % des gesamten elektrischen Aufwands fielen zu Lasten der Umwälzpumpen an. Gegenüber der letzten Winterperiode stieg der Energieverbrauch für die Warmwasseraufbereitung von 1'939 kWh auf 2'847 kWh an, dies als Folge der nun vollständigen Belegung des Gebäudes. Im Gegenzug erhöhte sich mit dem gestiegenen Warmwasserverbrauch auch die Effizienz der Warmwasserbereitstellung, da nun deutlich weniger Speicher- und Verteilverluste anfielen (Saison 2007/2008 53 % der bereitgestellten Wärme, Saison 2008/2009 35 %).

3.4.2 Energie Sommerbetrieb 2009

Abbildung 20 zeigt links die von der Wärmepumpenanlage erzeugte respektive abgeführte Wärme während der kalendarischen Sommerperiode 2009 sowie rechts die dazu bezogene Elektrizität. Für Warmwasser wurden 5'552 kWh Wärme erzeugt. Daraus ergibt sich eine spezifische Warmwasserbereitstellung von 2.9 kWh/Person/Tag. Die gemessene Warmwasser-Zapfmenge betrug 46 l/Person/Tag (50 °C Zapftemperatur) – ein typischer Bedarf. Die erzeugte Wärme für Warmwasser beträgt 73 % der insgesamt erzeugten Wärme. Für Raumheizung wurden 2'075 kWh oder 27 % der Wärme erzeugt. Im Kühlbetrieb wurden insgesamt 3'637 kWh (Vorjahr 2'078 kWh), entsprechend 12 MJ/m² Wärme abgeführt. Am 05.08.2009 wurde die Regelung der Kühlfunktion angepasst, insbesondere wurde die Begrenzung der minimalen Vorlauftemperatur von 22 °C auf 17 °C abgesenkt, wodurch die Kühlleistung grob verdoppelt werden konnte. Als typische Kühlleistung wurden in dieser zweiten Hälfte des Sommers Werte zwischen 4 kW und 5 kW registriert. Mit den tieferen Vorlauftemperaturen registrieren nun auch die wohnungsweise installierten Wärmemengenzähler die abgeführte Wärme. Es zeigt sich, dass der Grossteil davon aus drei Wohnungen stammt. Aus deren Netto-Wohnfläche ergibt sich eine flächenspezifische Leistungsübertragung über den Fussboden im Kühlbetrieb von rund 10 W/m². Während in der Zeit vor dieser Regleranpassung (01.04.2009 - 04.08.2009) 1'232 kWh Wärme abgeführt wurden, betrug dieser Wert für den Rest der Sommerperiode (05.08.2009 - 30.09.2009) 2'405 kWh.

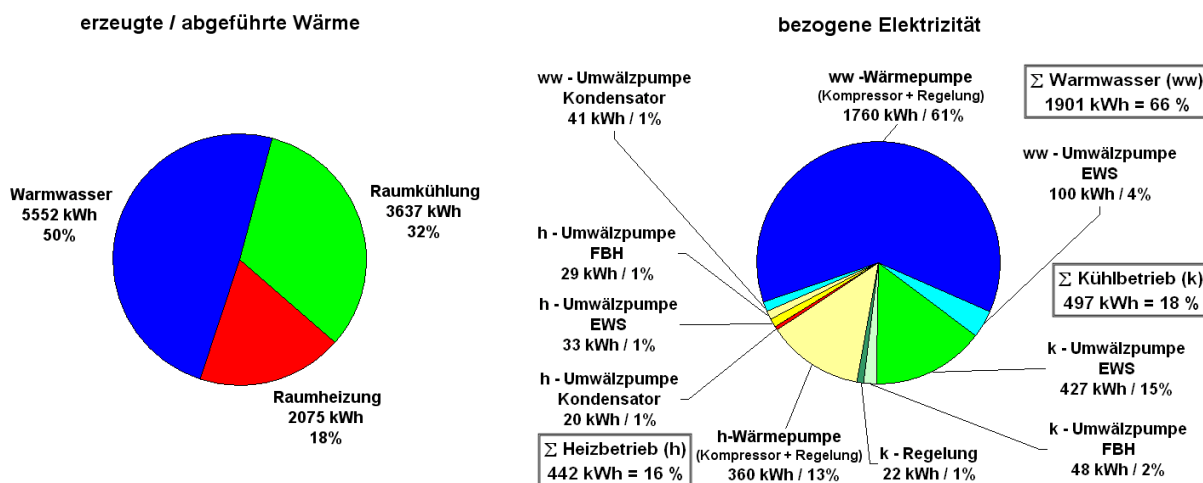


Abb. 20: Auswertung Sommer (01.04.2009-30.09.2009)

Erzeugte / abgeführte Wärme (links) und bezogene Elektrizität (rechts)

Die bezogene Elektrizität verteilt sich zu 13 % bzw. 360 kWh auf die Wärmepumpe im Heizbetrieb, zu 61 % bzw. 1'760 kWh auf die Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb und zu 1 % bzw. 22 kWh auf den Kühlbetrieb (Regelung). Der Elektrizitätsbezug für die Pumpen im Kühlbetrieb ist gegenüber der Vorjahresperiode von 248 kWh auf 475 kWh gestiegen, allerdings bei einer annähernden Verdoppelung der abgeführten Wärmemenge.

	KGT _{20/20}	Personenbelegung	Raumkälte abgef. Wärme = Nutzkälte	Warmwasser erz. Wärme	Warmwasser Nutzwärme
Sommer 09	105 (-8)	10.5 (+5)	3'637 kWh (+1'559 kWh)	5'552 kWh (+910 kWh)	3'218 kWh (+999 kWh)

Tab. 10: Erzeugte Wärme und Nutzwärme für Raumheizung und Warmwasser in der zweiten Sommerperioden. Werte in Klammern geben die Änderung gegenüber dem Vorjahr an.

An 71 Tagen wurde im Kühlbetrieb Wärme aus dem Gebäude abgeführt, an den 14 Tagen mit parallelem Heiz- und Kühlbetrieb wurden insgesamt lediglich noch 2 kWh Wärme zu- und kurz darauf wieder abgeführt.

3.4.3 Kennzahlen Energieeffizienz

Abbildung 21 zeigt Wochenmittelwerte des Wärmeerzeugernutzungsgrades für Warmwasser- und passiven Kühlbetrieb für beide Sommerperioden im Vergleich. Im Warmwasserbetrieb des Jahres 2009 liegen sie zwischen 2.7 und 3.1, über die ganze Sommersaison betrachtet bei 2.9, also höher als in der Winterperiode - eine Folge der höheren Sondentemperaturen. Im Kühlbetrieb ist der Wärmeerzeugernutzungsgrad als Verhältnis zwischen abgeführter Wärme und dazu benötigtem elektrischem Aufwand für die Regelung und die Umwälzpumpe der Erdwärmesonde definiert. Im Sommer 2009 liegt er zwischen 1.4 und 15.2. Die grosse Spannweite ist unter anderem eine Folge der zwischenzeitlichen Reglerumstellung vom 5. August 2009. Sämtliche Werte des Wärmeerzeugernutzungsgrades für die passive Kühlung welche über 13.0 liegen, stammen aus Daten nach dieser Umstellung, da dann erheblich mehr Wärme abgeführt werden konnte. Der gemittelte Wärmeerzeugernutzungsgrad für die Raumkühlung konnte mit dieser Reglerumstellung von 4.3 (Periode 01.04.2009 - 04.08.2009) auf 14.6 (Periode 05.04.2009 - 30.09.2009) gesteigert werden, über die komplette Sommersaison gerechnet wird ein Wert von 8.1 erreicht.

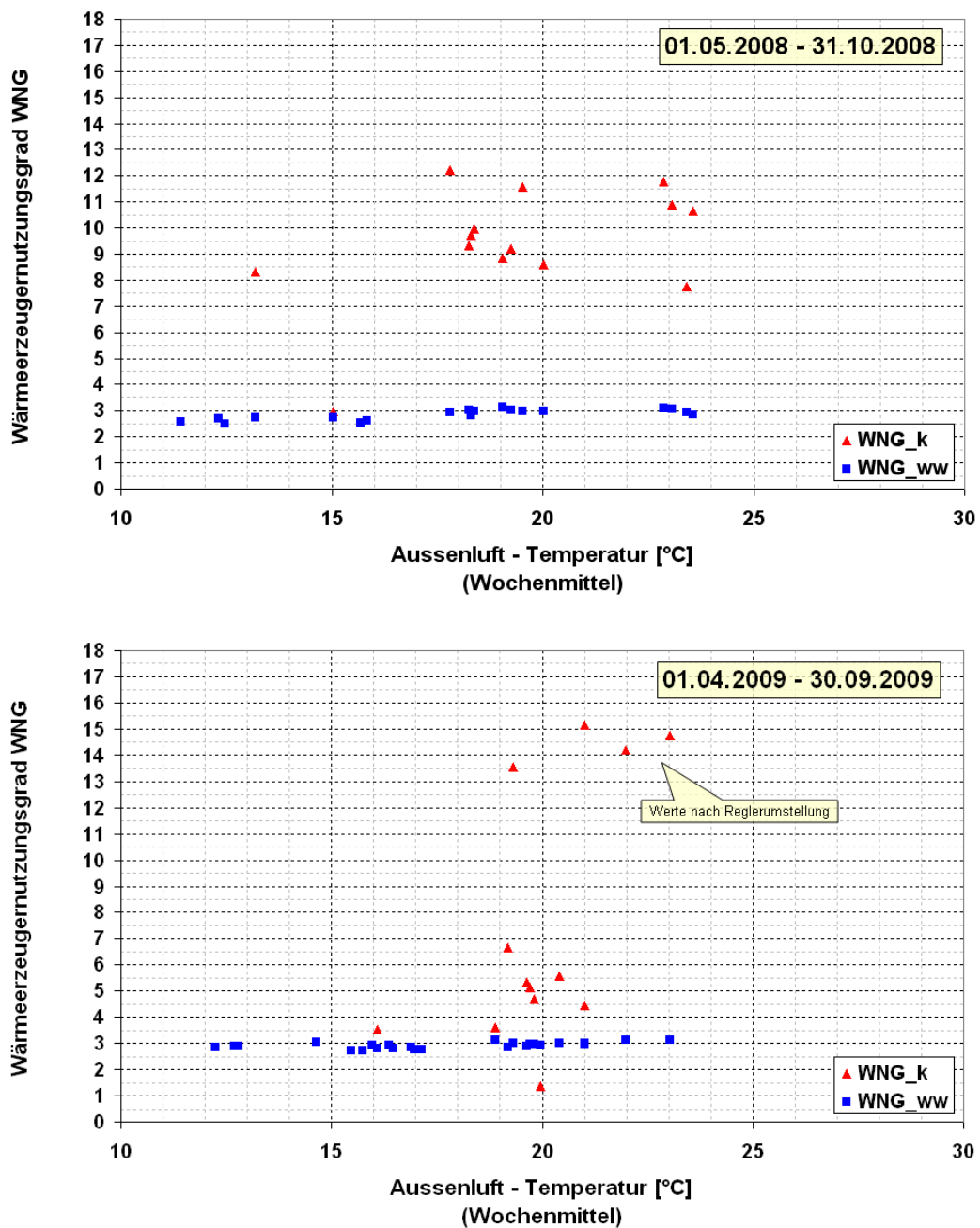


Abb. 21: Effizienzkennzahlen im Vergleich der beiden Sommerperioden 2008 (oben) und 2009 (unten)
Wärmeerzeugernutzungsgrad (WNG) der Wärmepumpe im Warmwasser- und passiven Kühlbetrieb
(Wochenmittelwerte)

Eine vergleichende Übersicht über die Wärmeerzeugernutzungsgrade beider Betriebsjahre ist in untenstehender Tabelle (Tab. 11) zusammengefasst. Erkennbar ist insbesondere die gesteigerte Effizienz des Heizbetriebs aufgrund der vorgenommenen Optimierungen der Reglercharakteristik für den Heizbetrieb (vgl. Kapitel 3.3.4). Die Effizienzwerte des Heizbetriebs im Sommer werden nebst der höheren Quelltemperatur auch merklich dadurch begünstigt, dass auch in Zeiten ohne Heizbetrieb regelmässig Restwärme vom Kondensator nach dem Warmwasserbetrieb in den Heizungspuffer geleitet wird, ohne entsprechenden Aufwand des Verdichters.

	Raumheizung	Raumkühlung	Warmwasser	gesamt
Winter 08/09	4.3 (+0.3)	-	2.5 (-0.1)	3.8 (+0.1)
Sommer 09	5.0 (+0.4)	8.1 (-0.7)	2.9 (+0.0)	4.1 (+0.1)
Jahr	4.4 (+0.3)	8.1 (-0.7)	2.7 (+0.0)	3.9 (+0.1)

Tab. 11: Wärmeerzeugernutzungsgrad für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser während des zweiten Betriebsjahres (01.10.2008 – 30.09.2009). In Klammern sind die Veränderungen gegenüber dem Vorjahr angegeben.

In Tabelle 12 sind die Systemnutzungsgrade beider Betriebsjahre aufgeführt. Auch im Systemnutzungsgrad schlägt sich die Regelungsoptimierung des Heizbetriebes mit im Vergleich zur Vorjahresperiode gesteigerter Effizienz messtechnisch nieder. Ersichtlich ist auch der erhöhte Systemnutzungsgrad im Warmwasserbetrieb als Folge des höheren Warmwasserbedarfs, welcher mit geringeren Speicherverlusten einhergeht.

	Raumheizung	Raumkühlung	Warmwasser	gesamt
Winter 08/09	4.3 (+0.4)	-	1.7 (+0.5)	3.6 (+0.2)
Sommer 09	4.7 (+0.3)	7.3 (-0.7)	1.7 (+0.3)	3.1 (+0.0)
Jahr	4.3 (+0.3)	7.3 (-0.7)	1.7 (+0.4)	3.5 (+0.2)

Tab. 12: Systemnutzungsgrad für Raumheizung, -kühlung und Warmwasser während des zweiten Betriebsjahres, ohne Lüftungsanlage (01.10.2008 – 30.09.2009). In Klammern sind die Veränderungen gegenüber dem Vorjahr angegeben.

3.4.4 Raumkonditionen Winter 2008/2009

Die Häufigkeitsverteilung der Raumluft-Temperaturen in der Winterperiode, dargestellt in Abbildung 22 links, zeigt, dass die Raumtemperaturen auch im zweiten Winter höher liegen als die in der Norm-Rechnung angesetzten 20 °C. Die Raumtemperatur in Wohnung 1 weist einen Mittelwert über die Heizperiode von 21.2 °C und eine Standardabweichung von 1.5 °C auf. In Wohnung 3 wurde eine Mitteltemperatur von 22.3 °C registriert (Standardabweichung 0.4 °C), in Wohnung 5 eine Mitteltemperatur von 22.8 °C mit einer Standardabweichung von 0.8 °C. Insgesamt bewegen sich die Raumtemperaturen damit in einem zum Vorjahr vergleichbaren Rahmen.

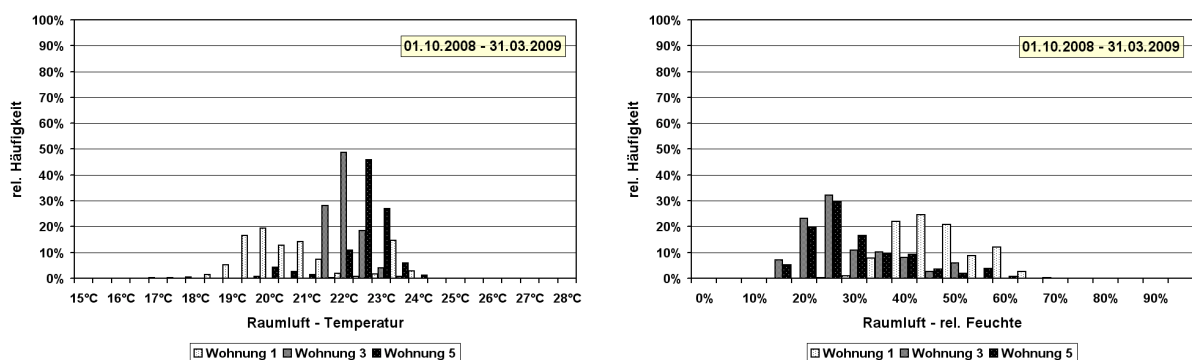


Abb. 22: Auswertung Winter 2008/2009 für die Wohnungen 1, 3 & 5
Häufigkeitsverteilung der Raumlufttemperatur (links) und rel. Raumluftfeuchte (rechts). In Wohnung 1 befand sich in der zweiten Winterhälfte ein Luftbefeuchtungsgerät in unmittelbarer Nachbarschaft zum Datenlogger.

Die relative Feuchte der Raumluft, dargestellt in Abbildung 22 rechts, liegt für Wohnung 1 zwischen 26 %_{r.F.} und 74 %_{r.F.}, bei einem Mittelwert von 50 %_{r.F.}. In Wohnung 3 beträgt die gemessene Raum-

luftfeuchte im Mittel 31 % $r_{F,F}$, bei einer Spannweite von 15 % $r_{F,F}$ bis 56 % $r_{F,F}$. In Wohnung 5 beträgt die mittlere Feuchte 32 % $r_{F,F}$ und reicht von 18 % $r_{F,F}$ bis 63 % $r_{F,F}$.

Gemäss Rückmeldung der Bewohner von Wohnung 1 wurde die Luftfeuchte im Gegensatz zum Vorjahr als extrem trocken empfunden. Daher wurde ein Luftbefeuchter in Betrieb genommen. Der Datenlogger befand sich in unmittelbarer Nähe desselben, was die Aussagekraft der Feuchtemessungen in Wohnung 1 einschränkt.

3.4.5 Raumkonditionen Sommer 2009

Die Häufigkeitsverteilung der Raumtemperaturen in der Sommerperiode wird in Abb. 23 für die Zeit vor (links) und nach (rechts) der Reglerumstellung vom 05.08.2009 dargestellt. In der ganzen Zeit blieb Wohnung 5 auf bewussten Wunsch der Benutzer ungekühlt, die Raumtemperaturen wurden auch ohne Kühlung als angenehm empfunden. Wohnungen 1 und 3 wurden hingegen gekühlt.

Vor der Umstellung weist die mittlere Raumtemperatur in Wohnung 1 einen Wert von 23 °C bei einer Standardabweichung von 0.9 °C auf. Im gleichen Zeitraum liegt die mittlere Raumtemperatur in Wohnung 3 bei 24.0 °C (Standardabweichung 0.7 °C) und in Wohnung 5 bei 24.8 °C (Standardabweichung 1.1 °C).

Die mittleren Raumtemperaturen nach der Umstellung betragen in Wohnung 1 und Wohnung 3 je 23.1 °C (Standardabweichung 0.4 °C resp. 0.6 °C) und 25.0 °C (Standardabweichung 1.3 °C) in Wohnung 5.

Der Vergleich der Raumtemperaturen vor und nach der Reglerumstellung zeigt einen sanften aber deutlich messbaren Kühleffekt in denjenigen Wohnungen, welche den Kühlbetrieb nutzten (Wohnung 1 und Wohnung 3, vgl. auch Abb. 24).

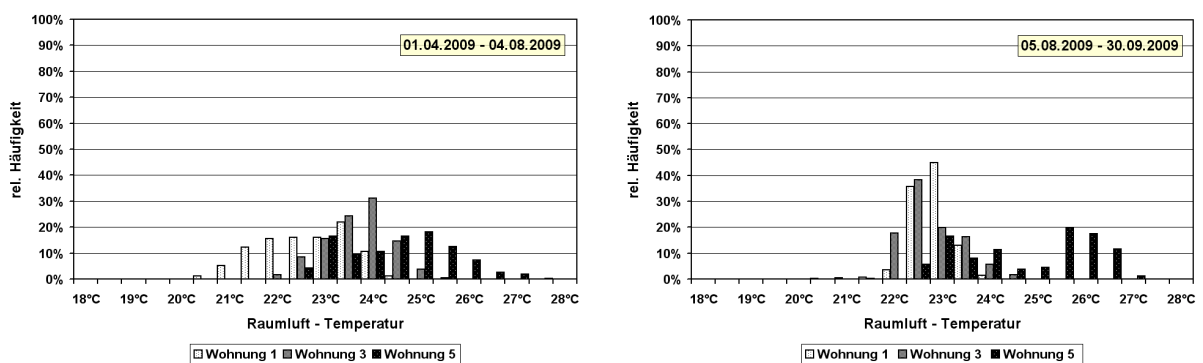


Abb. 23: Auswirkung der Regleranpassung im Sommer 2009 auf die Wohnungen 1, 3 & 5
Häufigkeitsverteilung der Raumlufttemperaturen vor (links) und nach der Anpassung (rechts).
Die Bewohner der Wohnung 3 verzichteten bewusst auf die Kühlungsfunktion

Der Verlauf der Raumtemperaturen während der ganzen Sommerperiode 2009, dargestellt zusammen mit der erzeugten Heizwärme resp. abgeführten Kühlenergie zeigt Abb. 24. Gut zu erkennen ist, dass nach der Reglerumstellung anfangs August viel mehr Wärme abgeführt werden konnte als zuvor. Während einer längeren Kühlperiode im August zeigt sich der Einfluss der Kühlung auf die Raumtemperaturen: Während diese in der bewusst ungekühlten Wohnung 5 langsam ansteigen, sinken sie in Wohnung 1 und Wohnung 3 ab. Die Bewohnerschaft dieser Wohnungen nutzte die Kühlungsfunktion.

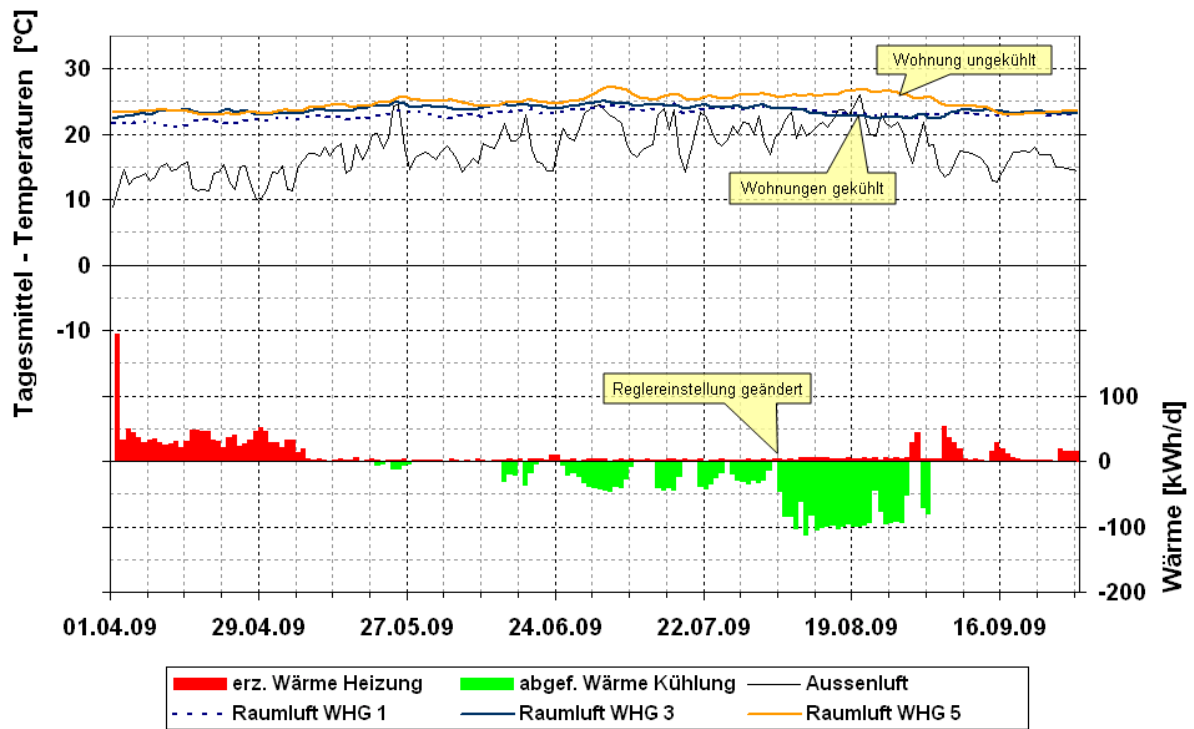


Abb. 24: Auswertung Sommer 2009 für die Wohnungen

Zu- resp. abgeführte Wärme im Zusammenhang zum Temperaturverlauf in einer ungekühlten und gekühlten Wohnung.

Die relative Feuchte der Raumluft variiert für Wohnung 1 zwischen 32 %_{r.F.} und 76 %_{r.F.} bei einem Mittelwert von 60 %_{r.F.} und für Wohnung 3 zwischen 23 %_{r.F.} und 76 %_{r.F.} bei einem Mittelwert von 50 %_{r.F.}. In Wohnung 5 wurden Werte zwischen 24 %_{r.F.} und 67 %_{r.F.} gemessen, der Mittelwert liegt bei 49 %_{r.F.}. Basierend auf diesen Messwerten ist das Raumklima als insgesamt Behaglich zu beurteilen.

3.4.6 Nutzerzufriedenheit

Am 10. Juni 2009 wurden die Bewohner in einem Schreiben daran erinnert, ihre Raumthermostaten auf Kühlbetrieb umzustellen. Eine Umfrage anfangs August ergab, dass in Wohnung 5 bewusst auf Kühlung verzichtet wurde, in allen anderen 4 Wohnungen wurden die Thermostaten auf Kühlung umgeschaltet. Auf eine Verschattung während heisser Tage achteten die Bewohner gemäss dieser Umfrage teilweise, aber nicht konsequent. Von den Bewohnern welche die Kühlfunktion nutzten wurden die sommerlichen Raumtemperaturen unisono als "zu warm" bewertet, die Kühlfunktion wurde nicht bewusst wahrgenommen. Die Bewohner waren korrekt über die technischen Grenzen der passiven Kühlung informiert.

Die Kühlfunktion wurde erst nach der Absenkung Kühlkurve im Sommer 2009 wahrgenommen. Nach unabhängigen Aussagen der Bewohner wurden die Raumtemperaturen danach als "sehr angenehm" bewertet.

3.5 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 im passiven Kühlbetrieb festgelegt wird. Die Abbildungen 25 und 26 zeigen für die erste Winter- und Sommerperiode 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 an deren Ein- und Austritt im Betrieb. Weiterhin ist exemplarisch die gemessene Raumluft-Temperatur in Wohnung 3 dargestellt. Vom 30.05.2008 bis 11.06.2008 fehlen die dynamischen Temperaturverläufe der Erdwärmesonde aufgrund eines Ausfalls der Temperaturerfassung. Vom 28.02.2008 bis 31.03.2008, vom 12.05. bis 30.05.2008 und vom 16.10. bis 10.11.2008 fehlen die dynamischen Verläufe der Energiegrößen aufgrund eines Ausfalls der M-Bus Erfassung. Die saisonalen Daten sind dadurch jedoch nicht betroffen.

Die Austrittstemperatur der Erdwärmesonde in der ersten Winterperiode (Abb. 25) zeigt einen erkennbaren Zusammenhang mit der entzogenen Wärme über mehrere Tage. Im Winter 2007/2008 bewegt sie sich im Wesentlichen innerhalb eines Bereichs von 1 °C bis 7 °C bei einem Mittelwert von 3.8 °C. Im darauffolgenden zweiten Betriebsjahr 2008/2009 wurden mehrheitlich Werte zwischen 0 °C und 7 °C bei einem deutlich tieferen Mittelwert von 2.2 °C gemessen.

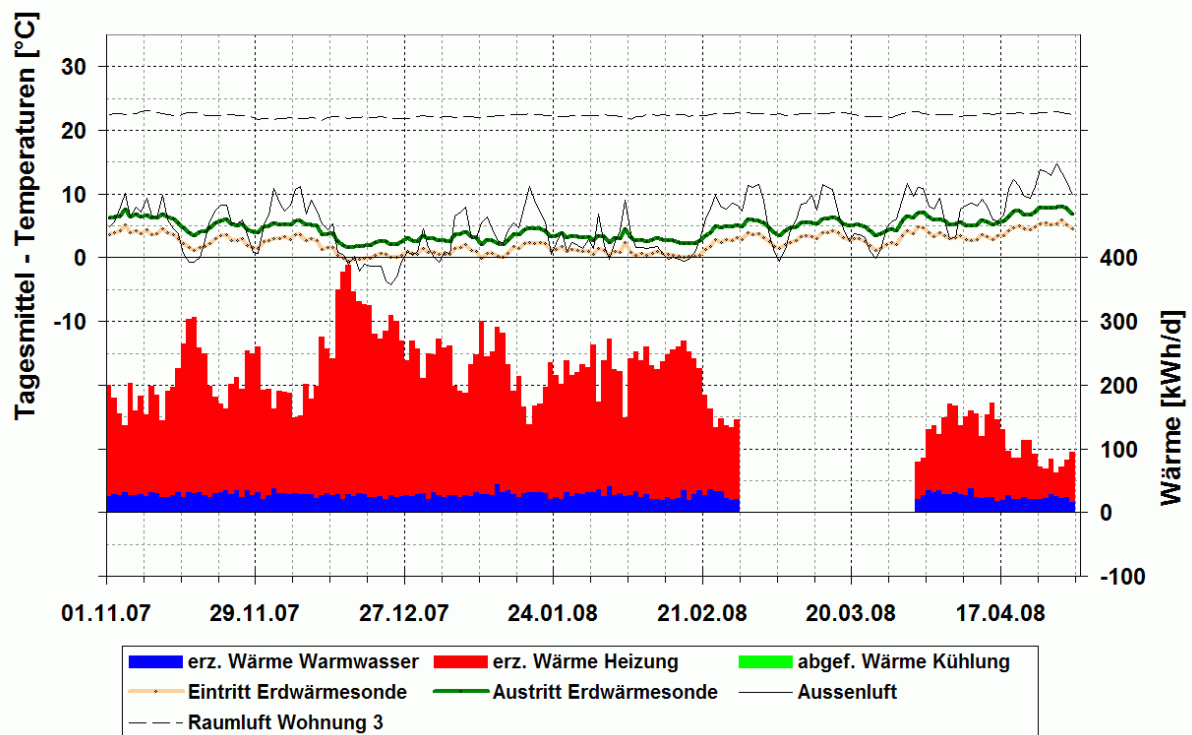


Abb. 25: Saisonaler Verlauf der Erdwärmesonden-Temperaturen in der ersten Winterperiode (01.11.2007 - 30.04.2008)

Der Temperaturverlauf am Eintritt und Austritt der Erdwärmesonde ist für die Sommerperiode 2008 in Abb. 26 dargestellt. Bei einem Mittelwert von 12,7 °C bewegen sich die Austritts-Temperaturen grösstenteils zwischen 7 °C und 16 °C. Die Abbildung zeigt einerseits die Umkehrung zwischen Wärmeentzug und -einspeisung anhand der Umkehrung der Temperaturdifferenz zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur an der Erdwärmesonde, andererseits auch den Anstieg der Austrittstemperatur der Erdwärmesonden mit der abgeführten Wärme im Kühlbetrieb.

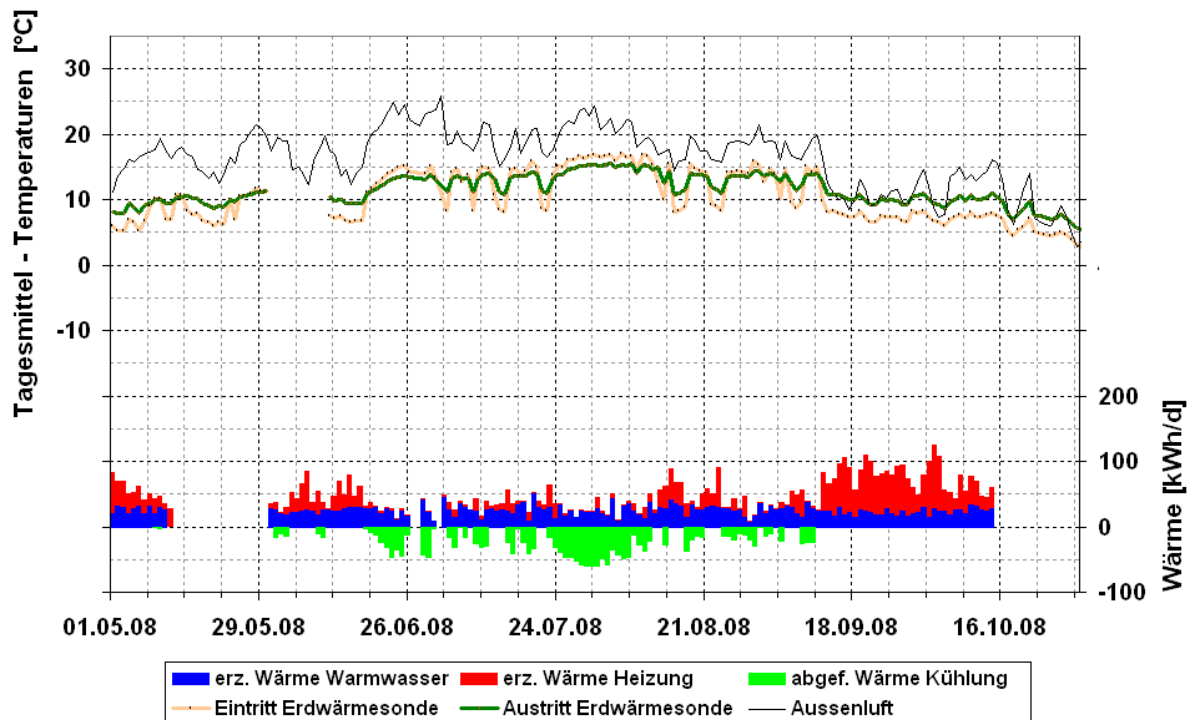


Abb. 26: Saisonaler Verlauf der Erdwärmesonden-Temperaturen in der ersten Sommerperiode (01.05.2008 - 31.10.2008)

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

Die entsprechende Situation während der Sommerperiode 2009 ist in Abb. 27 dargestellt. In der Abbildung gekennzeichnet sind die Zeitpunkte des Versands vom Informationsbrief zur Umstellung der Raumthermostaten auf Kühlbetrieb zu Händen der Bewohner im Juni sowie der vorgenommenen Reglerumstellung anfangs August 2009. Anhand der tageweise abgeführten Wärme im Kühlfall lässt sich der Effekt der Umstellung deutlich erkennen, durch die abgesenkte Vorlauftemperatur werden nun täglich rund 100 kWh Wärme abgeführt, was grob dem doppelten des vorherigen Wertes entspricht.

Die zwischen Mai und Juli regelmässig zu erkennende produzierte Heizwärme stammt von der Abkühlphase der Wärmepumpe nach der Warmwasserproduktion (Nachlauf der Kondensatorpumpe auf den Heizwasserspeicher), sie entspringt nicht einem tatsächlichen Heizwärmebedarf.

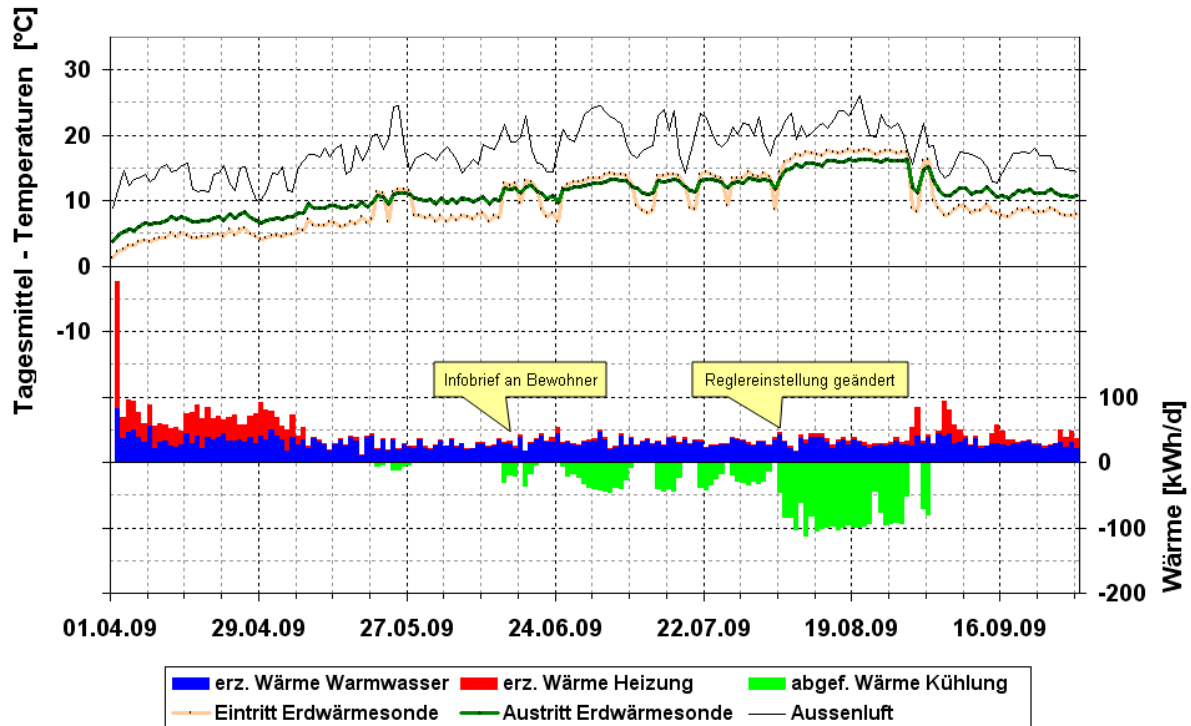


Abb. 27: Saisonaler Verlauf der Erdwärmesonden-Temperaturen in der zweiten Sommerperiode (01.04.2009 - 30.09.2009)

Bei einem –im Vergleich zur Vorjahresperiode leicht höheren– Mittelwert von 13.2 °C bewegen sich die Sondenaustrittstemperaturen im Sommer 2009 grösstenteils zwischen 9 °C und 17 °C. Zu erkennen ist deren Ansteigen während der Kühlphasen, insbesondere nach der Umstellung in der Regelcharakteristik: Die im August in die Sonde eingebrachte, wesentlich höhere Energie lässt die Sondenaustrittstemperaturen während der Kühlphasen um weitere 3 °C ansteigen. Bedingt durch den Wärmeeintrag in das Erdreich erreichen die Tagesmittelwerte der Austrittstemperaturen nun Werte bis 16.4 °C bei 15 min-Spitzenwerten von 17.0 °C. Infolge dessen kann die Vorlauftemperatur im Fussbodenkreis nicht mehr nach der eingestellten Kühlkurve gefahren werden, sondern erreicht im Dauerbetrieb lediglich noch minimal 18 °C anstatt der eingestellten 17 °C. Die minimale Vorlauftemperatur wird nun durch die Erdsonde begrenzt.

3.6 KONDENSATIONSRISIKO

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 Fussbodenkreises liegt im aktiven Betrieb zwischen der Vorlauftemperatur des Fussbodenkreises und der Raumtemperatur. Die Messungen wurden für beide Sommerperioden separat ausgewertet.

In Abb. 28 sind für die Sommerperiode 2008 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 Kondensationsgrenze. Die Oberflächentemperatur des Fussbodens muss in der Abbildung zwischen den schwarzen und den grauen Punkten liegen. Da nun sogar die Vorlauftemperatur des Fussbodenkreises immer deutlich oberhalb der Taupunktgrenze liegt kann für diese Periode auf ein vernachlässigbares Kondensationsrisiko auf der Fussbodenoberfläche geschlossen werden.

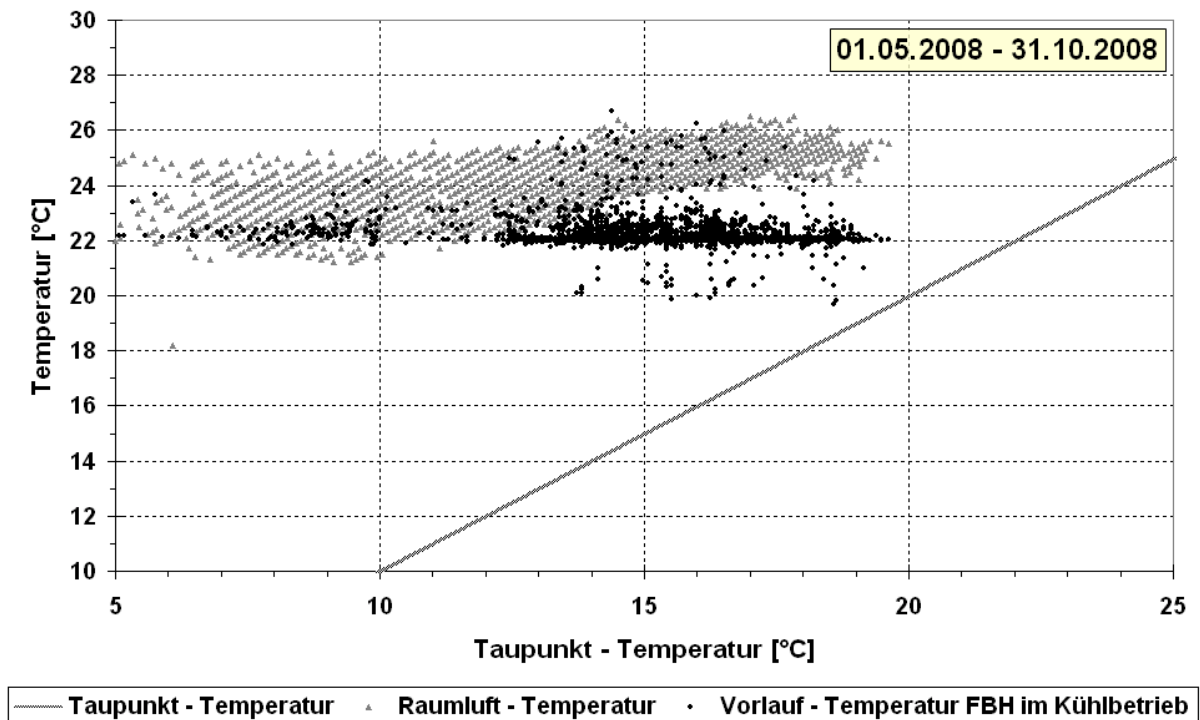


Abb. 28: 15 Min. Mittelwerte von Raumluft-Temperatur Wohnung 3 und Vorlauftemperatur des Fussbodenheizkreises zur Abschätzung des Kondensationsrisiko im Kühlbetrieb, Sommersaison 2008

Auch nach der im Verlauf des Sommers 2009 vorgenommenen Absenkung der Vorlauftemperatur besteht kein akutes Kondensationsrisiko auf der Fussbodenoberfläche. Abbildung 29 zeigt die geänderte Situation. Erkennbar sind die –im Vergleich zum Vorjahr– tieferen Raumtemperaturen in der exemplarisch betrachteten Wohnung 3 sowie die abgesenkten Vorlauftemperaturen des Fussbodenkreises im Kühlbetrieb. Diese erreichen an wenigen Stunden Werte, welche 1 – 2 °C unterhalb der Taupunkt-Temperatur liegen. Allerdings werden diese Werte nicht anhaltend erreicht, sie stammen weitgehend aus der ersten halben Stunde nach Beginn einer Kühlbetriebsphase bei noch "kalter" Erdwärmesonde. Da weiterhin die Lufttemperaturen in der gesamten Sommerperiode über 22 °C liegen und die Fussbodenoberfläche zwischen Fussboden-Vorlauftemperatur und Lufttemperatur liegen muss, kann auf eine noch vernachlässigbare Kondensationsgefahr geschlossen werden. An frei liegenden Armaturen und Zuleitungen zum Fussbodenkreis könnte bei diesen Bedingungen jedoch Kondensat entstehen. Auch aufgrund der in Kapitel 2.4.2 gemachten Behaglichkeitsbetrachtungen für die Fussboden-Oberflächentemperaturen sollte auf eine weitere Absenkung der Vorlauftemperatur im Kühlbetrieb verzichtet werden.

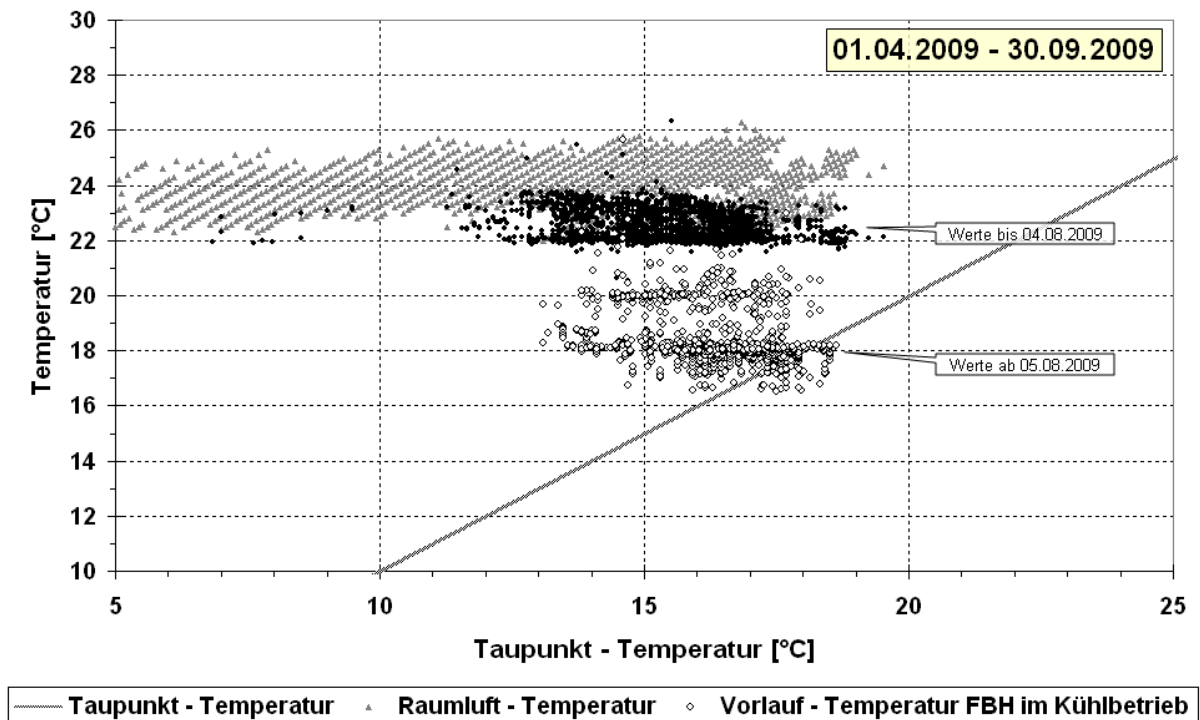


Abb. 29: 15 Min. Mittelwerte Raumluft-Temperatur Wohnung 3 und Vorlauftemperatur des Fussbodenheizkreises zur Abschätzung des Kondensationsrisiko im Kühlbetrieb, Sommersaison 2009

3.7 DYNAMISCHES VERHALTEN IM WINTERBETRIEB

Das aufgrund der in Kapitel 3.3.4 beschriebenen realisierten Anpassungen im Regelverhalten erreichte Ergebnis zeigt die nachfolgende Abbildung 30, welche zum Vergleich zwei Kältephasen der beiden Winterperioden gegenüberstellt. Die Abbildung zeigt den Temperaturverlauf des Wärmepumpenvorlaufs im Warmwasser- (WW) respektive Raumheizungsbetrieb (RH) sowie den aktuellen Betriebsmodus der Wärmepumpe. Dank der auf 5 K erhöhten Hysterese des Heizungspufferspeichers arbeitet die Wärmepumpe bei der dargestellten Kaltperiode im Winter 2008/2009 kontinuierlich im Heizbetrieb (Abb. 30 unten), unterbrochen einzig durch Boilerladungen. Das im Winter 2007/2008 beobachtete häufige Takten (Abb. 30 oben) tritt nicht mehr auf. Über die ganze Winterperiode konnte die mittlere Laufzeit pro Wärmepumpenstart im Heizbetrieb von 21 min auf 27 min verlängert werden.

Weiterhin ist aus der Abbildung erkennbar, dass die Wärmepumpe dank einer Hochtemperaturschaltung im Warmwasserbetrieb recht hohe Vorlauftemperaturen von über 60 °C erreicht. Aufgrund des im zweiten Winter vollständig belegten Gebäudes mit entsprechend höherem Warmwasserbezug wurde auch vermehrt Warmwasserbetrieb registriert.

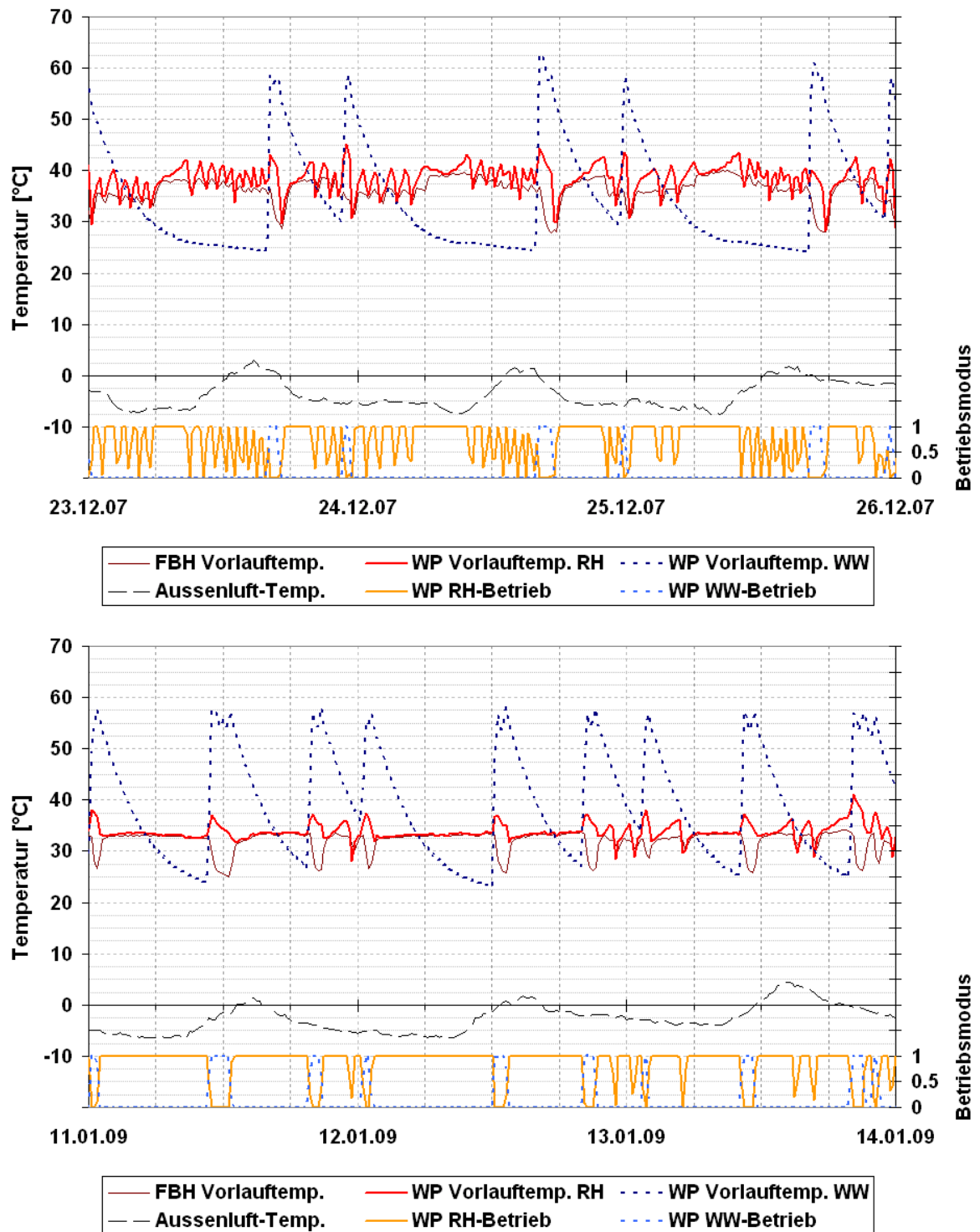


Abb. 30: Betriebsdynamik im Heiz- und Warmwasserbetrieb: Vergleich zweier Kaltperioden in der ersten (oben) resp. zweiten (unten) Winterperiode. Die Wärmepumpe taktet mit den Optimierungen im zweiten Winter erkennbar weniger.

3.8 DYNAMISCHES VERHALTEN IM SOMMERBETRIEB

In der Sommerperiode ist vor allem das dynamische Verhalten der passiven Kühlung mit Erdwärmesonde und Fussbodenkreis von Interesse. In Abbildung 31 sind die Temperaturen an der Erdwärmesonde und im Fussbodenkreis zusammen mit der momentanen Kühlleistung dargestellt. Ebenso sind Phasen mit Warmwasserbetrieb gekennzeichnet. Die Abbildung zeigt das Verhalten nach einem nächtlichen Unterbruch im Kühlbetrieb während einer mehrtägigen Warmperiode anfangs August 2009.

Die Temperaturdifferenz (Spreizung) über der Erdwärmesonde im reinen Kühlbetrieb liegt im Bereich 1-2 K. Im Warmwasser-Betrieb kehrt sich diese Temperaturdifferenz jeweils um. Die Austrittstemperaturen aus der Erdwärmesonde senken sich durch den Wärmeentzug während der Warmwasserproduktion um rund 3 K gegenüber dem Kühlbetrieb ab.

Die anfängliche Spitzenkühlleistung im Kühlbetrieb von 13 kW pendelt sich auf einen Wert von 5 kW ein. Aus der Rücklauftemperatur des Fussbodenkreises ist das resultierende Abkühlverhalten des Fussbodens gut ersichtlich. Ebenso zeigt die Abbildung, dass die eingestellten 17 °C Vorlauftemperaturen im Dauer-Kühlbetrieb nicht eingehalten werden können, dazu sind die Sonden-Austrittstemperaturen mit rund 16,5 °C aufgrund des steten Wärmeeintrags zu hoch. Hierin zeigt sich die Begrenzung der Leistungsfähigkeit der passiven Kühlung, welche massgeblich durch die Erdwärmesonde vorgegeben ist.

Erkennbar sind auch die Unterbrüche im Kühlbetrieb während der Warmwasserbereitstellung. Obwohl mit der realisierten hydraulischen Schaltung ein Parallelbetrieb von passiver Kühlung und Warmwasserbereitstellung grundsätzlich möglich und ohne Nachteil wäre, unterbricht die Wärmepumpe den Kühlvorgang während der Boilerladung. Dieses Verhalten ist fest im Regler eingestellt und kann nicht durch manuellen Benutzereingriff verändert werden.

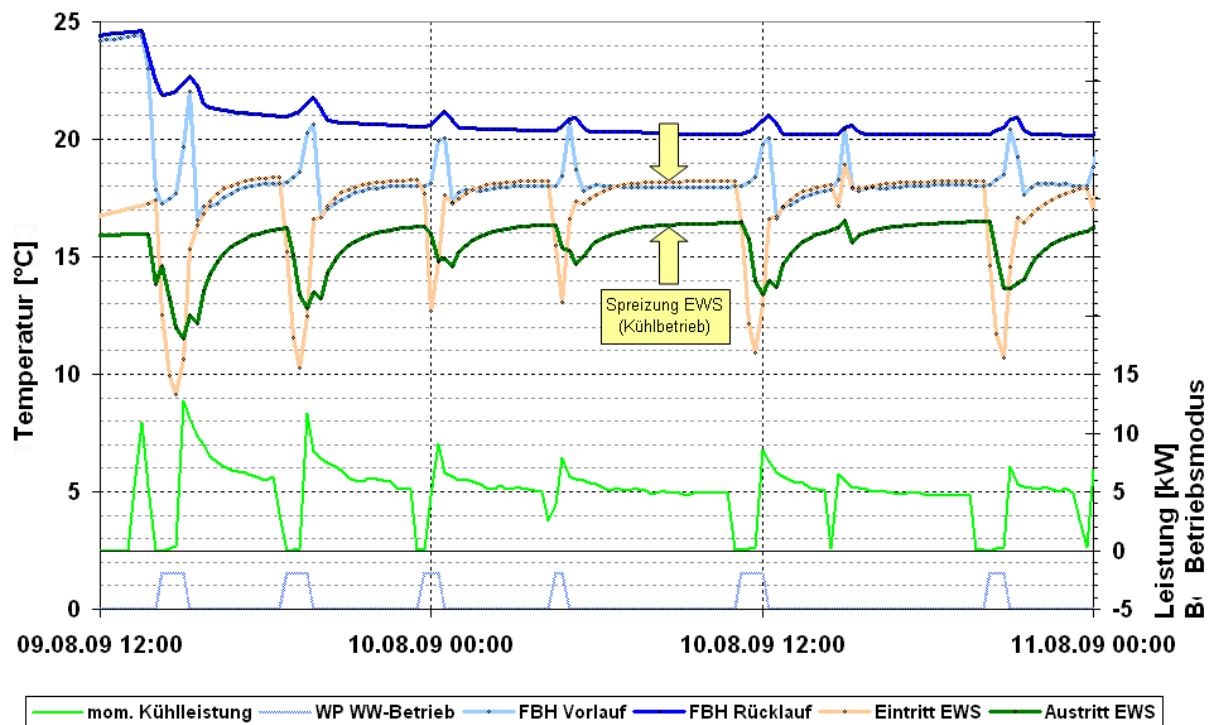


Abb. 31: Tagesgang der Temperaturen in der Erdwärmesonde & Fussbodenkreis bei Kühlbetrieb. Während der Boilerladung ist der Kühlvorgang unterbrochen.

Das dynamische Verhalten im Vergleich beider Sommerperioden zeigt Abb. 32. Während im ersten Betriebsjahr 2008 (Abb. 32 oben) der Kühlbetrieb meist nachmittags bis nachts mit einer 6 stündigen Verzögerung gegenüber der äusseren Warmphase stattfand, wurde aufgrund der längeren Mittelung (24 h gegenüber 6 h) im Sommer 2009 der Kühlbetrieb durchgehend aufrecht erhalten, unterbrochen jeweils durch Boilerladungen (Abb. 32 unten). So wurde an den 73 Kühltagen im Sommer 2008 gesamthaft 748 Betriebsstunden Kühlung registriert, im Sommer 2009 hingegen an 71 Kühltagen zusammen 1439 Stunden.

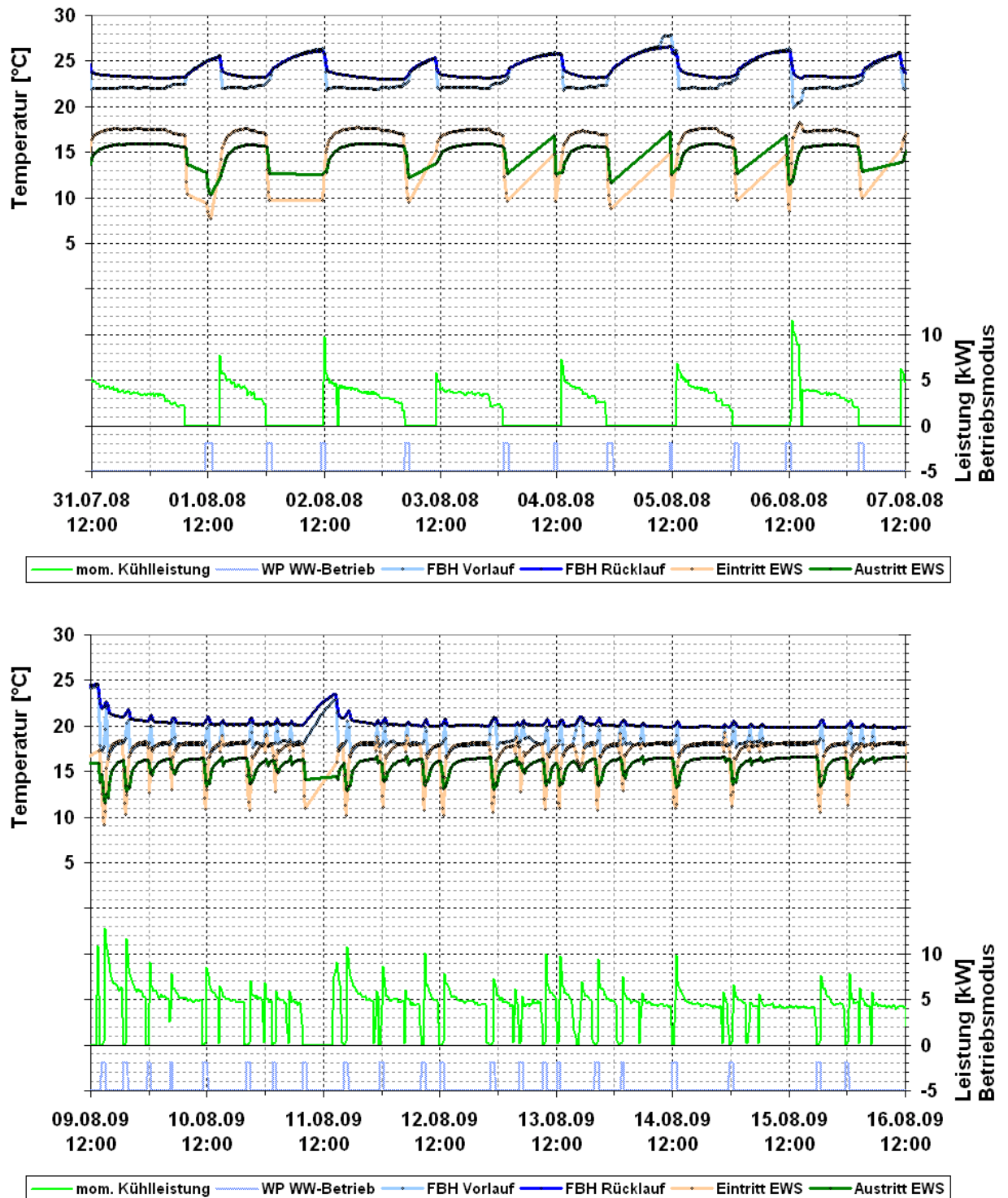


Abb. 32: Dynamisches Verhalten der Systemtemperaturen während einer einwöchigen Warmperiode. Vergleich Sommer 2008 (oben) – Sommer 2009 (unten)

In den häufigeren Boilerladungen im Sommer 2009 äussert sich die höhere Belegungsichte des Gebäudes. Im Vergleich erkennbar sind auch die tiefer eingestellten Vorlauftemperaturen im Kühlbetrieb, welche von ursprünglichen 22 °C auf 17 °C abgesenkt wurden, im Dauerbetrieb aber nicht gehalten werden können.

3.9 SENSITIVITÄTSANALYSE DER HEIZWÄRMEBEDARFSBERECHNUNG NACH SIA 380/1

Aufgrund der deutlichen Abweichung der gemessenen erzeugten Heizwärme von dem planerischen Wert gemäss Rechenverfahren SIA 380/1:2001 [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 aus der –hinsichtlich Bauvollendung und Personenbelegung– kritischeren Wintersaison 2007/2008 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 33 bis 39 zeigen die Sensitivität des Heizwärmebedarfes Q_h auf diese Parameter. Speziell gekennzeichnet sind jeweils die Werte gemäss MINERGIE-P® Nachweis und –sofern davon abweichend– die aus den Messungen des ersten Betriebsjahres 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 an Heizwärme von $5 \text{ MJ}/\text{m}^2$. Allerdings handelt es sich hierbei insgesamt auch nur um eine Abschätzung für einen Parameter, der den Heizwärmebedarf massgeblich beeinflusst. Der tatsächliche Luftwechsel über Fensteröffnungen und Baubetrieb nicht bekannt ist.

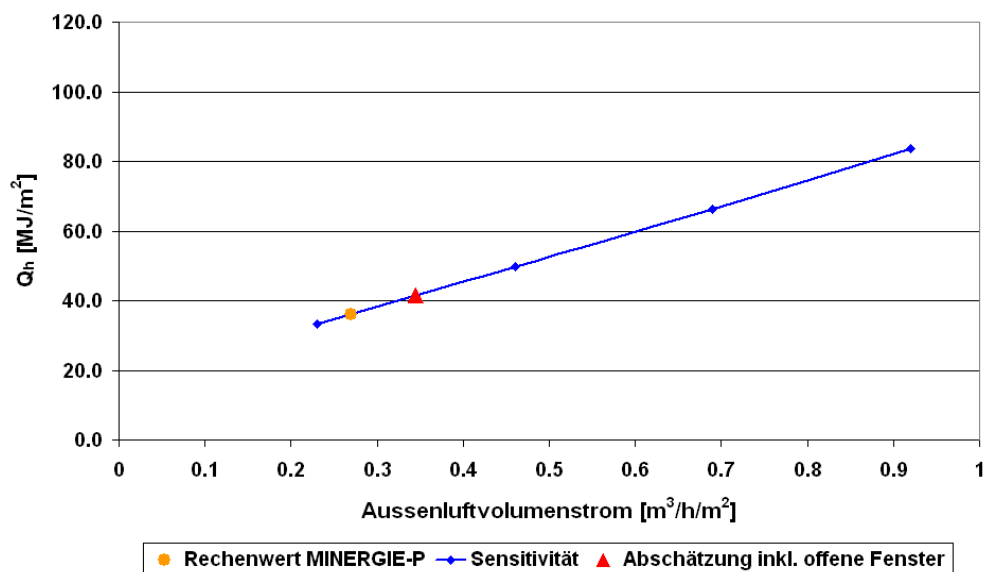


Abb. 33: Sensitivität des Luftwechsels in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Die aus Messdaten bestimmte mittlere Temperatur im Gebäudeinnern beträgt 22 °C. Die Sensitivität des Wärmebedarfs auf die Raumtemperatur liegt bei rund 15% Verbrauchszunahme pro °C Temperaturänderung. Durch die erhöhten Raumtemperaturen entsteht ein Mehrverbrauch von 11 MJ/m².

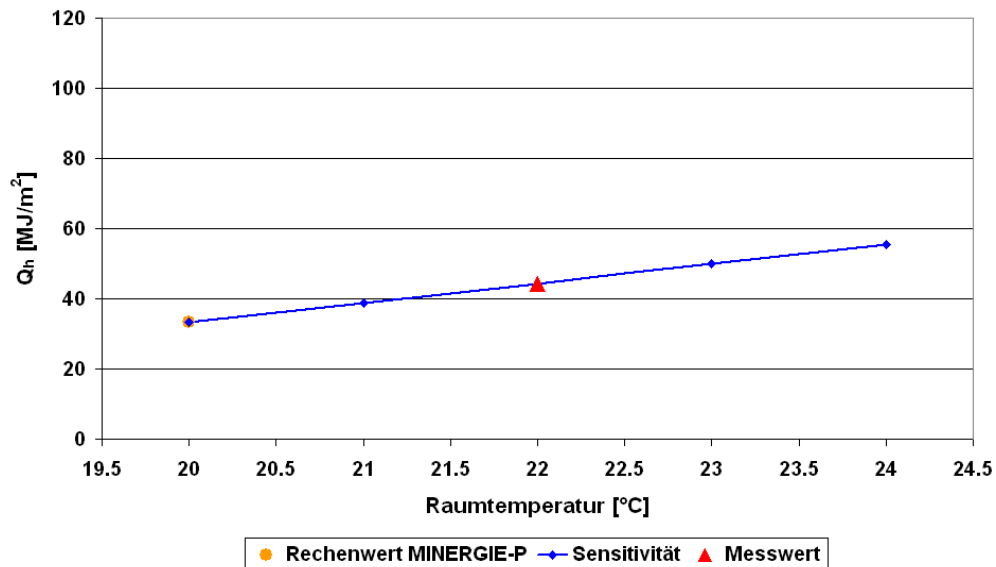


Abb. 34: Sensitivität der Raumtemperatur in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Die Qualität der Heizungsregelung lässt sich durch die Messungen nur insofern bestimmen, als dass alle gemessenen 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. 35.

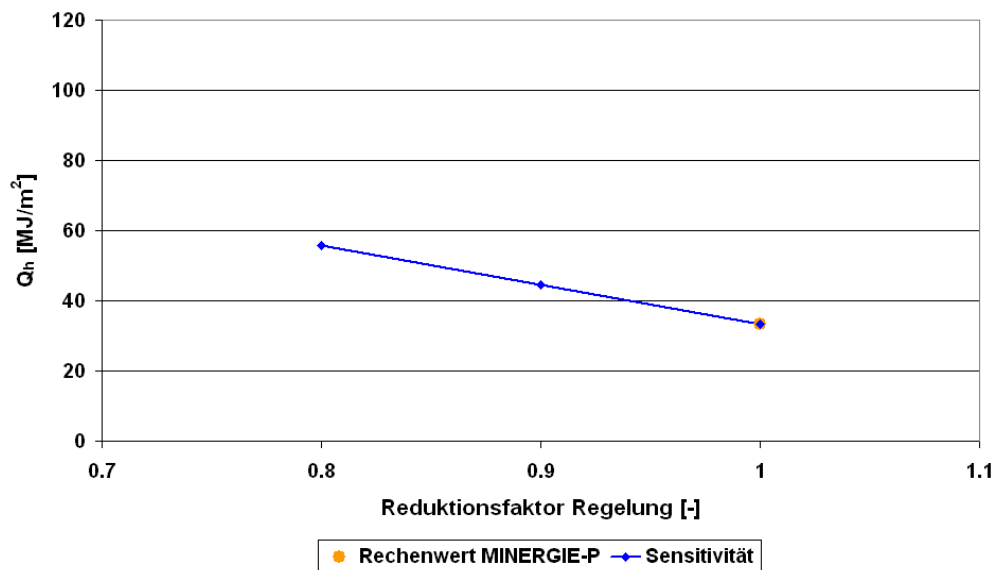


Abb. 35: Sensitivität des Reduktionsfaktors Regelung in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Verglichen mit der Standardnutzung gemäss MINERGIE-P® fällt der Flächenbedarf pro Bewohner mit $193 \text{ m}^2/\text{Pers.}$, insbesondere verursacht durch zwei leerstehende Wohnungen, massiv höher aus. Damit lässt sich ein Mehrverbrauch von 8 MJ/m^2 erklären.

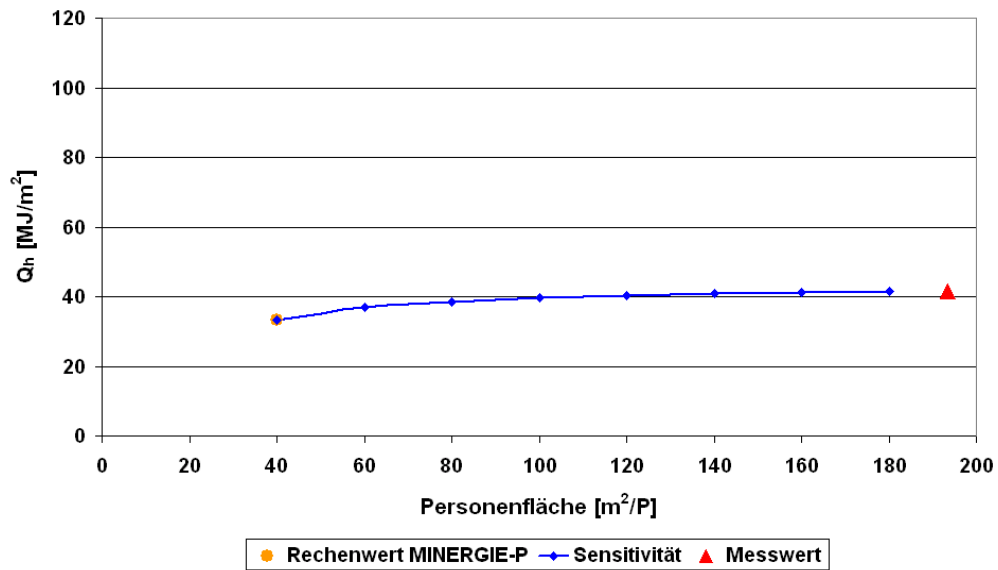


Abb. 36: Sensitivität der Personenfläche in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Der tatsächliche Elektrizitätsverbrauch für jede Wohnung sowie allgemeinzugängliche 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 im ersten Winter fällt der Bezug an elektrischer Energie gegenüber normaler Nutzung möglicherweise höher aus. Verglichen mit dem MINERGIE-P® Standardwert von 60 MJ/m^2 liegt er mit 44 MJ/m^2 trotzdem nennenswert tiefer.

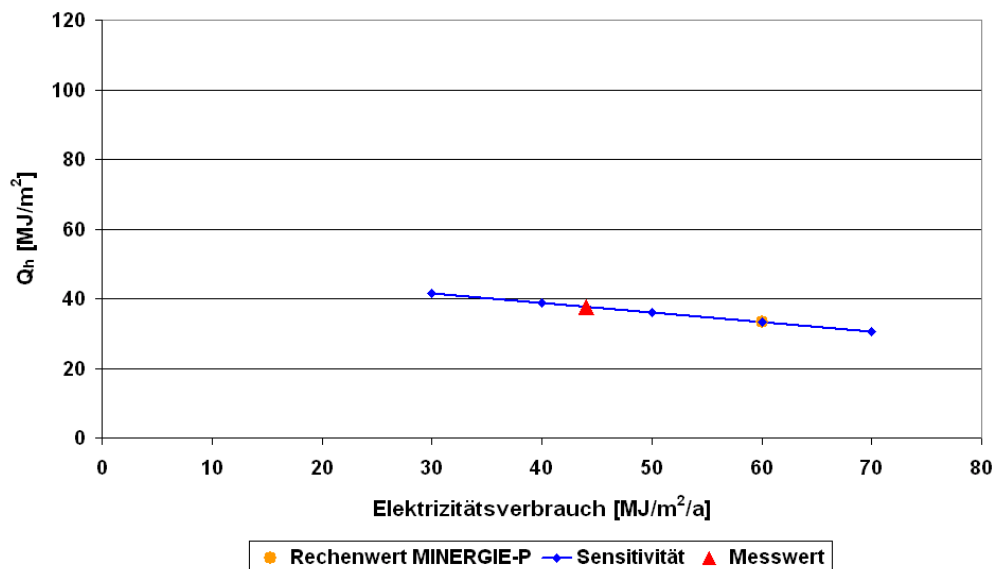


Abb. 37: Sensitivität des Elektrizitätsverbrauchs in der Berechnung des Heizwärmebedarf

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.

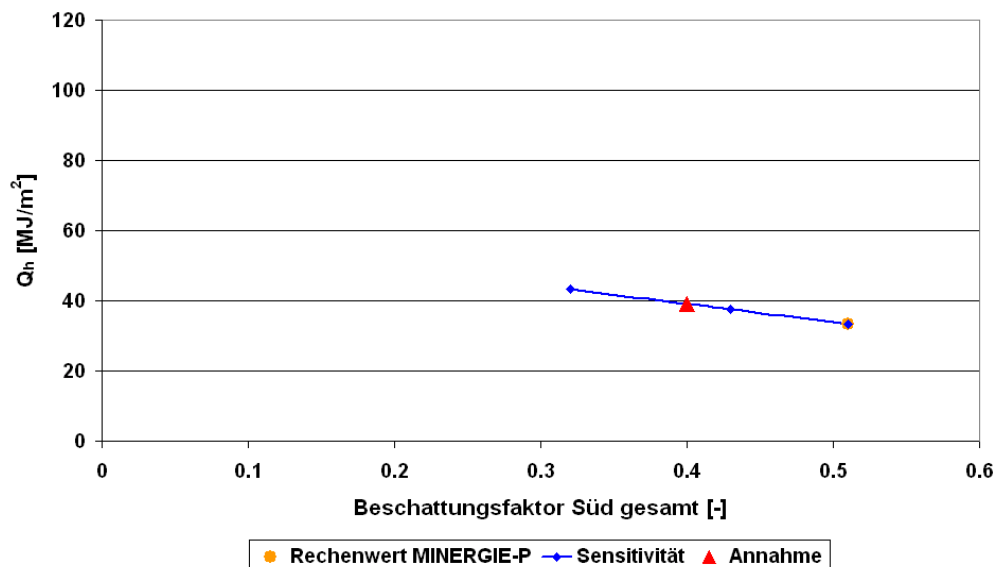


Abb. 38: Sensitivität des Beschattungsfaktors Süd in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes liesse sich nur mit grösserem Aufwand theoretisch berechnen. Wie Abb. 39 jedoch zeigt, beeinflusst diese Grösse den Heizwärmebedarf in der Rechnung im vorliegenden Fall massiver Bauweise kaum.

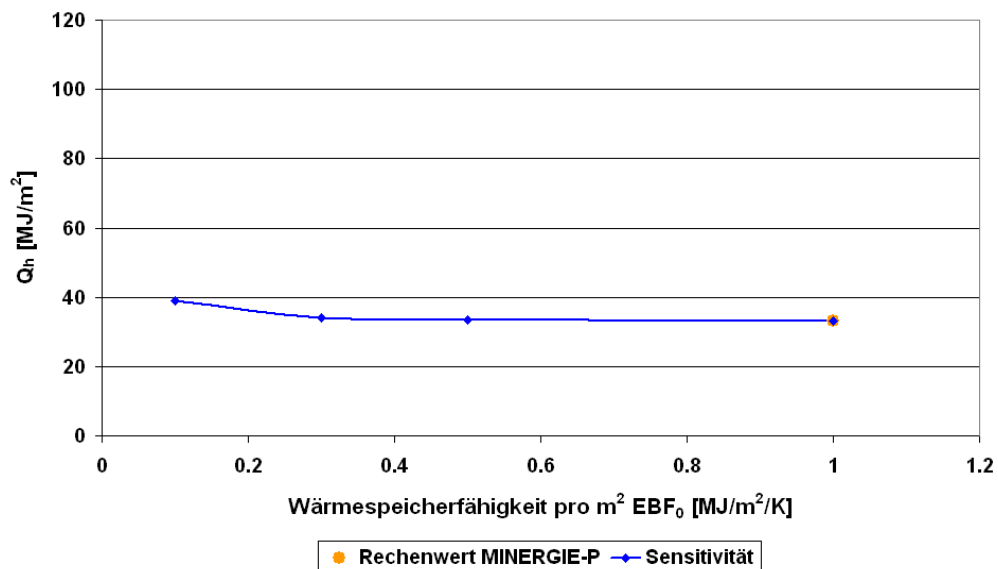


Abb. 39: Sensitivität der Wärmespeicherfähigkeit in der Berechnung des Heizwärmebedarf

Die untenstehende Tabelle 13 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 [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]	0.27	0.35	+5 MJ/m ²
Raumtemperatur [°C]	20	22	+11 MJ/m ²
Regelung [-]	1	1	-
Personenbelegung [m^2/P]	40	193	+9 MJ/m ²
Elektrizitätsverbrauch [MJ/m^2]	60	44	+4 MJ/m ²
Beschattung [-]	0.51	0.40	+6 MJ/m ²
Wärmespeicherfähigkeit [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{K}$]	1	1	-
Q_h [MJ/m^2]	36	71	+35 MJ/m ²

Tab. 13: Vergleich der Bedarfsberechnung der Heizwärme nach SIA 380/1 gerechnet mit MINERGIE-P Standardwerten respektive real gemessenen Werten der Heizsaison 2007/2008

Mit den an die Messwerte des ersten Jahres 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, so bleibt noch immer ein Unterschied von rund 32 MJ/m².

Im zweiten Betriebsjahr erreichen sowohl die Personenfläche (101 m²/P) als auch der Elektrizitätsverbrauch (73 MJ/m²) bezüglich Heizwärmebedarf günstigere Werte. Mit der zusätzlichen Annahme eines im zweiten Jahr geringeren Luftwechsels von 0.3 m³/h/m² liesse sich gegenüber dem Nachweiswert noch ein Mehrbedarf von 15 MJ/m² erklären.

Für den erhöhten Heizwärmebedarf kommen weiter folgende, bekannte Begebenheiten in Frage:

- Wasserschaden im Bereich Dach/Ostfassade
- Unverschlossener Fluchtweg, bei dem die in den Plänen vorgesehen Isolation fehlt
- Geringe nachträgliche Änderungen am Bau

Weiterhin auffällig ist eine recht grosse Spannweite des wohnungsweisen Heizwärmebezuges. Zu erwähnen bleibt auch, dass der Heizwärmebedarf von Bauten welche dem MINERGIE-P® Standard entsprechend sehr gut wärmegedämmt sind, sehr empfindlich auf Änderungen in der Wärmedämmung reagiert.

Fazit

Der Vergleich zwischen MINERGIE-P® Standardwerten und den gemessenen Werten als Eingangsgrößen für die Bedarfsberechnung zeigt, dass eine Teil des erhöhten Heizwärmebedarfs Q_h durch die höhere Raumtemperatur und einen erhöhten Luftwechsel erklärt werden kann. Gerade die Abschätzung des Luftwechsels, welcher einen grossen Einfluss auf den Heizwärmebedarf hat, gelingt aber nur grob.

3.10 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 Kühlsystems 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 Heizwär-

mebedarf 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 und damit für Medientemperaturen bis ca. 15 °C geeignet sein.
- Bei Wohnungsweiser Abrechnung müssen die Wärmemengenzähler 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...5 K gearbeitet, die durch die Wärmemengenzähler 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. Die Mehrkosten sind gering.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

4.1 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Messungen im Gebäude CosyPlace konnten von Herbst 2007 bis Herbst 2009 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 19 °C bis 24 °C. Die Raumluft-Feuchte während der Heizperiode war mit 21 %_{r.F.} bis 62 %_{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 21 °C bis 26 °C. Die Raumluftfeuchte lag grösstenteils in einem behaglichen Bereich zwischen 37 %_{r.F.} bis 65 %_{r.F.}.

Die Wärmepumpe erreichte eine gute Effizienz im Heizbetrieb mit einem Wärmeerzeugernutzungsgrad von 4.3 (Winterperiode) und eine ebenso gute Effizienz im Warmwasser-Betrieb mit einem Wärmeerzeugernutzungsgrad von 2.7 (Jahresdurchschnitt) bei einer Warmwassertemperatur von 50 °C. Im passiven Kühlbetrieb mit der Erdwärmesonde wurde dank Optimierungen ein Wärmeerzeugernutzungsgrad von maximal 15.2 (Wochenmittel) erreicht. Die abgeführte Kühlwärme konnte von 2'078 kWh im ersten Betriebsjahr auf 3'637 kWh im Sommer 2009 gesteigert werden. In beiden Heizperioden zeigte sich ein unerwartet hoher Heizwärmebezug des Gebäudes mit 103 MJ/m² respektive 111 MJ/m² gegenüber einem Rechenwert für den Nachweis MINERGIE-P® von 36 MJ/m², der aber immer noch deutlich unter den gesetzlichen Mindestanforderungen von 161 MJ/m² liegt. In einer Sensitivitätsanalyse der Nachweisrechnung gemäss SIA 380/1:2001 konnte, mit aus den Messwerten abgeleiteten Randbedingungen, ein rechnerischer Heizwärmebedarf von 71 MJ/m² in der ersten respektive 51 MJ/m² in der zweiten Winterperiode nachvollzogen werden.

Die Austrittstemperatur der Erdwärmesonde lag in der Winterperiode im Bereich 0 °C bis 7 °C bei einem Mittelwert von 3.8 °C im ersten und 2.2 °C im zweiten Winter. Zum Anfang Juni hin stieg die Austrittstemperatur ohne Kühlbetrieb in beiden Messjahren auf etwa 10 °C. Mit aktivem Kühlbetrieb stieg die Austrittstemperatur der Erdwärmesonde im ersten Betriebsjahr weiter auf rund 15 °C, mit dem erhöhten Wärmeeintrag im zweiten Sommer auf 16 °C. Diese Temperaturen wurden jeweils über eine längere Kühlperiode gehalten. An sommerlichen Tagen ohne Kühlbetrieb, nur mit Warmwasserbetrieb, sank die Austrittstemperatur relativ rasch auf Werte im Bereich 11 °C bis 12 °C ab.

Die bei Inbetriebnahme stark an sicherer Wärmebereitstellung im Winter orientierte Reglereinstellung konnte basierend auf den Messdaten des ersten Betriebsjahres dahingehend optimiert werden, dass sowohl eine effiziente Heizwärmebereitstellung im Winter gesichert ist, als auch der Kühlung mehr Leistungsfähigkeit zugestanden wird. Insbesondere wurde die Mittelungsdauer der Aussentemperatur für die Heizungssteuerung von 6 h auf 24 h verlängert, was besser zu dem trägen Verhalten des Gebäudes passt. Weiter wurde die Anlageneffizienz im Heizbetrieb durch eine Absenkung der Vorlauftemperatur von 40 °C auf 36 °C gesteigert. Eine Absenkung der Vorlauftemperaturen im Kühlfall von 22 °C auf 17 °C steigerte schliesslich auch den Nutzen und die Effizienz des passiven Kühlbetriebs, im Dauerbetrieb erreichte die Kühlleistung für die 3 gekühlten Wohnungen rund 5 kW.

4.2 VERDANKUNG

An dieser Stelle sei allen, die zum Gelingen des Projektes beigetragen haben, herzlich gedankt. Im Speziellen Herrn A. Eckmanns und Herrn Dr. Ch. Filleux vom Bundesamt für Energie, Herrn T. Fisch und Herrn Dr. D. Keller vom Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt sowie Herrn F. Fregnan vom P+D Programm Pilotregion Basel, den beteiligten Unternehmen sowie den Hausbewohnern.

4.3 AUSBLICK

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
COP	Leistungszahl	-
E	Energiemenge	kWh
φ	relative Luftfeuchte	% _{r.F.}
G	Globalstrahlung	kWh/m ²
HGT	Heizgradtage	°C·Tage
JAZ	Jahresarbeitszahl	-
KGT	Kühlgradtage	°C·Tage
Q	Wärmemenge	kWh
SNG	Systemnutzungsgrad	-
T, θ	Temperatur	°C
V	Volumen	l
WNG	Wärmeerzeugernutzungsgrad	-
Z	Zustand	-

5.2 INDICES

Index	Beschreibung
AUL	Aussenluft
Aus	Austritt
Ein	Eintritt
EWS	Erdwärmesonde
FBH	Fussbodenheizung
H	Horizontal
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	Wohnungen
WP	Wärmepumpe
WVÜ	Wärmeverteilung & -übergabe
ww, WW	Warmwasser
WHG1	Wohnung 1
WHG2	Wohnung 2
WHG3	Wohnung 3
WHG4	Wohnung 4

WHG5	Wohnung 5
ZH	Zusatzheizung

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] SN EN 13757-1:2003; **Kommunikationssysteme für Zähler und deren Fernablesung**; 08-2003; Schweizerische Normen Vereinigung - SNV; Winterthur
- [6] SN EN 14511:2008, **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>

7 ANHANG

7.1 SAISONALE MESSDATEN WÄRME

		Erzeugte Wärme			Nutzwärme		
		Raumheizung	Warmwasser	Raumkühlung	Raumheizung	Warmwasser	Raumkühlung
2007/2008	Winter	30'414 kWh	4'962 kWh	-	30'414 kWh (28'432 kWh)	2'321 kWh	-
	Sommer	5'630 kWh	4'642 kWh	2'078 kWh	5'630 kWh (5'163 kWh)	2'219 kWh	2'078 kWh
	Jahr	36'044 kWh	9'604 kWh	2'078 kWh	36'044 kWh (33'595 kWh)	4'539 kWh	2'078 kWh
2008/2009	Winter	32'850 kWh	7'258 kWh	-	32'850 kWh (30'160 kWh)	4'713 kWh	-
	Sommer	2'075 kWh	5'552 kWh	3'637 kWh	2'075 kWh (1'566 kWh)	3'218 kWh	3'637 kWh
	Jahr	34'926 kWh	12'810 kWh	3'637 kWh	34'926 kWh (31'727 kWh)	7'931 kWh	3'637 kWh

Tab. 14: Saisonale Messdaten zu erzeugter Wärme und Nutzwärme. Für die Nutzwärme Raumheizung sind in Klammern die summierten Werte der wohnungsweise installierten Wärmemengenzähler aufgeführt.

7.2 SAISONALE MESSDATEN ELEKTRIZITÄT

		Raumheizung				Warmwasser			Raumkühlung		
		Umwälzpumpe Kondensator	Wärmepumpe (Kompressor + Regelung)	Umwälzpumpe EWS	Umwälzpumpe FBH	Umwälzpumpe Kondensator	Wärmepumpe (Kompressor + Regelung)	Umwälzpumpe EWS	Umwälzpumpe EWS	Umwälzpumpe FBH	Regelung
2007/2008	Winter	261 kWh	6821 kWh	576 kWh	96 kWh	40 kWh	1798 kWh	101 kWh	-	-	-
	Sommer	71 kWh	1057 kWh	97 kWh	58 kWh	34 kWh	1505 kWh	81 kWh	224 kWh	24 kWh	11 kWh
	Jahr	331 kWh	7878 kWh	672 kWh	154 kWh	74 kWh	3304 kWh	182 kWh	224 kWh	24 kWh	11 kWh
2008/2009	Winter	276 kWh	6720 kWh	602 kWh	124 kWh	65 kWh	2622 kWh	161 kWh	-	-	-
	Sommer	20 kWh	360 kWh	33 kWh	29 kWh	41 kWh	1760 kWh	100 kWh	427 kWh	48 kWh	22 kWh
	Jahr	296 kWh	7080 kWh	635 kWh	153 kWh	105 kWh	4381 kWh	261 kWh	427 kWh	48 kWh	22 kWh

Tab. 15: Saisonale Messdaten zum Elektrizitätsbezug, aufgeteilt auf die einzelnen Verbraucher

7.3 SAISONALE MESSDATEN RAUMKLIMA

		Raumlufthtemperatur			Raumlufthfeuchte		
		Wohnung 1	Wohnung 2	Wohnung 3	Wohnung 1	Wohnung 2	Wohnung 3
Winter 2007/08	Mittelwert	22.5 °C	23.7 °C	24.1 °C	58 % _{r.F.}	43 % _{r.F.}	44 % _{r.F.}
	10%-Quantil	21.9 °C	22.7 °C	23.2 °C	53 % _{r.F.}	37 % _{r.F.}	38 % _{r.F.}
	90%-Quantil	24.0 °C	24.7 °C	26.4 °C	68 % _{r.F.}	65 % _{r.F.}	59 % _{r.F.}
Sommer 2008	Mittelwert	21.2 °C	22.3 °C	22.8 °C	50 % _{r.F.}	31 % _{r.F.}	32 % _{r.F.}
	10%-Quantil	19.7 °C	21.9 °C	22.3 °C	41 % _{r.F.}	21 % _{r.F.}	22 % _{r.F.}
	90%-Quantil	23.8 °C	22.8 °C	23.4 °C	62 % _{r.F.}	43 % _{r.F.}	46 % _{r.F.}
Winter 2008/09	Mittelwert	24.0 °C	23.9 °C	23.8 °C	53 % _{r.F.}	50 % _{r.F.}	52 % _{r.F.}
	10%-Quantil	21.8 °C	22.4 °C	20.5 °C	44 % _{r.F.}	39 % _{r.F.}	42 % _{r.F.}
	90%-Quantil	25.5 °C	25.3 °C	26.0 °C	62 % _{r.F.}	59 % _{r.F.}	61 % _{r.F.}
Sommer 2009	Mittelwert	20.0 °C	22.4 °C	23.3 °C	45 % _{r.F.}	31 % _{r.F.}	31 % _{r.F.}
	10%-Quantil	18.5 °C	21.9 °C	22.6 °C	36 % _{r.F.}	23 % _{r.F.}	23 % _{r.F.}
	90%-Quantil	21.1 °C	22.9 °C	23.8 °C	53 % _{r.F.}	38 % _{r.F.}	39 % _{r.F.}

Tab. 16: Saisonale Messdaten zum Raumklima

7.4 DYNAMISCHER VERLAUF DER ERDWÄRMESONDEN-TEMPERATUREN

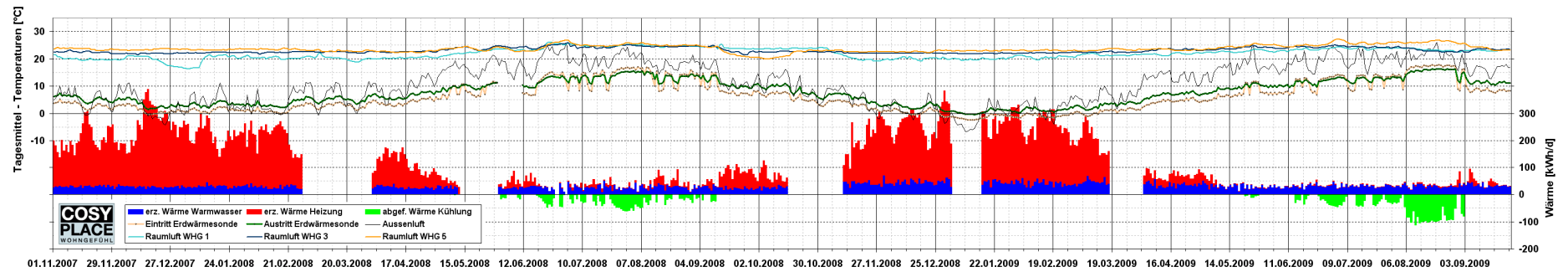


Abb. 40: Verlauf der Erdwärmesonden- und Raum-Temperaturen sowie der erzeugten resp. abgeführten Wärme über beide Messjahre