



Schlussbericht 22. Dezember 2010

SEK: Standardlösungen zum effizienten Kühlen mit Wärmepumpen

Feldmessung: Das passive Kühlen und Heizen
mit erdgekoppelter Wärmepumpe in einem
Einfamilienhaus in Muolen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm UAW
CH-3063 Ittigen
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Viessmann (Schweiz) AG
Geschäftsbereich SATAG Thermotechnik
Romanshornstrasse 36
CH- 9320 Arbon
www.viessmann.ch, www.satagthermotechnik.ch

Auftragnehmer:

Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik
Institut Energie am Bau
St. Jakobs- Strasse 84
CH- 4132 Muttenz
www.fhnw.ch/iebau

Autoren:

Norbert Lederle, FHNW - Institut Energie am Bau, norbert.lederle@fhnw.ch
Ralf Dott, FHNW - Institut Energie am Bau, ralf.dott@fhnw.ch
Thomas Afjei, FHNW - Institut Energie am Bau, thomas.afjei@fhnw.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleiter: Thomas Kopp, tkopp@hsr.ch

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 151922 / 101579

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

In Muolen wurde 2008 das MINERGIE®- Haus mit der Zertifikatsnummer SG-668 erstellt. Das Einfamilienhaus wird mit einer Sole/Wasser Wärmepumpe vom Typ Viessmann Vitocal 300-G monovalent beheizt und bei Bedarf mit der Erdwärmesonde passiv gekühlt. Die Wärmeabgabe im Heizbetrieb und die Wärmeaufnahme im Kühlbetrieb erfolgen über eine Niedertemperatur-Fussbodenheizung.

Im Rahmen dieses Projektes soll das Praxisverhalten von erdgekoppelten Wärmepumpen mit passiver Kühlung messtechnisch untersucht werden. Die Messungen werden im Zeitraum von Januar 2009 bis April 2010 durchgeführt. Anhand der Messdaten der ersten Winterperiode konnte die Anlage optimiert werden, so dass die Messdaten ab der Sommer 2009 repräsentativ ausgewertet werden konnten. Um eine Winterperiode repräsentativ auszuwerten, wurde die Messperiode vom Dezember 2009 bis zum Frühling 2010 verlängert.

Im Berichtszeitraum wurden der Aufwand für die passive Kühlung und der Einfluss der Kühlung auf den Heiz- und Warmwasserbetrieb ermittelt. Ebenfalls wurden Kennzahlen als Gütekriterium ermittelt und die Energiebilanz der Anlage für die Messperioden erstellt. Der Systemnutzungsgrad für Heizung, Warmwasser und Kühlung, d.h. das Verhältnis zwischen Nutzenergie zu Aufwand, beträgt in diesem Zeitraum 3.7 und 7.1 nur für die Kühlung.

Das installierte passive Kühlsystem erweist sich somit als ein sehr effizientes System zur Gebäudekühlung. Das Ansteigen der Innentemperatur kann mit dem passiven Kühlsystem reduziert werden. Während zwei achttägigen Perioden mit gleicher Aussentemperatur, einmal mit und einmal ohne Kühlung, konnte eine Absenkung der über 24 h gemittelten mittleren Raumtemperatur durch das passive Kühlsystem um 3 K festgestellt werden.

Abstract

In Muolen the MINERGIE® house with the certificate number SG-688 was built in 2008. The single family house is heated by a monovalent brine/water heat pump of the type Viessmann Vitocal 300-G and passively cools by the borehole exchanger, if necessary. The heat emission system is a low-temperature floor heating system. This system is also used for passive cooling.

In this measurement project the practical behavior of earth coupled heat pumps with passive cooling is to be examined. The measurement project last from January 2009 till April 2010. On base of measurement data from the first winter period the installed heat pump system could be optimized, so that the measurement data could be analyzed from the summer period 2009. Actually, measurement data for the winter period analysis representative the time schedule was extended from December 2009 up to spring 2010.

During the reporting period the effort for the passive cooling and the influence of cooling on domestic hot water and heating production were analyzed. Also the performance factor and the energy balance of the heat pump system were determinate for the measuring periods. The system seasonal performance factor for heating, warm water and cooling, i.e. the ratio of used energy to totally energy demand, is 3.7 amounts this period and 7.1 only for cooling.

The installed passive cooling system proves as a very efficient system to cool buildings. The rise of the interior temperature could be reduced with the passive cooling system. During two eight-day periods the drop of the 24 h middle inside temperature could be observed by the passive cooling system around 3 K.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage & Zielsetzung.....	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Projektziele.....	1
1.3	Durchgeführte Arbeiten.....	2
2	Grundlagen und Vorgehen.....	3
2.1	Beschreibung des Gebäudes.....	3
2.2	Kennzahlen als Gütekriterium.....	6
3	Ergebnisse des Winters 2009	8
3.1	Zusammenfassung der ersten Winterperiode.....	8
3.2	Heizkurve und Energiesignatur der Wärmepumpe.....	8
3.3	Thermische Behaglichkeit.....	9
4	Ergebnisse des Sommers 2009	12
4.1	Zusammenfassung der Sommerperiode	12
4.2	Kühlleistung und Elektrische Aufnahmeleistung.....	12
4.3	Thermische Behaglichkeit.....	16
5	Ergebnisse des Winters 2009/2010	20
5.1	Zusammenfassung der zweiten Winterperiode	20
5.2	Heizleistung und elektrische Leistungsaufnahme.....	20
5.3	Heizkurve und Energiesignatur der Wärmepumpe.....	23
5.4	Thermische Behaglichkeit.....	24
6	Schlussfolgerungen.....	27
7	Symbolverzeichnis	30
7.1	Variablen	30
7.2	Indizes.....	30
8	Literaturverzeichnis	31
9	Anhang	32
9.1	Messstellenschema.....	32
9.2	Messstellenverzeichnis	33
9.3	Messunsicherheiten	35
9.4	Genauigkeitsbetrachtungen	36

1 Ausgangslage & Zielsetzung

1.1 AUSGANGSLAGE

Kühlen im Wohnbereich ist in der Schweiz bisher noch wenig verbreitet, doch auf dem Markt ist mittlerweile ein Trend zur Integration von Kühloptionen festzustellen, da die Mehrkosten gegenüber einer Erdwärmesonden- Wärmepumpe ohne Kühloption mit ca. 3000.- CHF gering sind.

Gestiegene Komfortansprüche an das Innenklima, Trends in der Architektur zu erhöhten Glasanteilen - zur Nutzung passiv solarer Gewinne im Winter oder auch aus ästhetischen Gründen – zeigen schon heute einen steigenden Kühlbedarf bei Gebäuden, in denen kein ausreichender Sonnenschutz installiert ist oder hohe interne Lasten vorliegen. Deswegen wird häufig bei der Planung von Neubauten der Einsatz einer Kühlung geprüft.

1.2 PROJEKTZIELE

Ziel der Arbeiten ist die messtechnische Evaluation der Wärme- & Kälteversorgung des MINERGIE®- Einfamilienhauses in Muolen und die erreichte thermische Behaglichkeit über eine Messdauer von einem Jahr. Im Rahmen der Auswertung der Pilotanlage Muolen sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden.

Behaglichkeit:

- Häufigkeitsverteilung der Raumtemperaturen und Raumfeuchten
- Einfluss der Komfortfunktion Kühlung
- Subjektives Empfinden der Bewohner

Energiebilanz:

- Kühlenergie zur Raumtemperierung
- Dauer der Kühlfunktion
- Nutzwärme für Fussbodenheizung und Warmwasser
- Elektrizitätsbedarf für die Erzeugung von Heizwärme, Warmwasser und die passive Kühlung

Kennzahlen:

- Anlageneffizienz zur Erzeugung von Heizwärme, Warmwasser, Raumkühlung (Jahresarbeitszahl JAZ, Wärmeerzeugernutzungsgrad WNG, Systemnutzungsgrad SNG) in Abhängigkeit der gegebenen Randbedingungen

$$\text{Anlageeffizienz} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

1.3 DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN

Nach Fertigstellung des MINERGIE®- Einfamilienhaus in Muolen wurde Ende 2008 das Messwerterfassung- System National Instruments Compact Field Point Real-Time Data Logger mit Dataübertragung und Monitoring via VPN- Verbindung über den verfügbaren Breitband- Internet Zugang (5000/500Kbit/s) installiert. Die Auswertung der Messdaten konnte ab dem 09. Januar 2009 nach ordnungsgemässer Installation der Messgeräte durchgeführt werden. Die Auswertung erfolgte in drei Etappen:

Winter 2009: 09. Januar bis 30. April 2009

Fortlaufende Erfassung der Messdaten, Aufbereitung und Plausibilitätskontrolle. Optimierung der Datenerfassung und des Wärmeerzeuger- und Wärmeabgabe- Systems.

Sommer 2009: 01. Mai bis 30. September 2009

Erfassung und Auswertung der Messdaten während der Sommerperiode.

Winter 2009/10: 01. Oktober 2009 bis 30. April 2010

Erfassung und Auswertung der Messdaten während der Winterperiode.

2 Grundlagen und Vorgehen

2.1 BESCHREIBUNG DES GEBÄUDES

Bei der Pilotanlage handelt es sich um ein MINERGIE®- Einfamilienhaus¹. Die Messpunkte wurden bei der Pilotanlage so gewählt, dass die Energieflüsse und Zustandsbeschreibungen der Bilanzgrenzen ermittelt werden können.

Das Gebäude mit der Zertifikatsnummer SG-668 ist ein Neubau mit anderthalb Stockwerken nach MINERGIE®- Standard in Muolen im Kanton St. Gallen. Es verfügt über eine Energiebezugsfläche von 279 m². In das Gebäude integriert sind eine Garage und drei Kellerräume die ausserhalb der Dämmebene liegen. Eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und vorgeschaltetem Luft-Erdreich-Wärmeübertrager sorgt für die Frischluftzufuhr. Eine Wärmepumpe mit Erdwärmesonde erzeugt die für Raumheizung und Warmwasser benötigte Wärme. Die Wärmeübergabe an die Räume erfolgt mit einer auf 30 °C Vorlauf ausgelegten und dadurch selbstregelnden Fussbodenheizung, die ohne Raumthermostaten auskommt. Zur Behaglichkeitssteigerung im Sommer kann das Gebäude über eine „natural cooling“ genannte Funktion gekühlt werden. Dabei wird der Fussbodenkreis bei ausgeschalteter Wärmepumpe direkt über einen Plattenwärmeübertrager an die Erdwärmesonde gekoppelt.



Abbildung 1: Ansicht des MINERGIE® Einfamilienhaus in Muolen (Kanton SG)

¹ <http://www.minergie.ch>

MINERGIE® Einfamilienhaus in Muolen (490 m ü. M. / Kanton SG)	
Heizgradtage St. Gallen 1991-2000 (Quelle: HEV)	3818 Kd
Bewohner	2 Erwachsene + 1 Baby
Energiebezugsfläche (EBF)	279 m ²
Gebäudehüllflächenverhältnis (A/EBF)	2.01
Heizwärmebedarf (SIA 380/1:2007)	221 MJ/ m ² a
Norm- Heizlast (SIA 384.201:2005)	6.4 kW
Normaussentemperatur -9°C	
Wärmeerzeuger	Sole/Wasser Wärmepumpe
Auslegungstemperatur Vorlauf 30°C / Rücklauf 25°C	Typ: Viessmann Vitocal 300-G
Erdsonde (Doppel- U- Rohr Wärmeübertrager)	DN 32 / 150 m
Nennwärmeleistung (B0W35)	8.4 kW

Tabelle 1: Übersicht der Gebäudedaten

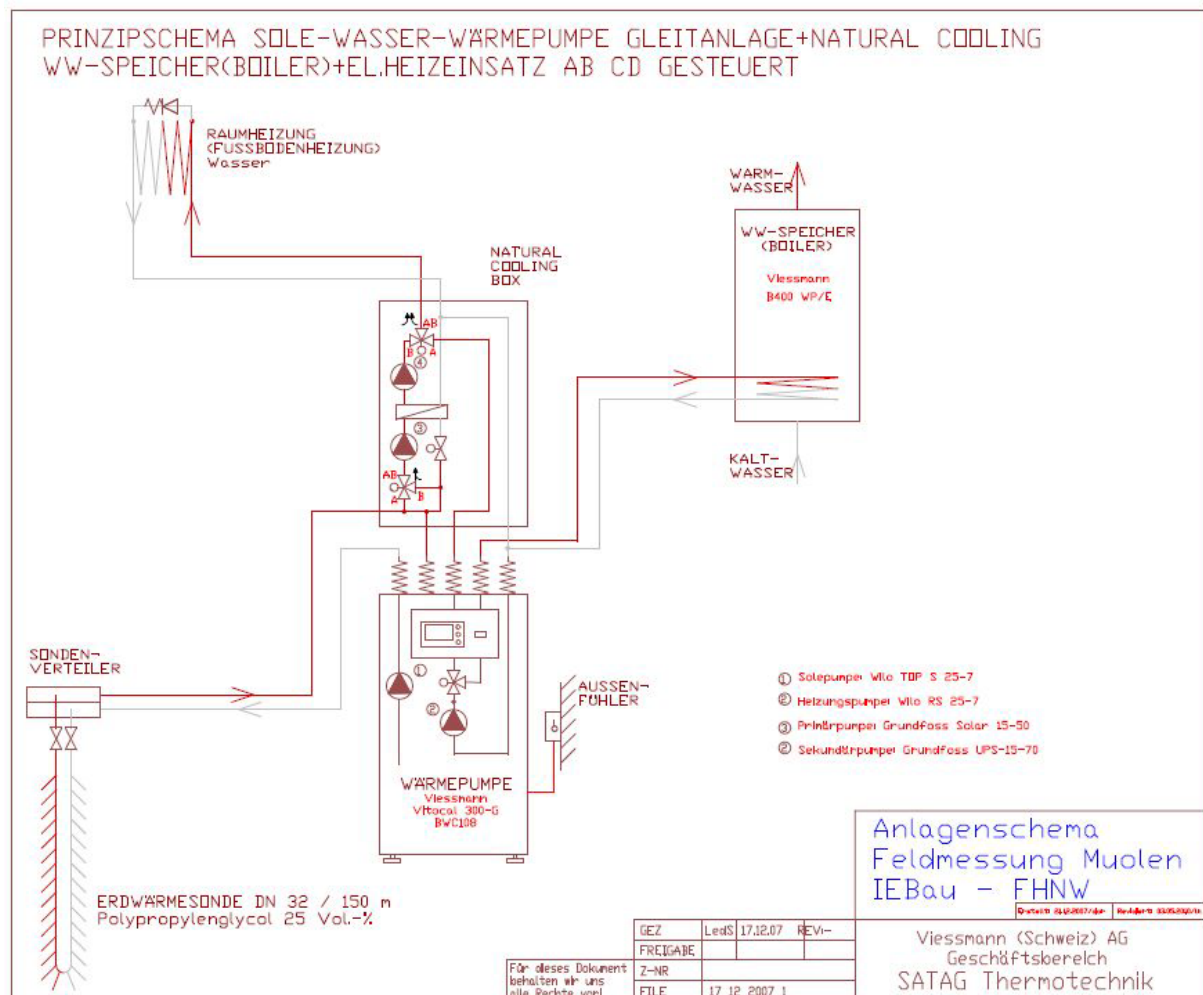


Abbildung 2: Anlagenschema der Pilotanlage in Muolen

In Abbildung 2 ist das Anlagenschema der Wärmeversorgung dargestellt, ein detaillierteres Schema mit eingetragenen Messstellen befindet sich im Anhang. Die detaillierte Beschreibung der Messpunkte befindet sich im Anhang. Die Messgrößen werden über speziell installierte Sensoren bzw. Wärmehäler und einen Datenlogger aufgezeichnet. Dabei werden die Wärmeerzeugung der

Wärmepumpe und die Kälteabfuhr über die Erdwärmesonde für Raumklima und Warmwasserbereitung, die Frischluftversorgung sowie die Raumluft- und Warmwassertemperatur betrachtet. Die Messdaten werden minütlich gemessen und mit einem Datenlogger fortlaufend als 15min-Mittelwerte gespeichert.

2.2 KENNZAHLEN ALS GÜTEKRITERIUM

Die Anlageneffizienz von Gesamtsystem und den Subsystemen Heizen, Kühlen und Warmwasser soll mit den aufgeführten Kennzahlen aus den Messwerten bestimmt werden. Die in den Formeln und zur Beschreibung der Messstellen verwendeten Variablen und Indizes sind im Anhang detailliert beschrieben. Bei Messpunkten wie beispielsweise dem Elektrizitätsbezug $E_{HWC, hp}$ der Wärmepumpe, in dem mehrere Betriebszustände kombiniert erfasst werden, wird durch einen zusätzlichen Index an der eckigen Klammer angegeben, welcher Betriebszustand (Heizen/Warmwasser/Kühlen) bei der Berechnung berücksichtigt wird.

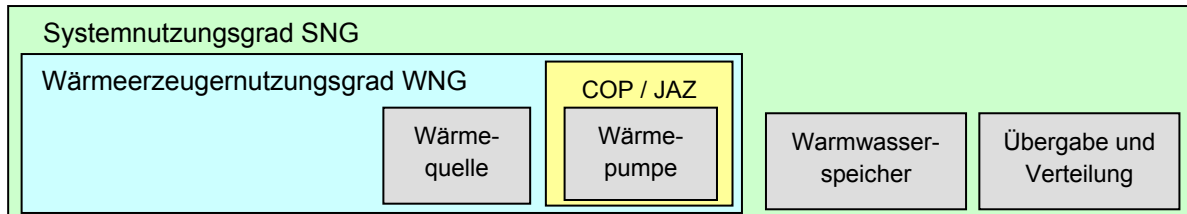


Abbildung 3: Allgemeine Definition und Bilanzgrenzen der Effizienz- Kennzahlen zur Beurteilung des Systems

- Wärmeerzeugernutzungsgrad Heizung (WNG_H) und Warmwasser (WNG_W)
Durch die Wärmepumpe (hp) erzeugte Wärme für Heizung und Warmwasser dividiert durch den elektrischen Energiebezug der Wärmepumpe. Im elektrischen Energiebezug ist die Energie für den Verdichter, die Regelung und die Umwälzpumpe der Wärmequelle aber nicht die Umwälzpumpe des Wärmeabgabesystems enthalten. Da die Wärmepumpe, wie in Abbildung 2 ersichtlich direkt an die Fussbodenheizung angeschlossen ist entspricht die produzierte Wärme der an das Wärmeabgabesystem abgegebenen Wärme und wird für die Ermittlung des Wärmeerzeugernutzungsgrad verwendet.

$$\text{Wärmeerzeugernutzungsgrad für Heizung und Warmwasser} = \frac{\text{erzeugte Wärme für Heizung und Warmwasser}}{\text{elektr. Energiebezug für Wärmeerzeugung und Regelung}}$$

$$WNG_{HW} = \frac{Q_{H,em} + Q_{W,sk}}{[E_{HWC, hp} - E_{HW, pmp, sk}]_{HW}} \quad \text{Gl. 01}$$

$$\text{Wärmeerzeugernutzungsgrad für Heizung} = \frac{\text{erzeugte Wärme für Heizung}}{\text{elektr. Energiebezug für Heizung und Regelung}}$$

$$WNG_H = \frac{Q_{H,em}}{[E_{HWC, hp} - E_{HW, pmp, sk}]_H} \quad \text{Gl. 02}$$

$$\text{Wärmeerzeugernutzungsgrad für Warmwasser} = \frac{\text{erzeugte Wärme für Warmwasser}}{\text{elektr. Energiebezug für Warmwassererzeugung und Regelung}}$$

$$WNG_W = \frac{Q_{W,sk}}{[E_{HWC, hp} - E_{HW, pmp, sk}]_W} \quad \text{Gl. 03}$$

- Systemnutzungsgrad Heizung (SNG_H) und Warmwasser (SNG_W)
In der Wohnung genutzte Wärme der Wärmepumpe für Raumheizung und Warmwasser dividiert durch den elektrischen Energiebezug der Wärmepumpe inkl. der Umwälzpumpen des Wärmeabgabesystems. Da die genutzte Wärme nicht direkt erfasst werden kann und die an das Wärmeabgabesystem abgegebene Wärme in etwa dieser Wärmemenge entspricht wird die an die Fussbodenheizung abgegebene Wärme zur Ermittlung des Systemnutzungsgrad verwendet.

$$\text{Systemnutzungsgrad für Heizung} = \frac{\text{genutzte Wärme für Heizung}}{\text{elektr. Energiebezug für Heizung, Verteilung und Regelung}}$$

$$SNG_H = \frac{Q_{H,em}}{[E_{HWC, hp}]_H} \quad \text{Gl. 04}$$

$$\text{Systemnutzungsgrad für Warmwasser} = \frac{\text{genutzte Wärme für Warmwasser}}{\text{elektr. Energiebezug für Warmwasser, Verteilung und Regelung}}$$

$$SNG_W = \frac{Q_W}{[E_{HWC, hp}]_W} \quad \text{Gl. 05}$$

- Systemnutzungsgrad Kühlung (SNG_C)
über die Bodenheizung abgeführte Wärme aus dem Gebäude dividiert durch den elektrischen Energiebezug der Umwälzpumpen für die Wärmequelle, Wärmeverteilung und -übergabe und den Aufwand für die Regelung (nur passive Kühlung mit Erdwärmesonde) zur Zeit der Kühlung. Da die aus der Wohnung abgeführte Wärme nicht direkt erfasst werden kann und die über das Wärmeabgabesystem abgeführte Wärme in etwa dieser Wärmemenge entspricht wird die über die Fussbodenheizung abgeführte Wärme zur Ermittlung des Systemnutzungsgrad verwendet.

$$\text{Systemnutzungsgrad für Kühlung} = \frac{\text{abgeführte Wärme zur Kühlung}}{\text{elektr. Energiebezug zur Kühlung, Verteilung und Regelung}}$$

$$SNG_C = \frac{Q_{C,em}}{[E_{HWC, hp}]_C} \quad \text{Gl. 06}$$

3 Ergebnisse des Winters 2009

3.1 ZUSAMMENFASSUNG DER ERSTEN WINTERPERIODE

In der ersten Winterperiode (09. Januar bis 30. April 2009) wurden fortlaufend Messdaten erfasst und zur Plausibilitätskontrolle und Optimierung der Datenerfassung und des Wärmeerzeuger- und Wärmeabgabesystems aufbereitet. Die Auswertung des Wärmeerzeugernutzungsgrades für Heizung und Warmwasser zeigen für die installierte Sole/Wasser- Wärmepumpe zunächst eher niedrige Nutzungsgrade. Am 12. Mai 2009 wurde die Ursache für die unerwartet niedrigen Wärmeerzeugernutzungsgrade vor Ort gefunden, nachdem kein Fehler in den Messdatenerfassung zu eruieren war. Dabei wurde festgestellt, dass die Wärmepumpe nicht mit genügend Kältemittel gefüllt war. Die Ursache für den Kältemittelverlust konnte nicht festgestellt werden. Die bis zum 12. Mai 2009 gemessenen Daten sind für eine Auswertung der Winterperiode 2009 nicht repräsentativ. Die Heizleistung der installierten Wärmepumpe war trotz Kältemittelverlust für die Beheizung des Einfamilienhauses ausreichend um die Behaglichkeit für die Bewohner zu gewährleisten.

- Die Messdaten bis zum 12. Mai 2009 sind für eine Auswertung aufgrund nicht repräsentativer Betriebsbedingungen nicht geeignet.
- Diese Messdaten wurden zur Optimierung der Anlage verwendet.

3.2 HEIZKURVE UND ENERGIESIGNATUR DER WÄRMEPUMPE

Die Heizleistung der Wärmepumpe war im Messzeitraum, trotz dem substanziellen Mangel an Kältemittel zur Beheizung des EFH ausreichend. Die Berechnung nach SIA 384.201 [SIA 03] ergab für das MINERGIE® Einfamilienhaus eine Heizlast von etwa 6.4 kW bei der Normaussentemperatur von -9°C. Damit ist die installierte Wärmepumpe mit einer Nennwärmeleistung von 8.4kW (B0W35) um 30% überdimensioniert.

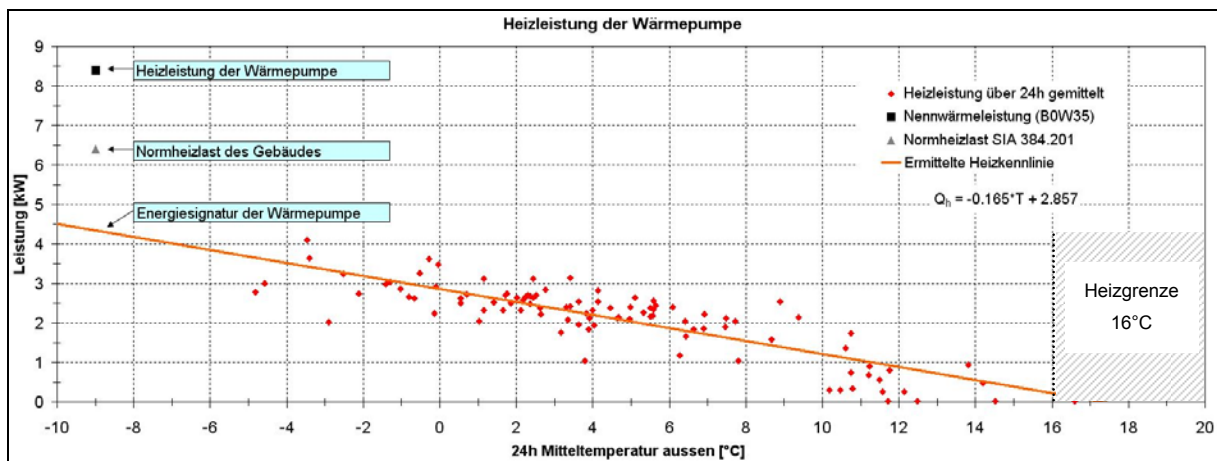


Abbildung 4: Mittlere Heizleistung über dem Tagesmittelwert der Aussentemperatur vom Januar bis zum April 2009 zur Abschätzung der tatsächlichen Heizlast des Gebäudes sowie der Heizgrenze

Die Abschätzung der tatsächlichen Heizlast des Gebäudes in Abbildung 4 ergab bei einer mittleren Aussentemperatur von -9°C lediglich eine Heizlast des Gebäudes von ca. 4.4 kW, damit wäre die Wärmepumpe mit über 90% deutlich überdimensioniert. Am Regler wird die Heizkurve anhand der Vorlauftemperatur eingestellt. Die Regelung der Wärmepumpe erfolgt jedoch über die Rücklauftemperatur. Dazu wird von der Wärmepumpenregelung eine konstante Temperaturdifferenz von 5K zwischen Vorlauf und Rücklauf berücksichtigt, die in Realität nicht konstant gehalten werden kann.

Am 27. März 2009 wurden die Standardeinstellungen des Reglers angepasst und die Heizkurve, wie in Abbildung 5 dargestellt etwas steiler eingestellt. Ebenfalls wurde der Mittelwert in Absprache mit dem Nutzer von 3h auf 18 h verlängert und die Heizgrenze von 16°C auf 13°C abgesenkt. Die Wärmepumpenregelung aktiviert somit den Heizbetrieb unterhalb einer über 18h gemittelten Aussentemperatur von 13°C. Sofern die mittlere Aussentemperatur 15°C übersteigt wird aufgrund der voreingestellten Hysterese von 2K der Heizbetrieb ausgeschaltet.

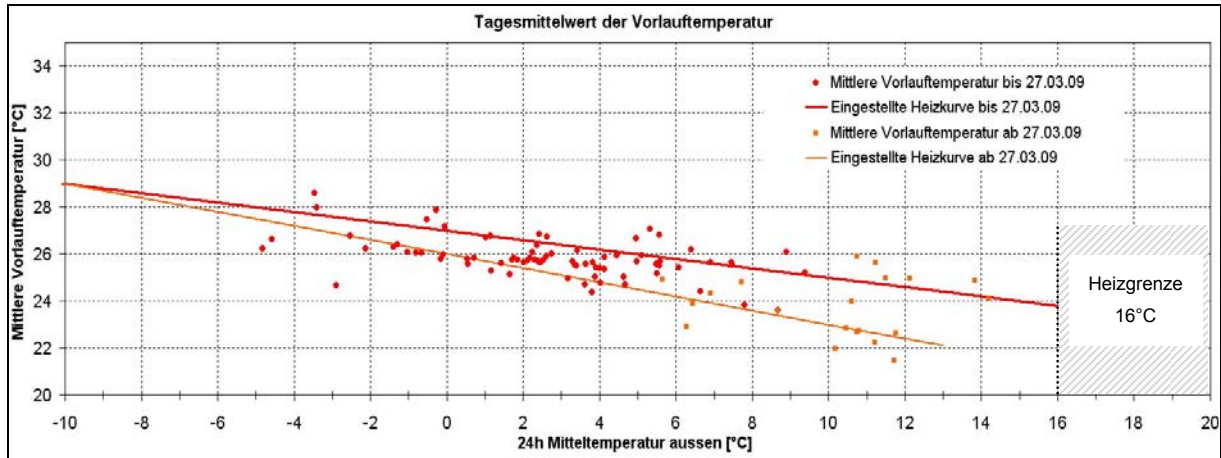


Abbildung 5: Mittlere Vorlauftemperatur über der mittleren Aussentemperatur und die im Regler der Wärmepumpe eingestellte Heizkurve vom Januar bis April 2009

3.3 THERMISCHE BEHAGLICHKEIT

Mitte Februar 2009 sank die Aussentemperatur nachts auf bis zu -10 °C ab, der Tagesmittelwert lag bei etwa -5°C. Bei diesen tiefen Aussentemperaturen sank die Zuluft- Temperatur auf etwa 13°C ab. Die Empfehlung [Drexel 00], dass die Zuluft- Temperatur der Komfortlüftung nie tiefer als 16.5 °C ist damit zu begründet, dass die Behaglichkeit in den Räumen nicht beeinträchtigt werden soll. Sind aufgrund der Planung der Anlage tiefere Zuluft- Temperaturen zu erwarten, sollte dem durch die Platzierung der Zuluft- Auslässe Rechnung getragen werden.

Die Raumtemperaturen und die Raumlufffeuchte liegen bis auf wenige Ausnahmen im Komfortbereich nach EN 15251 Kategorie II (normale Anforderungen) [SIA 07] für Wohngebäude. Die Raumlufffeuchte von 25 %r.F. wird auch bei kalten Aussentemperaturen nicht unterschritten, dies lässt sich jedoch durch die vom Nutzer gewählten Einstellungen erklären. Die Lüftungsanlage ist ca. 6 h pro Tag (nachts) bei einem Volumenstrom von ca. 75 m³/h in Betrieb. Dadurch wird der über 24 h gemittelte Luftwechsel durch die Komfortlüftung auf 0.04 h⁻¹ reduziert und liegt somit deutlich unter dem minimal notwendigen Aussenluftwechsel nach SIA 2023 [SIA 08].

In Abbildung 6 ist ein Verlauf über 10 Tage dargestellt. Im Obergeschoss ist überwiegend eine tiefere Raumlufttemperatur festzustellen. Die Raumtemperatur lag im Obergeschoss zwischen 19 °C und 22 °C, wobei die Raumtemperatur etwa dreiviertel der Zeit unter 20 °C lag. Das Unterschreiten der unteren Temperaturgrenze des Behaglichkeitsbereiches ist damit zu erklären, dass der Raumtemperaturfühler im Schlafbereich des Hauses angeordnet ist. Daraus lässt sich nicht auf eine Komforteinbusse schliessen, sondern auf das bewusste Absenken der Raumtemperatur im Schlafbereich. Ein Absinken der Raumtemperatur unter 19 °C ist durch Ferien- Abwesenheiten des Nutzers zu erklären. Auffällig ist besonders die tiefe Ablufttemperatur welche im Sammelkasten im Keller des Gebäudes gemessen wurde und deutlich von der mittleren Raumlufttemperatur abweicht. Diese Abweichung lässt sich mit durchschnittlichen Wärmeverlusten von 860 Wh pro Tag durch die ungedämmten Abluftleitungen in der Kellerdecke erklären.

Während der in Abbildung 6 dargestellten Zeitperiode lag der Temperaturänderungsgrad gemäss Gleichung 07 im Mittel bei 84%.

$$\eta_{WRG} = \frac{\Theta_{sa} - \Theta_{oa}}{\Theta_{ra} - \Theta_{oa}} \quad \text{Gl.07}$$

$$\eta'_{WRG} = \frac{\Theta_{sa} - \Theta_{oa}}{\Theta_j - \Theta_{oa}} \quad \text{Gl.08}$$

Berechnet man den Wirkungsgrad des Gesamtsystems gemäss Gleichung 08 indem man die Abluft-Temperatur durch die mittlere Raumtemperatur ersetzt, so sinkt der Wirkungsgrad der Anlage im selben Zeitraum auf 65% ab. Durch das konsequente Dämmen der Lüftungsrohre in der Kellerdecke beziehungsweise durch das Verlegen ungedämmter Leitungen ausschliesslich innerhalb des Dämmperimeters liesse sich Wirkungsgrad des Gesamtsystems deutlich verbessern. Aufgrund des berechneten Temperaturänderungsgrad von 84 % der Komfortlüftung lässt sich bei Vermeidung der Wärmeverluste auf eine durchschnittliche Erhöhung der Zuluft- Temperatur um 3.6 K schliessen.

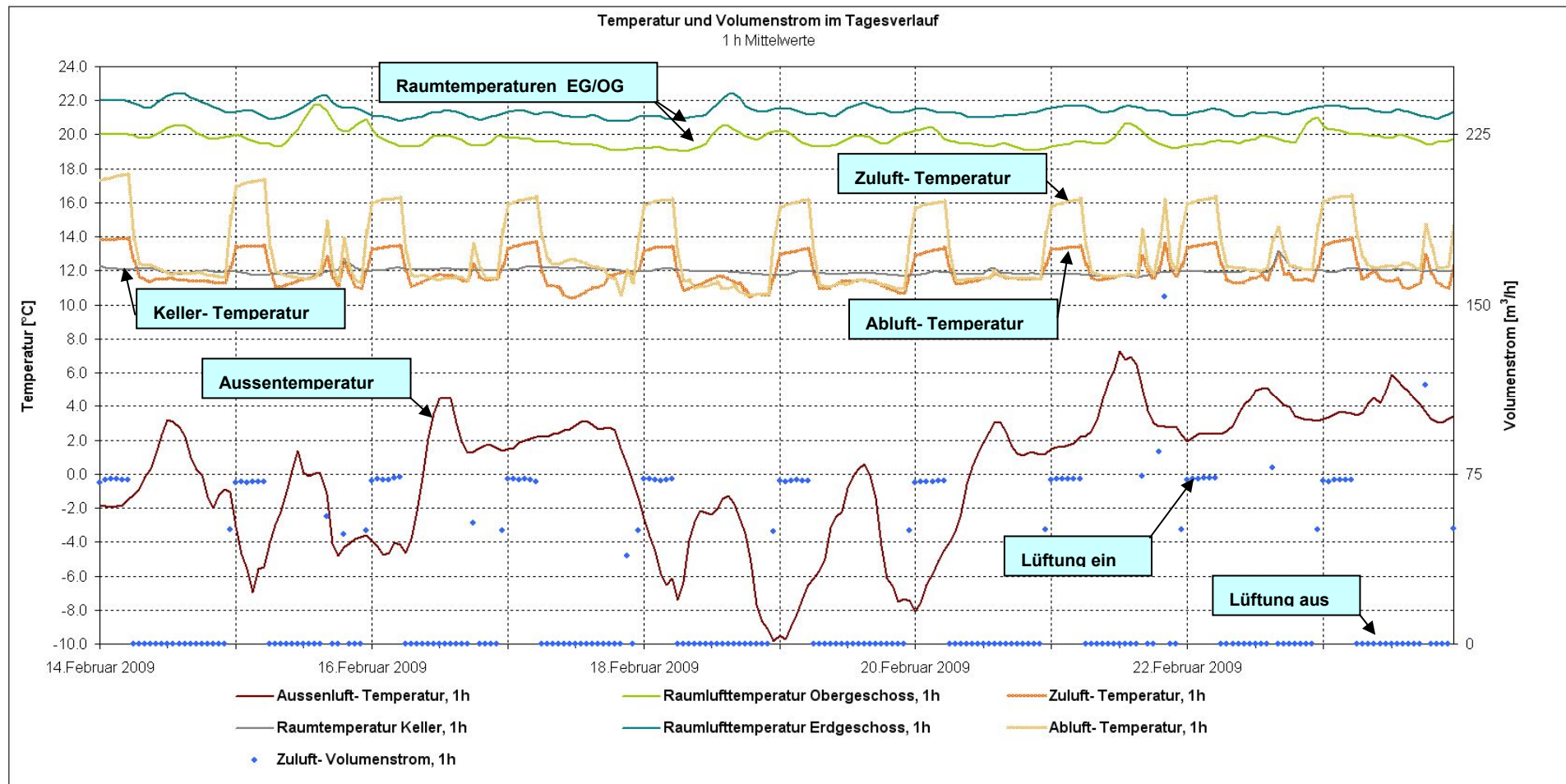


Abbildung 6: Temperaturmesswerte im Tagesverlauf mit Angabe des Betriebszustandes der Komfortlüftung (Einstundenmittelwerte)

4 Ergebnisse des Sommers 2009

4.1 ZUSAMMENFASSUNG DER SOMMERPERIODE

In der Sommerperiode 2009 (01. Mai bis 30. September 2009) wurden Messdaten minütlich erfasst und in 15-minütigen Intervallen aufgezeichnet und die Kennzahlen ermittelt. Es konnte anhand von jeweils 8 Tagen mit und ohne Kühlung der Einfluss der Kühlung gezeigt werden. Durch die passive Kühlung konnte eine Absenkung der mittleren Raumtemperatur um 3 K beobachtet werden. Die durchschnittliche Kühlleistung während der Sommerperiode betrug 1.6 kW, wobei temporär eine maximale Kühlleistung von 6.4 kW (Maximalwert der 15-Minuten Messwerte) erreicht werden konnte. Der Systemnutzungsgrad der passiven Kühlung lag für den Zeitraum Mai bis September 2009 bei 7.1 und der Wärmeerzeugernutzungsgrad der Warmwassererzeugung bei 3.6.

- Spezifische Kühlleistung liegt durchschnittlich bei 6 W/m^2 (maximal 23 W/m^2).
- An die Erdwärmesonde werden etwa 12 W/m abgeführt.
- Durch die Hydraulik der Anlage kann ein Teil der abgeführten Wärme direkt zur Warmwassererzeugung (Erhöhung der Quellentemperatur um 1 K) im Sommer genutzt werden.

4.2 KÜHLLLEISTUNG UND ELEKTRISCHE AUFNAHMELEISTUNG

Die Auswertung der Sommerperiode zeigt, dass mit 1058 kWh eine nicht unerhebliche Wärme aus dem Einfamilienhaus abgeführt werden konnte. Das installierte Wärmepumpensystem mit passiver Kühlung war in den Sommermonaten insgesamt etwa 660 h in Kühlbetrieb. Dies entspricht etwa 18% der Stunden in der berücksichtigten Zeitperiode vom 01. Mai 2009 bis zum 30. September 2009. Abbildung 7 zeigt die vom Wärmepumpensystem produzierte respektive abgeführte Wärme. Zur Warmwasserbereitung wurden von der Wärmepumpe 765 kWh Wärme erzeugt. Die Wärmepumpe war insgesamt 87.6 h zur Warmwassererzeugung in Betrieb. Während 1/6 dieser Zeit war parallel zur Warmwassererzeugung die Kühlung in Betrieb was zu einem direkten Nutzen der dort abgeführten Wärme führte.

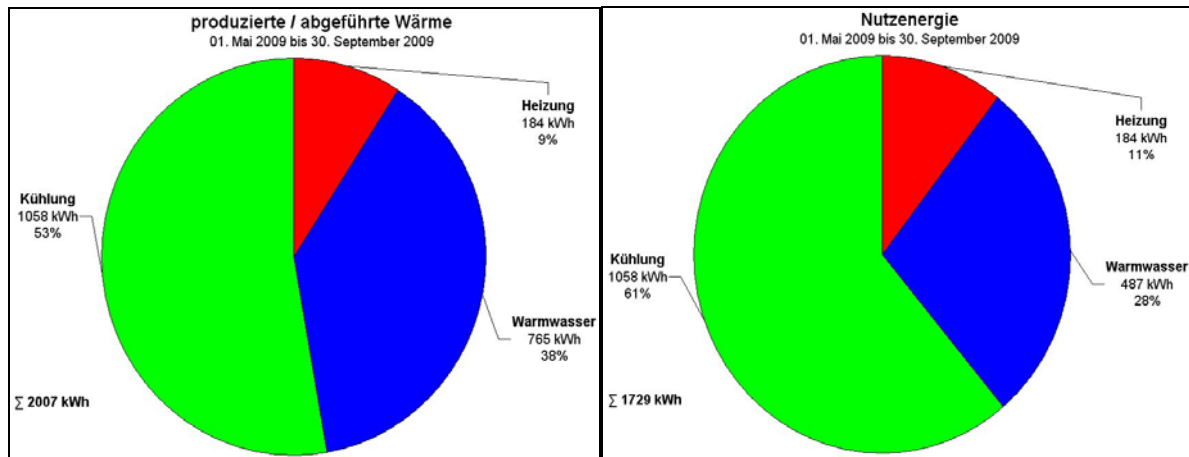


Abbildung 7: Mit dem Wärmepumpensystem produzierte und über die Erdwärmesonde abgeführte Energie (links) während der Sommerperiode 2009 im Vergleich zu genutzten Energie (rechts)

Die vom Wärmepumpensystem bezogene elektrische Energie, um während des Sommers den Heiz- und Kühlbedarf zu decken, ist in Abbildung 8 dargestellt. Insgesamt waren 638 kWh Elektrizität notwendig um 2007 kWh Wärme zu erzeugen respektive abzuführen.

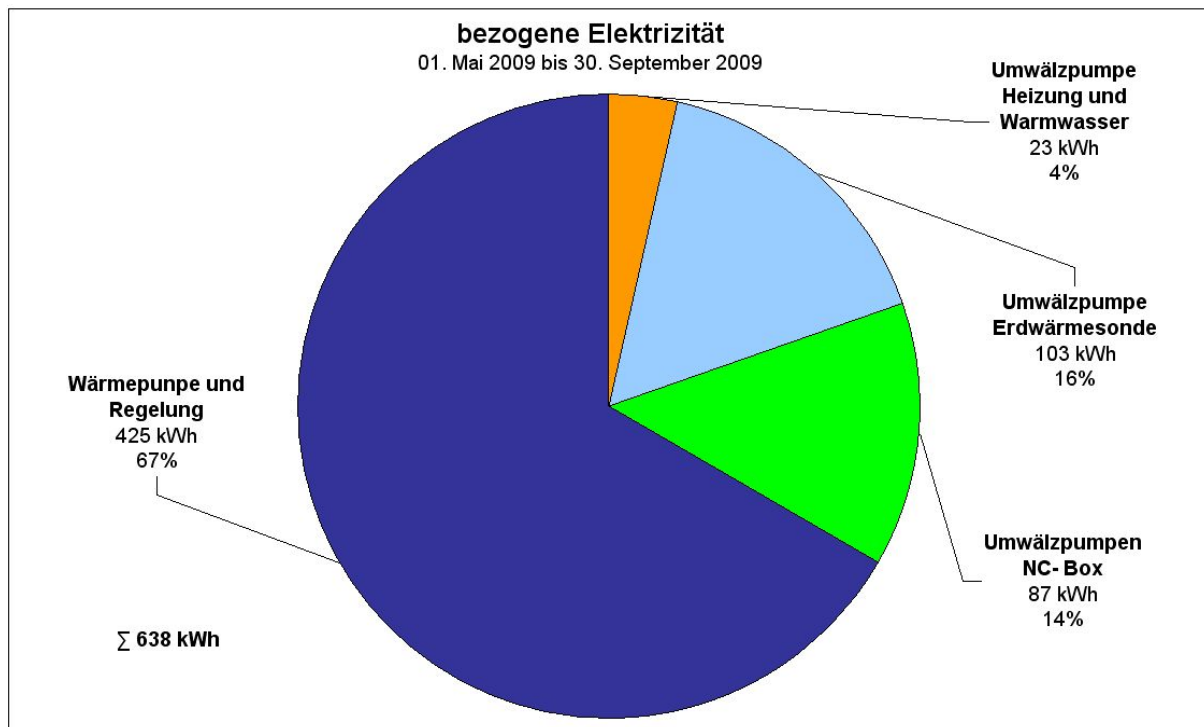


Abbildung 8: Vom Wärmepumpensystem bezogene Elektrizität während der Sommerperiode 2009

Während dieses Zeitraums wurden etwa 20% des Elektrizitätsbedarfs der in der Wärmepumpe integrierten Umwälzpumpe für den Heizbetrieb benötigt, der restliche Anteil fällt auf die Warmwassererzeugung. Der Elektrizitätsbedarf der Umwälzpumpe in der Erdwärmesonde teilt sich in Warmwasser- Heizungs- und Kühlbetrieb auf.

Die Kühlleistung des passiven Kühlsystems betrug im Mittel über die Sommerperiode 1.6 kW, dies entspricht einer spezifischen Kühlleistung von $6 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$. Die maximale Kühlleistung wurde nach einer Periode ohne Kühlung registriert. Unmittelbar nach aktivieren der passiven Kühlung wurde eine Kühlleistung von 6.4 kW gemessen (15 Minuten Mittelwert), das entspricht einer spezifischen Kühlleistung von 23 W/m^2 . An die Erdwärmesonde wurde durchschnittlich eine Leistung von 12 W/m abgeführt.

Während der Sommermonate Mai bis September 2009 konnte ein durchschnittlicher Wärmeerzeugernutzungsgrad von 3.6 für Warmwasser und ein Systemnutzungsgrad von 7.1 für die Kühlung erreicht werden. Die einzelnen Monatswerte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

	Mai '09	Juni '09	Juli '09	August '09	September '09
WNG _W	2.7*	3.8	4.5	4.0	3.3
SNG _C	7.4	7.5	6.5	7.7	6.4

Tabelle 2: Monatswerte des Wärmeerzeugernutzungsgrad für Warmwasser und Kühlung (bei den mit * gekennzeichneten Werten ist ein substanzieller Kältemittelverlust zu berücksichtigen)

	Mai '09	Juni '09	Juli '09	August '09	September '09
Q _W	189 kWh	120 kWh	187 kWh	105 kWh	164 kWh
Q _C	169 kWh	173 kWh	325 kWh	310 kWh	82 kWh

Tabelle 3: Monatswerte der produzierten bzw. abgeführten Wärme in kWh für Warmwasser und Kühlung

	Mai '09	Juni '09	Juli '09	August '09	September '09
Θ _{bhx,out}	13.5 °C	15.3 °C	15.1 °C	16.1 °C	15.2 °C
Θ _{bhx,in}	13.2 °C	15.8 °C	15.6 °C	16.9 °C	14.8 °C
ΔT	- 0.3 K	+ 0.5 K	+ 0.5 K	+ 0.8 K	- 0.4 K

Tabelle 4: Monatsmittelwerte der Soleaustrittstemperatur und der Soleeintrittstemperatur bei Betrieb der Wärmepumpe oder der passiven Kühlung

In Tabelle 3 sind die Monatswerte der produzierten und abgeführten Wärmemengen aufgelistet. In Monaten, bei denen die Kühlung überwiegt liegt die Soleeintrittstemperatur erwartungsgemäss über der Soleaustrittstemperatur. Ebenfalls ist in Tabelle 4 ein Ansteigen der Soleaustrittstemperatur bei den Monaten mit überwiegender Kühlung zu erkennen. Ausserdem scheint an Monaten mit viel Kühlung der Wärmeerzeugernutzungsgrad für Warmwasser tendenziell besser zu sein, als an den Monaten mit weniger Kühlung. Allerdings ist die Verbesserung des Wärmeerzeugernutzungsgrad für Warmwasser anhand der Monatswerte nicht eindeutig zu quantifizieren.

Die nachfolgende Abbildung 9 stellt die Systemtemperaturen innerhalb von 2 Tagen dar. Ab 11:15 Uhr des ersten Tages wurde von der Regelung die Kühlung aktiviert, welche bis zum Ende des zweiten Tages durchgehend aktiv war. Insgesamt wurden an den beiden Tagen 87.4 kWh Wärme abgeführt. Innerhalb von zwei Betriebsphasen wurden insgesamt 16 kWh Warmwasser erzeugt. Während der beiden Tage wurde von der Wärmepumpe 17.0 kWh Elektrizität bezogen um das Warmwasser zu erzeugen und die Wärme abzuführen. Davon wurden 3.5% für die Stand- By Leistung (52 W) in den 11.25 Stunden vor dem Einschalten des Kühlbetriebes benötigt. Ausserdem wurden der Erdwärmesonde 8.2 kWh Wärme entnommen und 93 kWh an die Erdwärmesonde abgegeben. Bei genauerer Betrachtung des Parallelbetriebes stellt man fest, dass während der beiden Phasen der Warmwassererzeugung insgesamt 6.4kWh Wärme über das passive Kühlsystem abgeführt werden konnte, wobei nur 1.5 kWh direkt an die Erdwärmesonde abgegeben wurde. Die Differenz führt zu einer Erwärmung der Sole am Wärmepumpeneintritt, wodurch die Leistungszahl der Wärmepumpe zur Warmwassererzeugung durch den Parallelbetrieb etwas verbessert werden kann. Dabei kann eine Temperaturerhöhung um ca. 1 K anhand der Energiebilanz berechnet werden. Der Wärmeerzeugernutzungsgrad beträgt für die beiden in Abbildung 9 dargestellten Tage für die Warmwassererzeugung 3.0 und der Systemnutzungsgrad für die Kühlung 7.8.

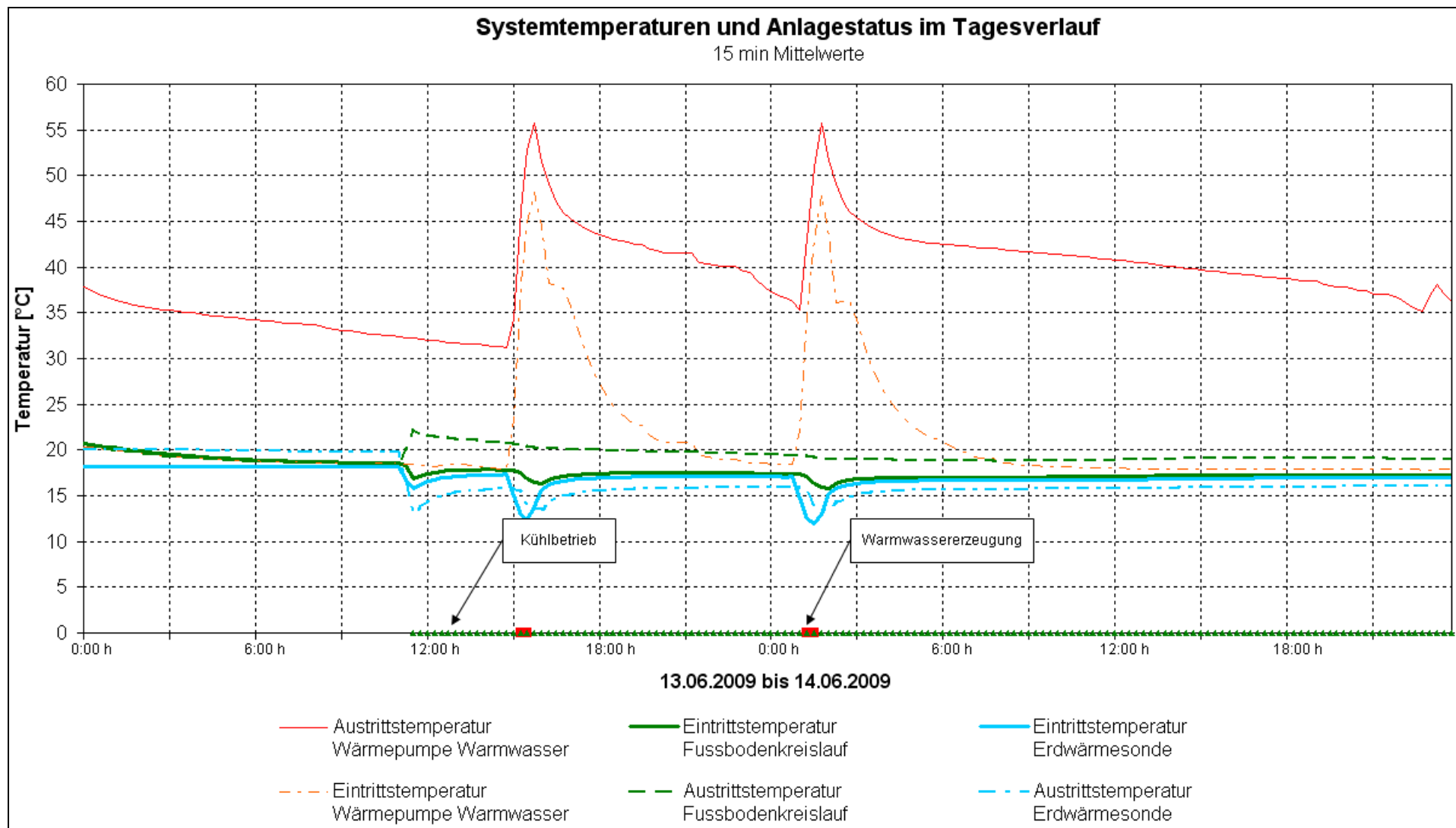


Abbildung 9: Temperaturmesswerte im Tagesverlauf mit Angaben zum Anlagestatus während Kühlbetrieb und paralleler Warmwassererzeugung

4.3 THERMISCHE BEHAGLICHKEIT

Die passive Kühlung war aufgrund einer Ferienabwesenheit vom 15. August bis zum 26. August 2009 nicht aktiviert. Um den Einfluss der Kühlung auf die Innentemperaturen darzustellen wurden zwei Abbildungen erstellt, bei denen die Raumtemperaturen bei einer Periode mit Kühlung und einer Periode ohne Kühlung gegenüber gestellt werden. Dabei wurden die Zeitabschnitte so gewählt, dass die mittlere Aussentemperatur bei der Periode mit Kühlung in etwa der mittleren Aussentemperatur bei der Periode ohne Kühlung entspricht.

In Abbildung 10 ist der Einfluss der Innentemperatur über der Aussentemperatur dargestellt. Abbildung 11 zeigt die Temperatur und Feuchte im Gebäudeinneren um die Behaglichkeit für die Bewohner abschätzen zu können. Dazu wurden zwei dezentrale Datenlogger im Wohnzimmer (EG) und im Schlafzimmer (OG) installiert. Für die Bewertung der Innentemperatur wurde der Mittelwert der beiden Messstellen gebildet. In beiden Abbildungen ist der Einfluss der Kühlung auf die Innentemperatur des Gebäudes deutlich zu erkennen. An den Tagen ohne Kühlung liegt die Innentemperatur im Mittel bei 26.9°C und damit deutlich ausserhalb des Behaglichkeitsfeldes nach EN 15251 [SIA 07], welches die Innentemperatur auf 26°C begrenzt. Im Vergleich dazu liegt die mittlere Innentemperatur an den Tagen mit Kühlung mit 23.8°C um 3.1 K tiefer als an den Tagen ohne Kühlung. Allerdings können die Behaglichkeitskriterien nach EN 15251 [SIA 07] Kategorie II (normale Anforderungen) wie in Abbildung 11 zu erkennen ist ebenfalls nicht eingehalten werden. Grund hierfür ist die Raumluftfeuchte, die mit dem vorhandenen System nicht reguliert werden kann. Der unverhältnismässig hohe Energieaufwand für eine Feuchte- Regulierung rechtfertigt aber die Tolerierung von Raumluftfeuchten ausserhalb des Behaglichkeitsfeldes nach EN 15251 [SIA 07] für Wohnbauten.

Um die Behaglichkeit quantitativ zu beurteilen, können die Messwerte anhand von zwei Kennzahlen bewertet werden. Der PMV (predicted mean vote) beschreibt das Komfortempfinden von Personen. Negative Zahlen auf der Bewertungsskala von -3.0 bis +3.0 deuten auf zu niedrige Temperaturen und positive Zahlen auf zu hohe Temperaturen hin. Der PMV lag in den Tagen mit Kühlung zwischen -0.5 und 0.2. Der Mittelwert über die acht Tage liegt bei -0.2 und damit im Komfortbereich nach Kategorie II. Der PPD (predicted percentage of dissatisfied) beschreibt den voraussichtlichen Anteil unzufriedener Personen aufgrund der thermischen Behaglichkeit. Da nie alle Personen eine thermische Situation gleich beurteilen, sinkt die PPD nie unter einen Anteil von 5 % Unzufriedener ab. Der Anteil unzufriedener Personen lag an den Tagen mit Kühlung zwischen 5.0 % und 10.7 % wenn man alle 15 Minuten Messwerte bewertet. Die Tagesmittelwerte liegen zwischen 5.1 % und 8.1 % und im Mittel über die achttägige Periode bei 6.1 % und damit ebenfalls im Komfortbereich nach Kategorie II. Die Raumtemperaturen lagen an den Tagen mit Kühlung im Bereich von 22.4 °C bis 25.2 °C und somit können die Anforderungen nach EN 15251, SIA 382/1 [SIA 07a] und SIA 2024 [SIA 06] eingehalten werden. An den Tagen ohne Kühlung werden die Behaglichkeitskriterien gemäss Tabelle 5 deutlich überschritten, so dass Kategorie III (moderate Anforderungen) nicht eingehalten werden kann. Es wird ein PMV von 0.7 und ein PPD von 16.8 % im Mittel über die achttägige Periode ohne Kühlung erreicht.

Kategorie	PPD	PMV	Min. Temperatur	Max. Temperatur
I	< 6%	-0.2 < PMV < +0.2	21.0	25.5
II	< 10%	-0.5 < PMV < +0.5	20.0	26.0
III	< 15%	-0.7 < PMV < +0.7	18.0	27.0

Tabelle 5: Behaglichkeitskriterien nach EN 15251 [SIA 07]

Das Auftreten von hohen Raumluftfeuchten im Gebäude wie in Abbildung 11 ersichtlich, ist aufgrund der Systemvoraussetzungen nicht zu verhindern, führt aber zu keinen bauphysikalischen Problemen, da kein Kondensationsanfall an den Raum- Oberflächen zu erwarten ist. Dazu wurde die mittlere Oberflächentemperatur am Fussboden untersucht und festgestellt, dass die relative Raumluftfeuchte

am Fussboden bei aktiviertem passivem Kühlbetrieb stets unter 90%r.F. lag und somit das Kondensationsrisiko am Fussboden (kälteste Oberfläche) als sehr gering zu bewerten ist.

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass mit dem im Gebäude installierten passiven Kühlsystem ein Ansteigen der Raumtemperatur eingegrenzt werden kann. Eine generelle Aussage kann aber aufgrund fehlender Informationen wie Strahlung auf die Fassade und die Bedienung der Storen durch den Nutzer nur bedingt abgeleitet werden.

Nachdem die passive Kühlung aufgrund einer Ferienabwesenheit nicht aktiviert war, wurde das Gebäude ab dem 27. August 2009 wieder mit dem passiven Kühlsystem gekühlt. Die Kühlung war an den ersten beiden Tagen bis auf 2 h durchgehend in Betrieb und konnte 116.3 kWh Wärme aus dem Gebäude abführen. Als Vergleich dazu wurden an den beiden Tagen vor der Ferienabwesenheit nur 73.3 kWh aus dem Einfamilienhaus bei ähnlichen Aussentemperaturen wie an den beiden Tagen direkt nach der Periode ohne Kühlung abgeführt. Nach Aktivierung des Kühlsystems ist das abfallen der Raumlufttemperatur in Tabelle 6 deutlich zu erkennen.

Datum		24.08.	25.08.	26.08.	27.08.	28.08.
Tagesmittelwert der Aussentemperatur	°C	20.1	22.0	21.2	21.5	21.6
Maximale Aussentemperatur (15min. Mittelwert)	°C	28.5	27.5	25.4	27.0	26.6
Minimale Aussentemperatur (15min. Mittelwert)	°C	12.5	17.7	17.8	15.8	16.3
Tagesmittelwert der Innentemperatur	°C	26.9	27.0	26.8	26.2	25.1
Maximale Innentemperatur (15min. Mittelwert)	°C	27.9	27.9	27.3	27.2	25.8
Minimale Innentemperatur (15min. Mittelwert)	°C	25.9	26.5	26.4	25.5	24.4
Kühlung		nicht aktiv			aktiv	

Tabelle 6: Tagesmitteltemperaturen der Aussenluft und im Gebäude mit und ohne Kühlung

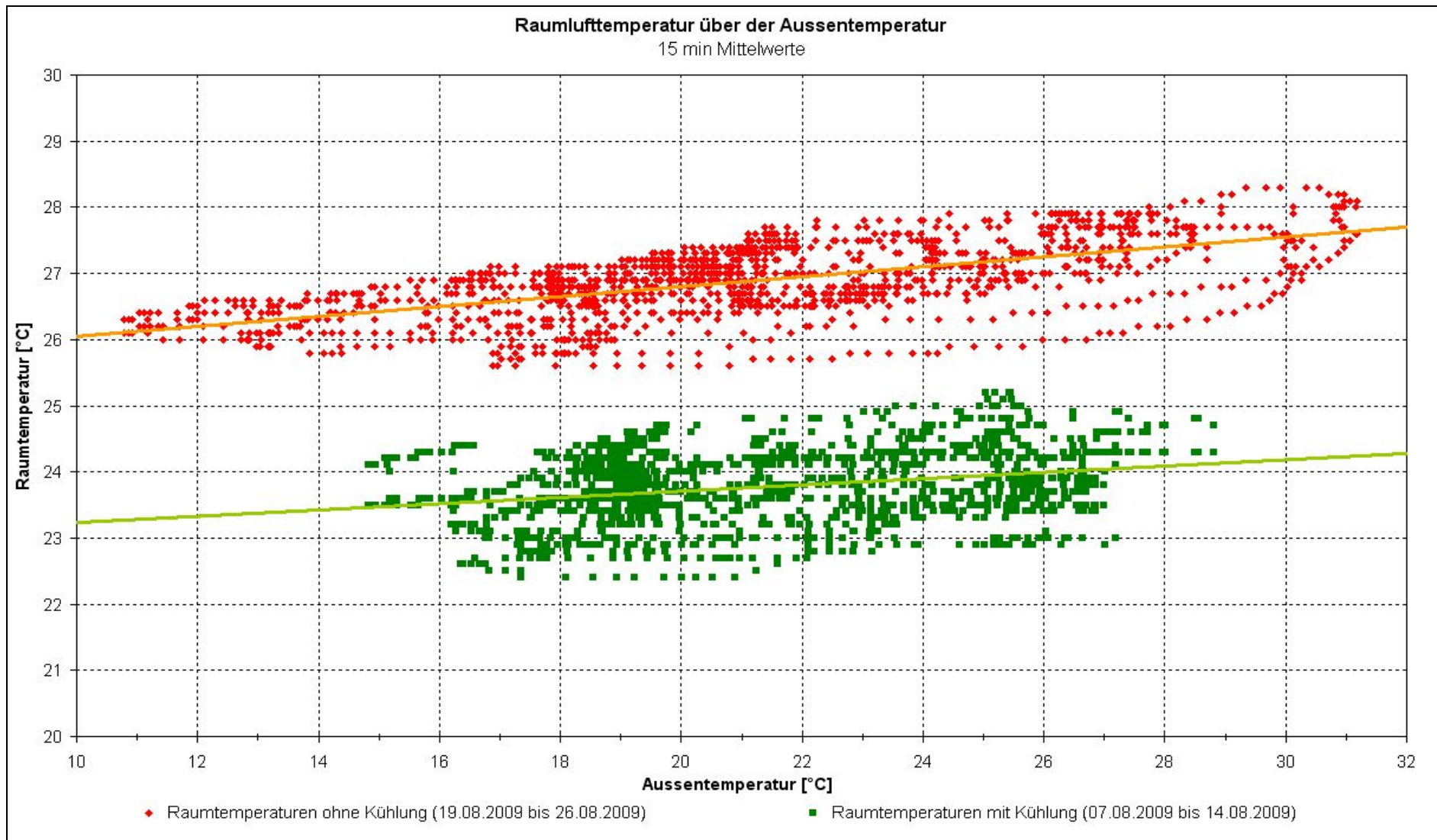


Abbildung 10: Raumtemperatur an zwei achttägigen Perioden über der Aussentemperatur mit und ohne Kühlung. Die mittlere Aussentemperatur ist bei beiden Perioden knapp über 21 °C

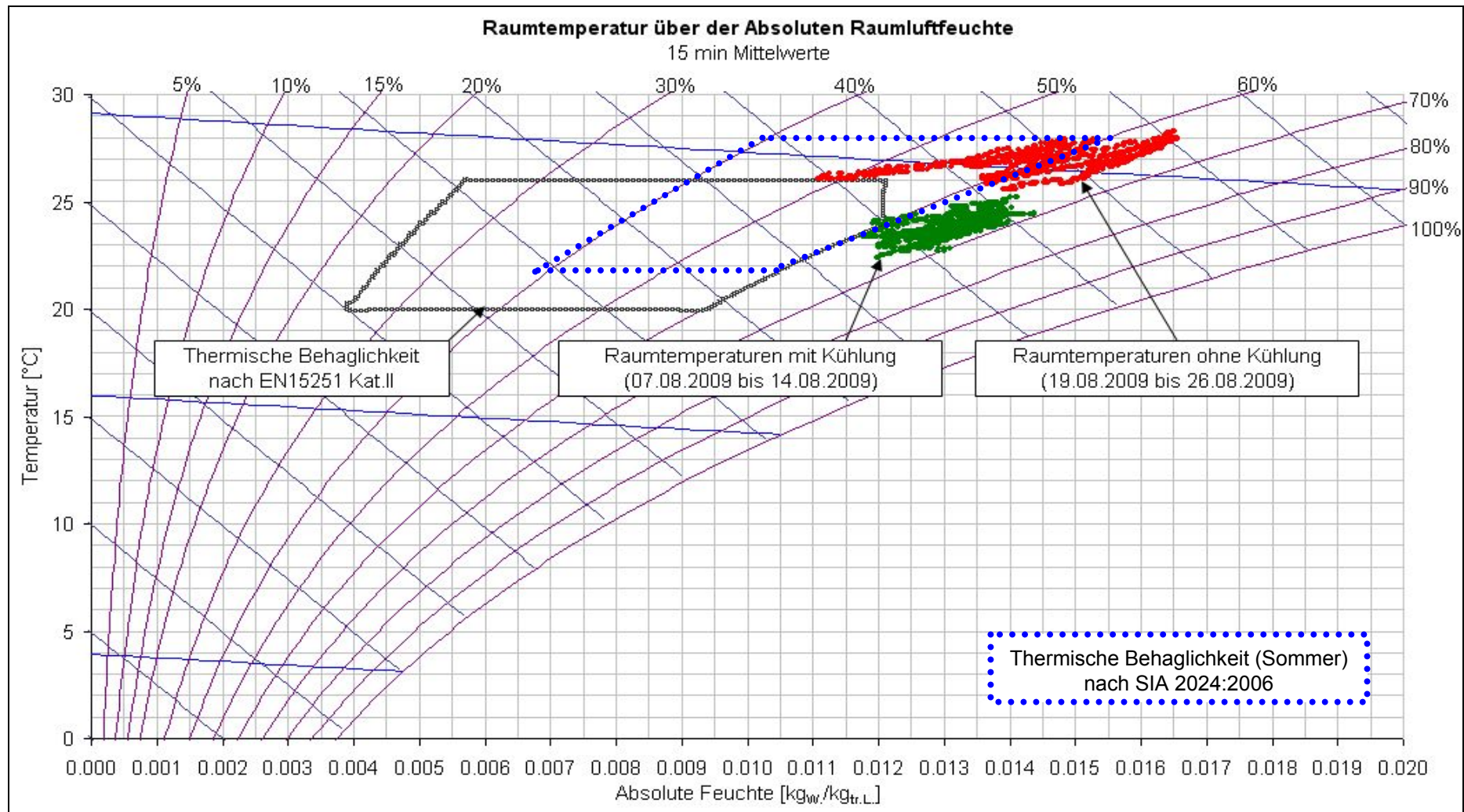


Abbildung 11: Raumtemperatur an zwei achttägigen Perioden über der absoluten Feuchte mit und ohne Kühlung um die Behaglichkeit für die Bewohner zu beurteilen
(da für die therm. Behaglichkeit die operative Temperatur entscheidend ist, wurde angenommen, dass diese etwa der konvektiven Raumlufthtemperatur entspricht)

5 Ergebnisse des Winters 2009/2010

5.1 ZUSAMMENFASSUNG DER ZWEITEN WINTERPERIODE

In der Winterperiode 2009/10 wurden Messdaten minütlich erfasst und in 15minütigen Intervallen aufgezeichnet und die Kennzahlen ermittelt. Die detaillierte Auswertung der Messdaten konnte aufgrund von Problemen bei der Messdatenerfassung nur im Zeitraum vom 01. Oktober 2009 zum 31. März 2010 durchgeführt werden. Allerdings konnte die von der Wärmepumpe erzeugte Wärme für Heizung und Warmwasser des fehlenden Monats anhand der Wärmemengenzähler ermittelt werden. In den kompletten sieben Monaten der Winterperiode (inkl. April) wurden insgesamt 10708 kWh Wärme produziert.

Die durchschnittliche Leistung der Wärmepumpe während der Winterperiode betrug 8.6 kW, wobei temporär eine maximale Leistung der Wärmepumpe von 11.6 kW im Heizbetrieb und 12 kW im Warmwasserbetrieb (Maximalwert der 15 Messwerte) erreicht wurde. Der Wärmeerzeugernutzungsgrad der Heizung lag für den Zeitraum Oktober 2009 bis März 2010 bei 3.8 und für die Warmwassererzeugung bei 2.8, daraus ergibt sich in der Winterperiode ein mittlerer Wärmeerzeugernutzungsgrad für Heizung und Warmwasser von 3.7.

Das Innenraumklima lag innerhalb der Messperiode überwiegend im vorgegebenen Behaglichkeitsbereich. Werte ausserhalb der betrachteten Behaglichkeitsgrenzen lassen sich auf bewusste und teilweise nicht beeinflussbare Ursachen zurückführen.

- Spezifische Heizleistung liegt durchschnittlich bei 30 W/m² (maximal 42 W/m²).
- Der Erdwärmesonde wird etwa 48 W/m Wärme entzogen.

5.2 HEIZLEISTUNG UND ELEKTRISCHE LEISTUNGS-AUFNAHME

Da die Datenerfassung und -übermittlung seit Anfang April 2010 zunehmend Probleme verursachte, zeigte sich eine detaillierte Auswertung im letzten Monat des Messzeitraums als nicht sinnvoll. Anhand der Wärmemengenzähler wurden aber zumindest die produzierten Wärmemengen ermittelt, wo nach 459 kWh für Heizung und 155 kWh für Warmwasser durch die Wärmepumpe produziert wurden.

Die Auswertung der zweiten Winterperiode zeigt, dass 8727 kWh Nutzwärme für die Beheizung des Einfamilienhauses von 01. Oktober 2009 bis 31. März 2010 notwendig waren. Zur Warmwasserbereitung wurden von der Wärmepumpe 1367 kWh Wärme bereitgestellt, von der etwa 72% genutzt wurden. Die für die Raumheizung erzeugte Wärme konnte aufgrund der direkten Anbindung der Wärmepumpe an die Fussbodenheizung ohne Speicher vollständig genutzt werden. Die Wärmeverluste der Rohrleitungen wurden nicht messtechnisch erfasst sind aber aufgrund der niedrigen Heiztemperaturen, der Dämmung und der kurzen Heizungs- Leitungen ausserhalb der thermischen Gebäudehülle als gering zu betrachten. Die Laufzeit der Wärmepumpe betrug insgesamt 1178 h zur Erzeugung von 10094 kWh Wärme.

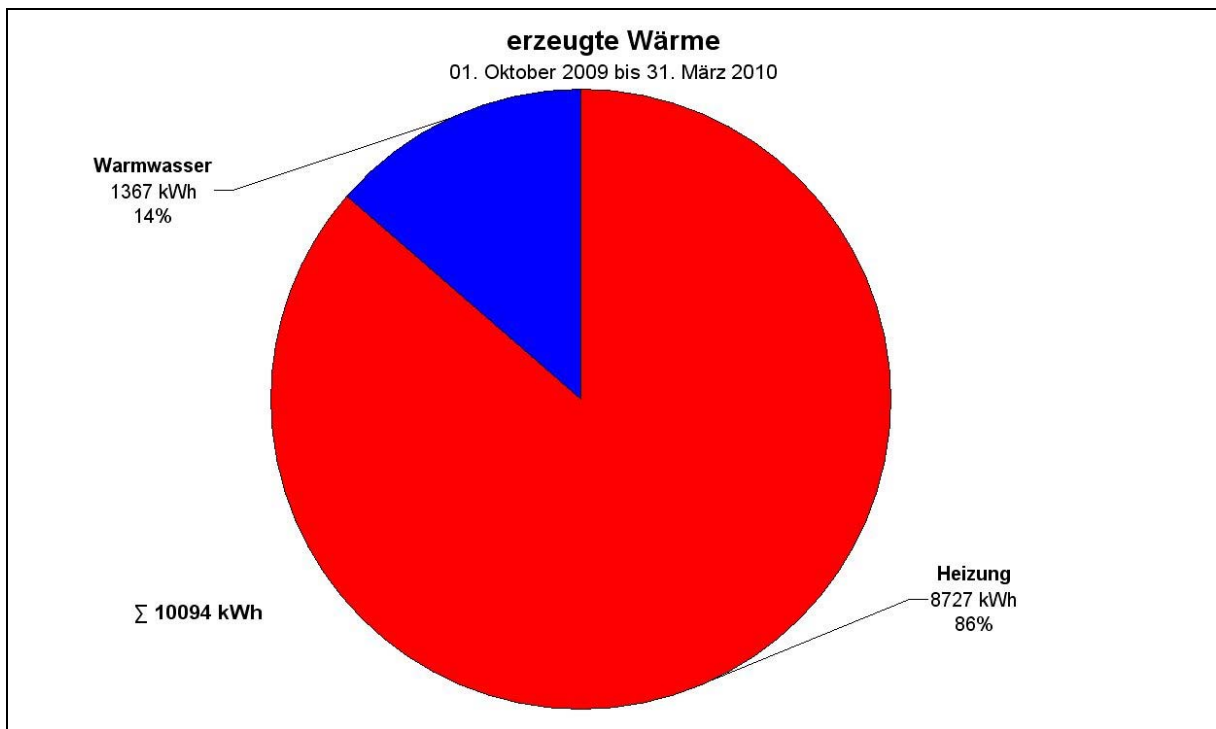


Abbildung 12: Mit dem Wärmepumpensystem produzierte Energie während der Winterperiode 2009/10

Die durchschnittliche Leistung der Wärmepumpe betrug 9.2 kW zur Warmwassererzeugung und 8.5 kW für die Heizung.

Auf den ersten Blick erscheint die um ca. 8% höhere Leistung bei Warmwassererzeugung überraschend, ist doch der Temperaturhub der Wärmepumpe für die Warmwassererzeugung deutlich grösser als im Heizbetrieb. Allerdings ist bei Warmwassererzeugung die elektrische Leistungsaufnahme markant erhöht. Betrachtet man die Wärmeerzeugernutzungsgrade und die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe im Heizungs- und Warmwasserbetrieb, so stellt man fest dass die elektrische Leistungsaufnahme im Warmwasserbetrieb um etwa 55% ansteigt und folglich der Wärmeerzeugernutzungsgrad für Warmwasser um 30% niedriger liegt.

Die Heizleistung des Gebäudes liegt im Mittel über die Winterperiode bei $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$. Die maximale spezifische Heizleistung wurde mit $42 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ im Oktober und November 2009 gemessen (15 Minuten Mittelwert). Der Erdwärmesonde wurde durchschnittlich eine Leistung von 48 W/m entzogen, die maximale Entzugsleistung lag bei 69 W/m .

Während der Wintermonate Oktober 2009 bis März 2010 konnte ein durchschnittlicher Wärmeerzeugernutzungsgrad von 3.8 für Heizung und 2.8 für Warmwasser erreicht werden. Die einzelnen Monatswerte sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Der Systemnutzungsgrad für Heizung und Warmwasser von 3.5 ergibt sich aus den insgesamt ausgewerteten Monaten Mai 2009 bis März 2010. Diese Kennzahl erhöht sich auf 3.7, wird in den Systemnutzungsgrad die Kühlung mit einbezogen.

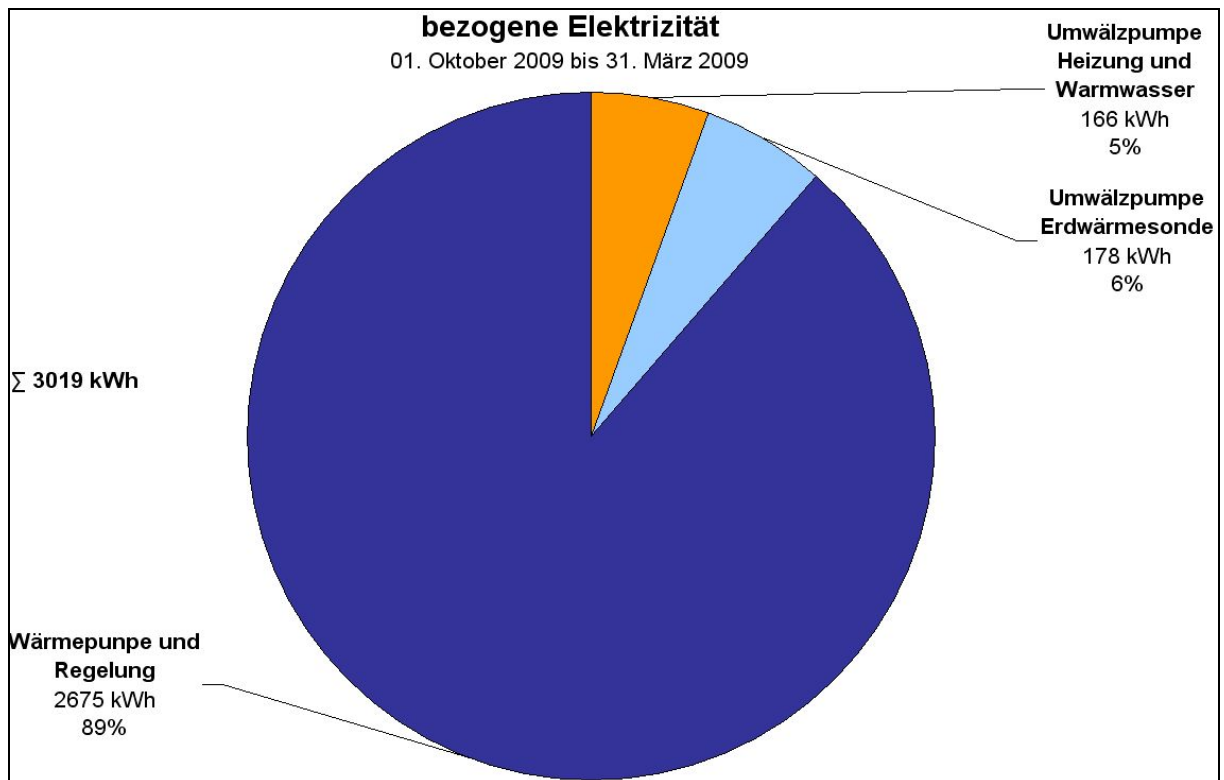


Abbildung 13: Vom Wärmepumpensystem bezogene Elektrizität während der Winterperiode 2009/10

	Oktober '09	November '09	Dezember '09	Januar '10	Februar '10	März '10
WNG_H	3.03	4.17	3.87	3.76	3.73	3.80
WNG_W	2.65	2.86	2.89	2.73	2.74	2.79

Tabelle 7: Monatswerte des Wärmeerzeugernutzungsgrad für Heizung und Warmwasser

	Oktober '09	November '09	Dezember '09	Januar '10	Februar '10	März '10
Q_H	588 kWh	1098 kWh	1829 kWh	2085 kWh	1686 kWh	1441 kWh
Q_W	182 kWh	185 kWh	237 kWh	259 kWh	256 kWh	248 kWh

Tabelle 8: Monatswerte der produzierten Wärme in kWh für Heizung und Warmwasser

	Oktober '09	November '09	Dezember '09	Januar '10	Februar '10	März '10
$\Theta_{bhx,out}$	16.6 °C	12.7 °C	9.3 °C	7.5 °C	7.5 °C	9.1 °C
$\Theta_{bhx,in}$	16.3 °C	11.7 °C	8.2 °C	6.4 °C	6.3 °C	7.9 °C
ΔT	- 0.3 K	- 1.0 K	- 0.9 K	- 1.1 K	- 1.2 K	- 1.2 K

Tabelle 9: Monatsmittelwerte der Soleaustrittstemperatur und der Soleeintrittstemperatur bei Betrieb der Wärmepumpe oder der passiven Kühlung

In Tabelle 8 sind die Monatswerte der produzierten Wärme aufgelistet. In Tabelle 9 sind die Soletemperaturen aufgelistet. Ein direkter Zusammenhang zwischen Soleaustrittstemperatur und

Wärmeerzeugernutzungsgrad, lässt sich aus dieser Auflistung nicht ableiten. Allerdings ist die Aussage aufgrund der Monatsmittelwerte generell nur sehr bedingt aussagekräftig. Es ist jedoch sehr deutlich zu erkennen, dass die in den Sommermonaten eingespeiste Wärme kaum im Winter zurück gewonnen werden kann. Bereits im November liegt die Soleaustrittstemperatur mit 0.8 K deutlich unter der Soleaustrittstemperatur zu Beginn der vorgängigen Sommerperiode, und damit über 2 K unter der mittleren Sondastrittstemperatur des Sommers.

5.3 HEIZKURVE UND ENERGIESIGNATUR DER WÄRMEPUMPE

Die Abschätzung der tatsächlichen Heizlast des Gebäudes in Abbildung 4 aus der ersten Heizperiode hat sich bestätigt, wie der Vergleich der Messwerte in Abbildung 14 zeigt. Mittels der programmierbaren Zeitschaltuhr wurde die Wärmepumpe tagsüber für 14 h von Montag bis Freitag und 12 h am Wochenende komplett ausgeschaltet. Durch die deutliche Überdimensionierung der Wärmepumpe ist die vom Nutzer gewählte Betriebsart nahezu ganzjährig ohne Komforteinbusse möglich und somit die Nutzung des günstigeren Stromtarifes (Nachtstrom). Lediglich ab einer Aussentemperatur unter -5°C ist die Deckung der Wärmeverluste nicht mehr vollständig gewährleistet. Anhand der Klimadaten (nach SIA 2028) ist wird diese Aussentemperatur in St. Gallen gerade einmal 271 h/a unterschritten respektive liegt im Tagesmittel (24h) an 9 Tagen/a unter dieser Temperatur. Unter Berücksichtigung der guten Gebäudehülle und der hohen Gebäudehülle ist daher in einem durchschnittlichen Winter nur ein sehr geringer Einfluss auf die Rauminnentemperaturen zu erwarten. Dies scheint sich anhand der Messungen vom 02./03. Januar 2010 zu bestätigen. An diesen beiden Tagen lag die Tagesmitteltemperatur (24h) bei -5.5°C am Folgetag bei -3.5°C . Die durchschnittliche Rauminnentemperatur lag bei etwa 21°C , ein Absinken der Raumtemperatur konnte an diesen Tagen nicht festgestellt werden.

Am 27. März 2009 wurden die Standardeinstellungen des Reglers angepasst und die Heizkurve, wie in Abbildung 5 eingestellt. Jedoch ist in Abbildung 15 eindeutig festzustellen, dass das tatsächliche Betriebsverhalten der Wärmepumpe Differenzen zur eingestellten Reglerkennlinie aufweist.

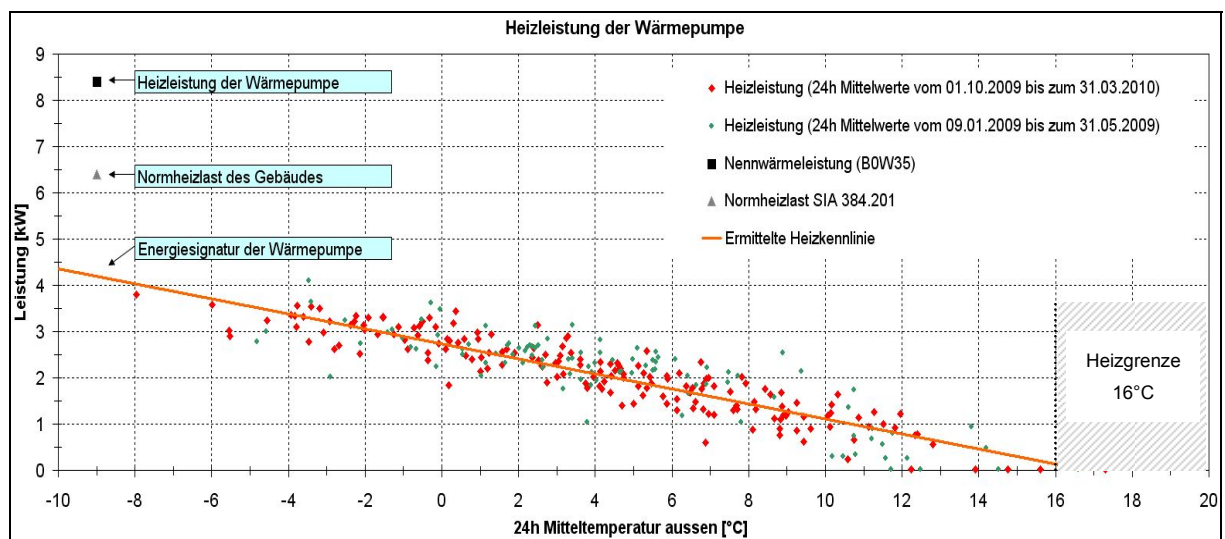


Abbildung 14: Mittlere Heizleistung über dem Tagesmittelwert der Aussentemperatur zur Abschätzung der tatsächlichen Heizlast des Gebäudes sowie der Heizgrenze

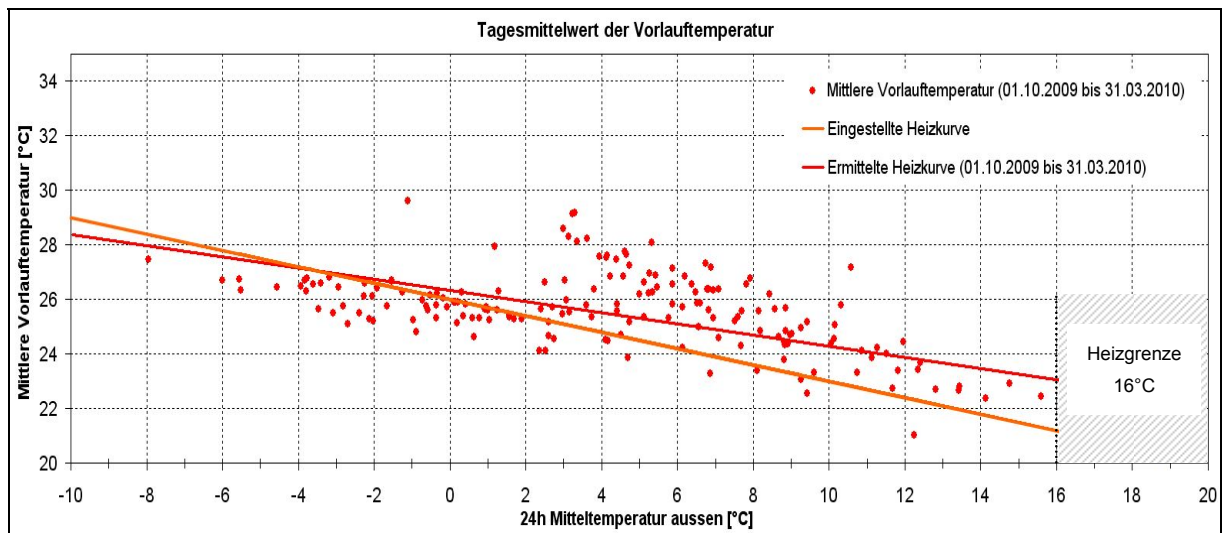


Abbildung 15: Mittlere Vorlauftemperatur über der mittleren Aussentemperatur und die im Regler der Wärmepumpe eingestellte Heizkurve in der Winterperiode 2009/10

Während des Betriebs der Wärmepumpe liegt die Vorlauftemperatur im Mittel etwa bei 30 °C bei einer Spreizung von 5K. Die Warmwassertemperatur liegt oben im Speicher zwischen 45 °C und 53 °C. Zur Warmwasser- Bereitung ist eine mittlere Vorlauftemperatur von ca. 48°C bei einer Spreizung von 10 K notwendig.

5.4 THERMISCHE BEHAGLICHKEIT

Zur Steigerung der thermischen Behaglichkeit wurde im Dezember 2009 ein Schwedenofen im Wohnbereich des Einfamilienhauses installiert. Der Ofen wurde in diesem Zeitraum gelegentlich in Betrieb genommen und dabei ca. 0.1 Ster (3 Harassen) Brennholz verbraucht. Die in die Zusatzheizung eingebrachte Holzmenge von ca. 60 kg beinhalten etwa 250 kWh. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des installierten Schwedenofens kann angenommen werden, dass den Wohnräumen ca. 190 kWh und damit nur etwa 2% der durch die Wärmepumpe erzeugten Wärme zusätzlich zugeführt wurde.

In der Winterperiode ist ebenfalls wie in der Sommerperiode ein geringer Einfluss der Innentemperatur über der Aussentemperatur zu erkennen. Bei einer Aussentemperatur von -5°C liegt die mittlere Rauminnentemperatur etwa bei 20.5 °C. Bei einer Aussentemperatur von 15 °C steigt die mittlere Innentemperatur im Gebäude auf 21.5°C an. Abbildung 16 zeigt die Temperatur und Feuchte im Gebäudeinneren um die Behaglichkeit für die Bewohner abschätzen zu können. Für die Bewertung der Innentemperatur wurde der Mittelwert der beiden Messstellen gebildet. In der Abbildung 16 ist ein deutliches Unterschreiten des Behaglichkeitsbereichs [SIA 06] festzustellen, allerdings kann anhand dieses eindeutigen Ergebnisses nicht auf eine Behaglichkeitseinbusse geschlossen werden.

Raumtemperatur	EG	OG
$\Theta_a < 20^\circ\text{C}$	0.0%	18.2%
$20^\circ\text{C} \leq \Theta_a \leq 24^\circ\text{C}$	100.0%	81.8%
$\Theta_a > 24^\circ\text{C}$	0.0%	0.0%

Tabelle 10: Häufigkeitsverteilung der Raumtemperatur in der Winterperiode 2009/10

rel. Raumluftfeuchte	EG	OG
$\varphi_a < 30\%\text{r.F.}$	0.0%	0.0%
$30\%\text{r.F.} \leq \varphi_a \leq 50\%\text{r.F.}$	81.2%	50.2%
$\varphi_a > 50\%\text{r.F.}$	18.8%	49.8%

Tabelle 11: Häufigkeitsverteilung der relativen Raumluftfeuchten in der Winterperiode 2009/10

Um die Behaglichkeit besser beurteilen zu können wurde die Häufigkeitsverteilung von Temperatur und relativer Raumluftfeuchte näher betrachtet.

Während die Raumlufttemperatur im Erdgeschoss während der kompletten Winterperiode im Bereich von 20 °C und 24 °C und somit innerhalb des Behaglichkeitsbereichs liegt, liegen die Temperaturen im Obergeschoss durchschnittlich etwa 1.5 K unter dieser Temperatur. In Tabelle 10 ist ersichtlich, dass im Obergeschoss vom 01. Oktober 2009 bis 31. März 2010 die Temperatur etwa 18% der Zeit unterhalb von 20°C lag. Die Minimaltemperatur lag in diesem Zeitraum bei 18.5 °C. Wie bereits bei den Behaglichkeitsbetrachtungen der ersten Winterperiode festgestellt wurde, lässt sich das Unterschreiten der unteren Temperaturgrenze des Behaglichkeitsbereiches damit zu erklären, dass sich der Schlafbereich des Hauses im Obergeschoss befindet, wogegen der Wohnbereich im Erdgeschoss angeordnet ist. Aufgrund dieser Tatsache lässt sich anhand der Messdaten auch nicht auf eine Behaglichkeitseinbusse schließen, sondern auf das bewusste drosseln der Heizung zur Absenkung der Raumtemperatur (es ist keine Raumtemperaturregelung installiert) im Schlafbereich.

Die relativ hohen Raumluftfeuchten während der Winterperiode lassen sich auf zwei Ursachen zurückführen. Zum einen ist die relative Luftfeuchtigkeit durch die niedrige Raumlufttemperatur im Obergeschoss tendenziell höher als Erdgeschoss. Ist die Raumluft im Erdgeschoss beispielsweise 20°C bei einer Luftfeuchtigkeit von 50%r.F., so ist die relative Raumluftfeuchte aufgrund der 1.5 K Raumlufttemperatur bei gleicher absoluter Feuchte im Obergeschoss um etwa 5%r.F. höher.

Die bedeutendere Erklärung für die erhöhten Raumluftfeuchten ist der Betrieb der Lüftung. Tendenziell sollte bei Betrieb der installierten Wohnungslüftung (ohne Feuchte- Rückgewinnung) die Raumluftfeuchte im Winter eher im unteren Bereich des Behaglichkeitsbereiches liegen. Da die Raumluftfeuchten des Behaglichkeitsbereichs jedoch nicht unterschritten respektive sogar teilweise überschritten werden, lässt sich durch die vom Nutzer gewählten Einstellungen der Wohnungslüftung erklären. Die Lüftungsanlage ist nur während der Nacht für wenige Stunden in Betrieb und unterscheidet sich kaum von den in der ersten Winterperiode gewählten Einstellung, die in Abbildung 6 ersichtlich ist. Dadurch wird der über 24 h gemittelte Luftwechsel durch die Komfortlüftung auf 0.04 h^{-1} reduziert und liegt somit deutlich unter dem empfohlenen minimalen Aussenluftwechsel. Durch den stark reduzierten Luftwechsel der Lüftungsanlage ist der Feuchte- Abtransport durch die Lüftungsanlage ebenfalls stark reduziert, wodurch die erhöhten Raumluftfeuchten zu erklären sind. Durch die erhöhten Raumluftfeuchten ist während weniger Stunden mit Kondensatbildung an den Glasabstandshaltern der Fenster bzw. an anderen Wärmebrücken zu rechnen.

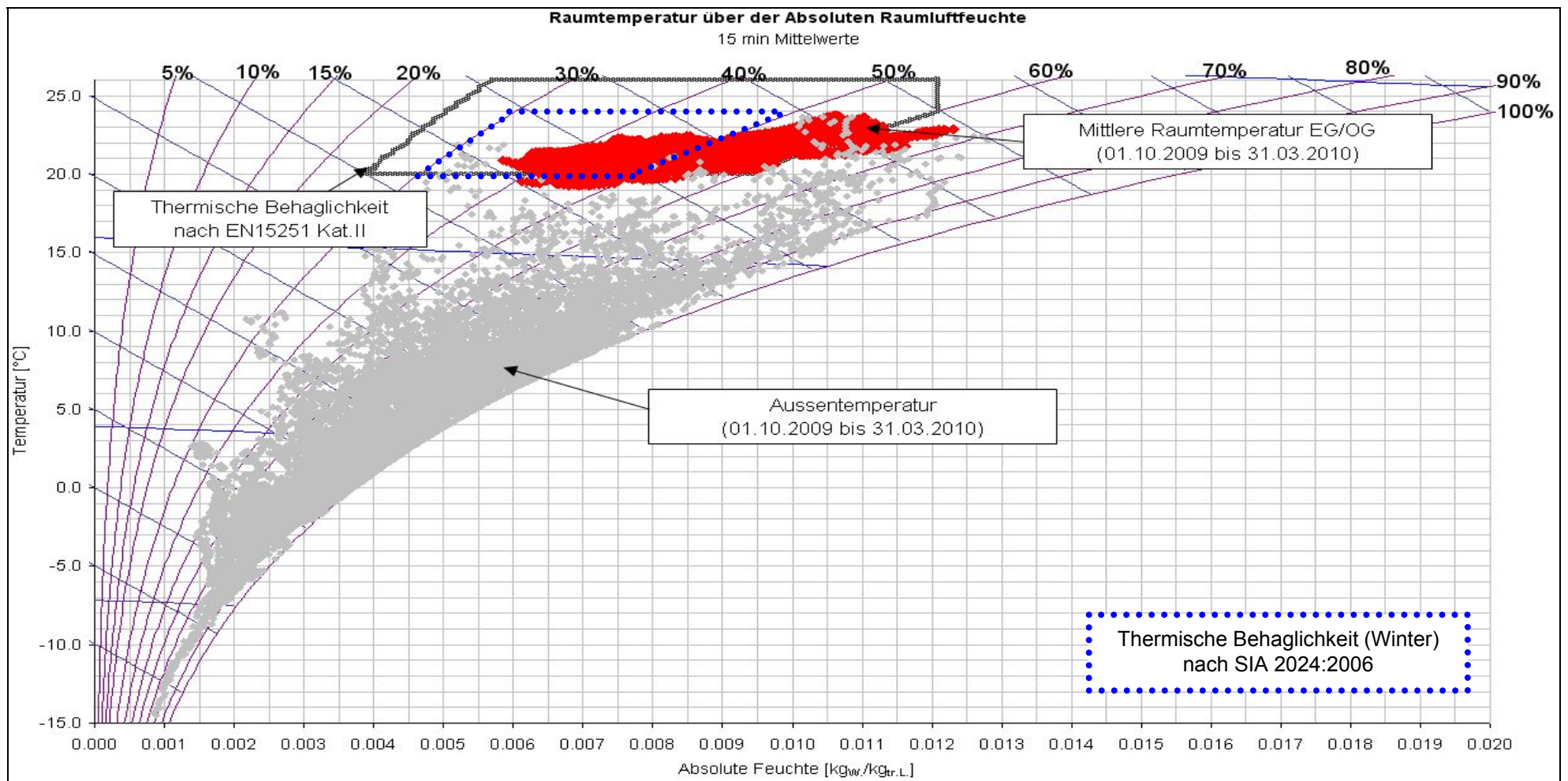


Abbildung 16: Mittlere Raumtemperatur (rot) und Aussentemperatur (grau) über der absoluten Feuchte zur Beurteilung der Behaglichkeit in der Winterperiode 2009/10
(da für die therm. Behaglichkeit die operative Temperatur entscheidend ist, wurde angenommen, dass diese etwa der konvektiven Raumlufftemperatur entspricht)

6 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieses Projektes wird das Praxisverhalten von erdgekoppelten Wärmepumpen mit passiver Kühlung messtechnisch untersucht. Die Messungen werden im Zeitraum von Januar 2009 bis April 2010 durchgeführt. Anhand der Messdaten aus der Winterperiode 2009 konnte die Anlage optimiert werden. Die Auswertungen beginnen mit der Sommerperiode 2009 und wurden bis zum Frühling 2010 verlängert um eine ausreichende Datengrundlage zur Auswertung des Winters zur Verfügung zu haben.

Bei der Auslegung des Wärmeerzeugers werden häufig zusätzliche Sicherheitszuschläge gemacht, die einem effizienten und wirtschaftlichen Betrieb der Heizungsanlage teilweise entgegenstehen. In das im Rahmen dieses Messprojektes untersuchte Gebäude, wurde eine Wärmepumpe eingebaut, die im Bezug auf die Normheizlast nach SIA 384.201 [SIA 03] um 30 % überdimensioniert ist. Die nächst kleinere Wärmepumpe dieser Baureihe wäre allerdings um 5 % unterdimensioniert, obwohl die notwendige Zusatzleistung zur Brauchwassererzeugung und für Sperrzeiten noch nicht berücksichtigt wurde. Damit ist die Wahl des Wärmeerzeugers eindeutig korrekt und entspricht der Vorgabe nach den kantonalen Energievorschriften [MuKE 08]. Die Mustervorschriften der Kantone verbieten für die Raumheizung eine elektrische Zusatzheizung, somit muss der Wärmeerzeuger 100 % des Leistungsbedarfs abdecken können. Die Berechnung der Norm- Heizlast nach SIA 384.201 (SN EN 12831) [SIA 03] zur Bestimmung der Wärmeerzeugerleistung beinhaltet allerdings eine Sicherheitsreserve, da bei der verwendeten Berechnungsmethodik solare Gewinne nicht berücksichtigt werden. Dieser Aspekt, der durch die Norm- Berechnung zwangsläufig beinhaltenden Leistungsreserve, dürfte vor allem bei gut gedämmten Gebäuden mit hohen solaren Gewinnen deutlich zu tragen kommen. Dies scheint sich auch anhand der Messdaten der beiden ausgewerteten Winterperioden zu bestätigen. Die tatsächliche Heizlast des Gebäudes liegt bei etwa 4.5 kW und damit um 30 % unter der mittels Norm- Berechnung bestimmten Heizlast. Die Auswahl der nächst kleineren Wärmepumpe dieser Baureihe zur Beheizung des Gebäudes würde die kantonalen Energievorschriften verletzen, wäre aber ausreichend gross dimensioniert. Eine elektrische Zusatzheizung ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht erforderlich, da aufgrund der Messdaten gezeigt werden konnte, dass bereits die kleinere Wärmepumpe um 38 % überdimensioniert wäre. Bei Betrieb der Lüftungsanlage gemäss Auslegung erhöhen sich die Lüftungswärmeverluste und somit die Heizlast um lediglich 3%, so dass diese Ergebnisse durch den effektiven Betrieb der Lüftung nur geringfügig beeinflusst wird. Da die Mustervorschriften der Kantonalen Energiefachstellen zwangsläufig den bivalenten Betrieb von Wärmepumpen und elektrischer Zusatzheizung verbieten, sind keine weitere Diskussionen zur energetisch und wirtschaftlich Optimierung bezüglich der zu installierender Wärmeerzeugerleistung notwendig. Der wirtschaftliche Aspekt kommt vor allem bei Luft/Wasser Wärmepumpen zu tragen, die durch diese Vorgaben massiv überdimensioniert werden müssen und somit weitgehend in extremer Teillast betrieben werden.

Das installierte passive Kühlsystem erweist sich als sehr effizientes System zur Wärmeabfuhr aus dem Gebäude. Mit dem Kühlsystem konnte das Absenken der Innentemperatur um 3 K erreicht werden. Das passive Kühlsystem hat im Mittel während der Sommerperiode 2009 ein Wärmeerzeugernutzungsgrad von 7 erreicht und damit wird nur etwa 14 % elektrische Energie im Bezug auf die abgeführte Wärme benötigt. Die durchschnittlich abgeführte Wärme ist mit 1.6 kW sehr gering. Dies entspricht nur etwa $6 \text{ W/m}^2 \text{ EBF}$ und lässt sich dadurch begründen, dass die Kühlung sehr lang in Betrieb ist, auch wenn nahezu keine Wärme abgeführt wird. Ein Verändern des Regelverhaltens und das Abschalten der Kühlung, sobald die Temperaturdifferenz zwischen Fussboden Vor- und Rücklauf einen bestimmten Wert unterschreitet, könnte die Wärmeerzeugernutzungszahl für die Kühlung eventuell deutlich verbessern. Um den Kühlbedarf festzustellen wäre bei abgeschalteter Kühlung aufgrund einer zu geringen Temperaturdifferenz ein periodisches Einschalten der Umwälzpumpe erforderlich um den Kühlbedarf des Gebäudes anhand der aktuellen Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf regelungstechnisch zu erfassen. Mit dem passiven Kühlsystem konnte eine maximale spezifische Leistung von $23 \text{ W/m}^2 \text{ EBF}$ innerhalb der Sommerperiode 2009 gemessen werden. Der für die Kühlung notwendige Energieaufwand kann teilweise durch den direkten und indirekten Nutzen der abgeführten Wärme zur Warmwasserbereitung durch die Wärmepumpe kompensiert werden. Eine quantitative Aussage ist aufgrund der vorhandenen Messwerte allerdings kaum möglich. Als direkter Nutzen konnte aufgezeigt werden, dass in Phasen gleichzeitiger Warmwassererzeugung und Kühlung die Soletemperatur am Wärmepumpeneintritt um etwa 1 K gegenüber dem Erdwärmesondenaustritt erhöht werden konnte.

Dies zeigt, dass durch eine geeignete Hydraulik, welche einen Parallelbetrieb zwischen Wärmepumpe zur Warmwassererzeugung und passiver Kühlung zulässt eine Effizienzsteigerung der Wärmepumpe ermöglicht wird. Erfahrungsgemäss steigt die Heizleistung der Wärmepumpe um etwa 3 % pro 1 K höherer Quelltemperatur. Ausserdem verändert sich der Elektrizitätsbedarf für die Umwälzpumpe im Solekreislauf kaum ob nur die Wärmepumpe oder parallel die passive Kühlung in Betrieb ist. Der indirekte Nutzen der passiven Kühlung lässt sich deutlich an der Erhöhung der Soleaustrittstemperatur während des Sommers feststellen. Gegenüber der Soleaustrittstemperatur im Mai 2009 lag die Austrittstemperatur aus der Erdwärmesonde im August 2009 um etwa 2 K höher, dies hat ebenfalls eine Erhöhung der Heizleistung sowie des Wärmeerzeugernutzungsgrades zur Folge.

Die Behaglichkeit konnte durch die passive Kühlung im Sommer nachweislich gesteigert werden. Der voraussichtliche Anteil unzufriedener Personen aufgrund der thermischen Behaglichkeit konnte bei aktivierter Kühlung um 11 % reduziert werden und liegt somit nur noch bei 6 %. Die Anforderungen nach SN EN 15251 Kategorie II [SIA 07] können somit eingehalten werden. Allerdings kann die maximale Feuchte von 60 %r.F. im Sommer nicht eingehalten werden, da die Raumlufffeuchte mit dem vorhandenen System nicht reguliert werden kann. Der unverhältnismässig hohe Energieaufwand für eine Feuchte- Regulierung rechtfertigt jedoch die Tolerierung höherer Raumlufffeuchten, wobei gezeigt werden konnte dass keine Kondensation am gekühlten Fussboden auftritt. Die relative Feuchte an der Fussbodenoberfläche hat während der Sommerperiode 2009 nie den Wert von 90 %r.F. überschritten. Die mittlere Temperatur zwischen Vorlauf und Rücklauf lag im Minimum bei 17 °C, daraus könnte eine Behaglichkeitseinbusse durch einen kalten Fussboden im Sommer abgeleitet werden, dies wurde aber durch die Bewohner des Gebäudes auf Anfrage über das Behaglichkeitsempfinden nicht erwähnt. Ferner wurden die Innentemperaturen als sehr angenehm bezeichnet. Die Behaglichkeit im Winter wird vor allem durch die installierte Komfortlüftung beeinflusst.

Bei einer Komfortlüftung ohne Feuchterückgewinnung kann das Unterschreiten der minimalen Feuchte von 25 %r.F. im Winter zum Thema werden. Es konnte allerdings gezeigt werden, dass die Feuchteuntergrenze in dem messtechnisch begleiteten Gebäude kein Thema ist. Diese Tatsache ist vor allem durch die Einstellungen des Nutzers zu begründen, der den mittleren Luftwechsel im Winter 2009 bis deutlich unter dem empfohlenen Luftwechsel reduziert hat. Eine suboptimale Installation der Komfortlüftung führt ausserdem zu sehr kalten Zuluft- Temperaturen, die im Februar bei etwa 13 °C lagen. Würden Wärmeverluste in der Anlage konsequent vermieden, wären Zuluft- Temperaturen möglich, die fast um 4 K höher liegen. Durch eine gezielte Anordnung der Zuluft- Auslässe im Gebäude wäre eine Beeinträchtigung der Behaglichkeit trotz der sehr tiefen Zuluft- Temperaturen zu verhindern, ob dies in diesem Gebäude durch Anordnung der Zuluft- Auslässe im Boden vor den Fenstern berücksichtigt wurde, ist allerdings zu bezweifeln.

Das installierte Heizsystem ist in sofern unproblematisch, als dass die notwendige Heizleistung durch den überdimensionierten Wärmeerzeuger ohne weiteres abgedeckt werden kann. Der Strahlungsausgleich von kalten Oberflächen ist in gut gedämmten Gebäuden, bei denen die Temperaturdifferenzen zwischen den Oberflächen sehr gering sind und die Temperatur der äusseren Oberflächen nur knapp unter der Raumlufftemperatur liegt kaum ein Thema. Personen erwarten allerdings häufig warme Flächen, wie dies aus in Altbauten installierten Heizsystemen bekannt ist. Von den Bewohnern dieses Gebäudes wurde schon der Wunsch nach "fühlbarer Wärme" geäussert. Aufgrund der niedrigen Heizlast bei Neubauten und den Mustervorschriften [MuKE 08] fühlen sich Fussböden trotz Fussbodenheizung nicht warm d.h. die Oberflächentemperatur des Fussbodens liegt unter der Körpertemperatur des Menschen. Wärmephysiologisch wird ein Fussboden von einer Mehrheit als behaglich (Barfuss) empfunden, wenn dessen Oberflächentemperatur bei Holz-, Kork-, Linoleum- oder PVC- Bodenbelägen zwischen 23°C...29°C liegt. Sinkt die Temperatur unter diesen Bereich ab beziehungsweise steigt über diesen Bereich an, so nimmt die Zahl unzufriedener Personen sehr stark zu. Aus diesem Grund wurde die maximale Fussbodentemperatur in der Norm SN EN 1264 [SIA 97] auf 29°C für Wohnräume und auf 33°C für Bäder begrenzt. Diese Temperatur darf nur in Randzonen überschritten werden. Das Bedürfnis der Personen nach "fühlbarer Wärme" wird bei den Behaglichkeitsbetrachtungen anscheinend nicht hinreichend berücksichtigt oder ist bereits im minimalen Anteil von 5 % Unzufriedener berücksichtigt. Um die Effizienz der Wärmepumpe zu steigern ist eine möglichst niedrige Vorlauftemperatur sinnvoll, ob es sich aber immer an dem Empfinden der Bewohner orientiert, ist fraglich und kann dazu führen das die Ausnahmeregelung der Vollzugshilfe zu den Mustervorschriften der kantonalen Energiefachstellen [MuKE 08] betreffend

Verwendung von ortsfesten elektrischen Widerstandsheizungen zur Behaglichkeitssteigerung rege genutzt wird.

	WNG_H / SNG_H	WNG_W / SNG_W	WNG_C / SNG_C	WNG_{HWC} / SNG_{HWC}
Sommer 2009	-	3.6 / 3.4	7.3 / 7.1	5.1 / 4.9
Winter 2009/10	3.8 / 3.7	2.8 / 2.7	-	3.7 / 3.5
Jahr	3.8 / 3.7	3.0 / 2.9	7.3 / 7.1	3.8 / 3.7

Tabelle 12: Saisonale Gütekennzahlen (Wärmeerzeugernutzungsgrad / Systemnutzungsgrad) während der gesamten Messperiode vom 01. Mai 2009 bis zum 31. März 2010

Die ermittelte Wärmeerzeugernutzungsanzahl für Heizung und Warmwasser für die Sommerperiode 2009 und die folgende Winterperiode entspricht mit 3.6 bis auf eine Differenz von 8% der mittels des Berechnungsprogramms WPesti ermittelten kombinierten Jahresarbeitszahl für Heizung und Warmwasser. Somit erweist sich dieses Berechnungstool unter Berücksichtigung der Toleranzen als sehr gut geeignetes Tool für eine Abschätzung der zu erwartenden Gütekennzahl von Wärmepumpenanlagen. Dies wurde ebenfalls in der Projektarbeit "Vergleich der wichtigsten Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen" [Har 09] im Auftrag des Energieinstituts Vorarlberg für die österreichische Version des Berechnungsprogramms (JAZcalc) bestätigt. Jedoch zeigen sich sehr deutliche Differenzen bei Betrachtung der getrennten Gütekennzahlen für Heizung und Warmwasser. Die Jahresarbeitszahl für Heizung wäre gemäss Berechnungsprogramm WPesti deutlich höher als die anhand der Messwerte ermittelte Gütekennzahl der installierten Wärmepumpe, allerdings wird diese Abweichung durch eine deutlich tiefere Jahresarbeitszahl für Warmwasser kompensiert.

7 Symbolverzeichnis

7.1 VARIABLEN

JAZ	-	Jahresarbeitszahl
WNG	-	Wärmeerzeugernutzungsgrad
SNG	-	Systemnutzungsgrad
E	kWh	Elektrische Energie
Θ	°C	Temperatur
Q	kWh	Thermische Energie
t	-	Status 0/1
V	m³/h	Volumenstrom
v	m/s	Geschwindigkeit
φ	%r.H.	relative Luftfeuchtigkeit

7.2 INDIZES

a	Luft
bhx	Erdwärmesonde
bm	Kellergeschoss
C	Betrieb Raumkühlung
em	Abgabesystem
gf	Erdgeschoss
H	Betrieb Raumheizung
HC	Betrieb Raumheizung und -kühlung
hp	Wärmepumpe
HW	Betrieb Raumheizung und Trinkwarmwasser
HWC	Betrieb Raumheizung, -kühlung und Trinkwarmwasser
in	Eintritt
oa	Aussenluft
out	Austritt
pmp	Umwälzpumpe
ra	Abluft
sa	Zuluft
src	Quelle
sk	Senke
top	oben
uf	Obergeschoss
V	Lüftung
W	Warmwassersystem
rc	Kältemittel- Verdichter
i	Raumluft

8 Literaturverzeichnis

- [Drexel 00] Drexel, Christof: **Komfortlüftung und Wärmeversorgung**. Wien: WEKA Verlag, HLK - Heizung Lüftung Klimatechnik, 10-2000, Seite 6-7.
- [Har 09] Stefan Hartmann: **Vergleich der wichtigsten Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl (JAZ) von Wärmepumpen**. Dornbirn: Energieinstitut Vorarlberg, 12-2009.
- [MuKE 08] MuKE 2008: **Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich**. Chur: Konferenz Kantonalen Energiedirektoren, 04-2008.
- [SIA 97] SN EN 1264-3:1997: **Fussbodenheizung Systeme und Komponenten - Teil 3: Auslegung**. Zürich: SIA, 1997.
- [SIA 03] SIA 382.201:2003: **Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm- Heizlast** (SN EN 1283). Zürich: SIA, 12-2003.
- [SIA 06] SIA 2024:2006: **Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik**. Zürich: SIA, 08-2006.
- [SIA 07] SIA 382.706:2007: **Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik** (SN EN 15251). Zürich: SIA, 05-2007.
- [SIA 07a] SIA 382-1:2007: **Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen**. Zürich: SIA, 03-2007.
- [SIA 07b] SIA 380-1:2007: **Thermische Energie im Hochbau**. Zürich: SIA, 04-2006.
- [SIA 08] SIA 2023:2008: **Lüftung in Wohnbauten**. Zürich: SIA, 03-2008.

9 Anhang

9.1 MESSSTELLENSCHEMA

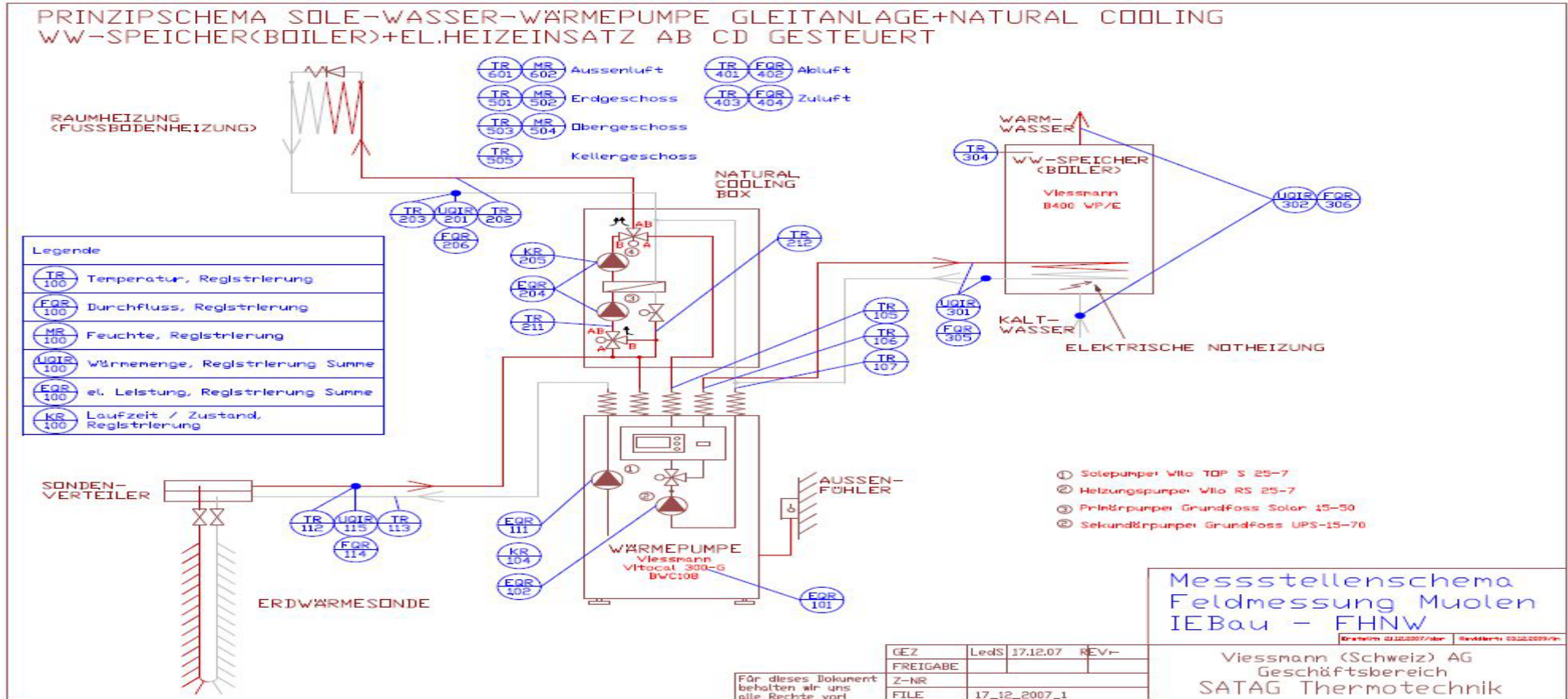


Abbildung 17: Messstellenschema der Pilotanlage Muolen

9.2 MESSSTELLENVERZEICHNIS

Pos.	Messgrösse	Einheit	Variable	Messgerät Messprinzip
1xx	Wärmepumpe & -quelle			
101	Elektrischer Energiebezug der gesamten Wärmepumpe	kWh	$E_{HWC, hp}$	elektr. Energiezähler EMU 32.x4 1000 Imp. / kWh
102	Elektrischer Energiebezug der Umwälzpumpe (Heiz- und Warmwasserkreis)	kWh	$E_{HW, pmp, sk}$	elektr. Energiezähler EMU 12.x1 1000 Imp. / kWh
104	Betriebszustand der Wärmepumpe (Heiz- oder Warmwasserbetrieb)	0/1	t_H, t_W	rechnerisch aus Durchfluss 206 & 305 und Status 205
105	Vorlauftemperatur Wärmepumpe Heizbetrieb	°C	$\Theta_{H, hp, out}$	PT100 / VA08-01905-2-002 Tauchfühler
106	Vorlauftemperatur Wärmepumpe Warmwasserbetrieb	°C	$\Theta_{W, hp, out}$	PT100 / VA08-01905-2-003 Tauchfühler
107	Rücklauftemperatur der Wärmepumpe	°C	$\Theta_{HW, hp, in}$	PT100 / VA08-01905-2-004 Tauchfühler
108	Laufzeit des Verdichter	0/1	t_{hp}	Relais aus Regelung der Wärmepumpe
111	Elektrischer Energiebezug der Umwälzpumpe (Solekreis)	kWh	$E_{HWC, hp, pmp, src}$	el. Energiezähler EMU 12.x1m 1000 Imp./kWh (S0-Ausgang)
112	Vorlauftemperatur der Erdwärmesonde	°C	$\Theta_{HWC, src, out}$	PT100 (aus Wärmemengenzähler 115) 4...20 mA = 0...100°C
113	Rücklauftemperatur der Erdwärmesonde	°C	$\Theta_{HWC, src, in}$	PT100 (aus Wärmemengenzähler 115) 4...20 mA = 0...100°C
114	Volumenstrom Erdwärmesonde	m³/h	$V_{HWC, src}$	Volumenstromzähler Aquametro PMKbasic25 100 Imp./m³
115a	Wärmeabgabe Erdwärmesonde	kWh	$Q_{C, src}$	Wärmemengenzähler Aquametro Calec MB-4S 10 Imp./kWh
115b	Wärmebezug Erdwärmesonde	kWh	$Q_{HW, src}$	Wärmemengenzähler Aquametro Calec MB-4S 10 Imp./kWh
2xx	Heiz- & Kühlsystem			
201a	Nutzenergie Raumheizung	kWh	$Q_{H, em}$	Wärmemengenzähler Aquametro Calec MB-4S 10 Imp./kWh
201b	Nutzenergie Raumkühlung	kWh	$Q_{C, em}$	Wärmemengenzähler Aquametro Calec MB-4S 10 Imp./kWh
202	Vorlauftemperatur der Fussbodenheizung (Heiz- und Kühlkreis)	°C	$\Theta_{HC, em, in}$	PT100 (aus Wärmemengenzähler 201) 4...20 mA = 0...100°C
203	Rücklauftemperatur der Fussbodenheizung (Heiz- und Kühlkreis)	°C	$\Theta_{HC, em, out}$	PT100 (aus Wärmemengenzähler 201) 4...20 mA = 0...100°C
204	Elektrischer Energiebezug der Umwälzpumpen (Kühlkreis und Solekreis(Sekundärpumpe))	kWh	$E_{C, pmp, em}$	elektr. Energiezähler EMU 12.x1 1000 Imp. / kWh
205	Status Kühlbetrieb (Laufzeit UWP-FBH Kühlen)	0/1	t_c	Relais aus Ansteuerung der Umwälzpumpen
206	Durchfluss Fussbodenheizkreis	m³/h	$V_{HC, em}$	Volumenstromzähler Aquametro UFA114 100 Imp./m³

211	Vorlauftemperatur Kühlen Sole	°C	$\Theta_{C,em,in}$	PT100 Moser 281923-001 Anlegefühler
212	Rücklauftemperatur Kühlen Sole	°C	$\Theta_{C,em,out}$	PT100 Moser 281923-002 Anlegefühler
3xx	Warmwassersystem			
301	erzeugte Wärme Warmwasser	kWh	$Q_{W,sk}$	Wärmemengenzähler Aquametro Ultrasonic D 1 Imp./kWh
302	Nutzwärme Warmwasser	kWh	Q_W	Wärmemengenzähler Aquametro Ultrasonic D 1 Imp./kWh
304	Warmwassertemperatur	°C	$\Theta_{W,st,top}$	PT100 VA08-01905-1-001 Tauchfühler
305	Durchfluss Ladekreis Warmwasserspeicher	m³/h	$V_{W,sk}$	Volumenstromzähler Aquametro Ultrasonic D 1000 Imp./m³
306	bezogene Menge Warmwasser	m³/h	V_W	Volumenstromzähler Aquametro Ultrasonic D 1000 Imp./m³
307	Kaltwassertemperatur	°C	$\Theta_{W,st,in}$	PT100 VA08-01905-1-004 Tauchfühler
4xx	Lüftungssystem			
401	Temperatur Abluft	°C	$\Theta_{V,ra}$	PT100 VA08-01905-2-005 in Abluftsammelkasten
403	Temperatur Zuluft	°C	$\Theta_{V,sa}$	PT100 VA08-01905-2-009 in Zuluftsammelkasten
404	Volumenstrom Zuluft	m³/h	$V_{V,sa}$	Anemometer TSI 8455 0...10 V = 0...10 m/s
5xx	Gebäude			
501	Temperatur Raumlufte Erdgeschoss	°C	$\Theta_{a,gf}$	NTC- Temperaturfühler Testo 175-H2 NTC Messbereich -20.0 ...+70.0°C ±0.5°C
502	relative Luftfeuchte Raumlufte Erdgeschoss	%r.H.	$\Phi_{a,gf}$	Kap. Feuchtefühler Testo 175-H2 NTC Messbereich 0.0 ...+100.0%rF ±3.0%rF
503	Temperatur Raumlufte Obergeschoss	°C	$\Theta_{a,uf}$	NTC- Temperaturfühler Testo 175-H2 NTC Messbereich -20.0 ...+70.0°C ±0.5°C
504	relative Luftfeuchte Raumlufte Obergeschoss	%r.H.	$\Phi_{a,uf}$	Kap. Feuchtefühler Testo 175-H2 NTC Messbereich 0.0 ...+100.0%rF ±3.0%rF
505	Temperatur Raumlufte Kellergeschoss	°C	$\Theta_{a,bm}$	PT100 VA08-01905-2-006
6xx	Wetter			
601	Temperatur Aussenluft	°C	Θ_{oa}	PT100 Rotronic-Fühler MOK-20-XX-010V-2 0-10V = -30-70°C
602	relative Luftfeuchte Aussenluft	%r.H.	Φ_{oa}	Rotronic Fühler MOK-20-XX-010V-2 0-10V = 0-100%

9.3 MESSUNSICHERHEITEN

Pos.	Var.	Messprinzip	Einheit		Messunsicherheit
101	$E_{\text{HWC, hp}}$	Energiezähler	kWh		Kl. 2 (IEC1036) ²
102	$E_{\text{HW, pmp, sk}}$	Energiezähler	kWh		Kl. 2 (IEC1036) ²
104	$t_{\text{H}}, t_{\text{W}}$	n.a.	%		n.a.
105	$\Theta_{\text{H, hp, out}}$	PT100	°C		±0.1 K
106	$\Theta_{\text{W, hp, out}}$	PT100	°C		±0.1 K
107	$\Theta_{\text{HW, hp, in}}$	PT100	°C		±0.1 K
108	t_{hp}	n.a.	0/1		n.a.
111	$E_{\text{HWC, hp, pmp, src}}$	Energiezähler	kWh		Kl. 2 (IEC1036) ²
112	$\Theta_{\text{HWC, src, out}}$	PT100	°C		±0.30 K
113	$\Theta_{\text{HWC, src, in}}$	PT100	°C		±0.30 K
114	$V_{\text{HWC, src}}$	Volumenstromzähler	m ³ /h		0.13 m ³ /h
115a	$Q_{\text{C, src}}$	Wärmemengenzähler	kWh		Kl. 2 (EN1434) ²
115b	$Q_{\text{HW, src}}$	Wärmemengenzähler	kWh		Kl. 2 (EN1434) ²
201a	$Q_{\text{H, em}}$	Wärmemengenzähler	kWh		Kl. 2 (EN1434) ²
201b	$Q_{\text{C, em}}$	Wärmemengenzähler	kWh		Kl. 2 (EN1434) ²
202	$\Theta_{\text{HC, em, in}}$	PT100	°C		±0.15 K
203	$\Theta_{\text{HC, em, out}}$	PT100	°C		±0.15 K
204	$E_{\text{C, pmp, em}}$	Stromzähler	kWh		Kl. 2 (IEC1036) ²
205	t_{C}	n.a.	0/1		n.a.
206	$V_{\text{HC, em}}$	Volumenstromzähler	m ³ /h		±0.07 m ³ /h
211	$\Theta_{\text{C, em, in}}$	PT100	°C		±0.1 K
212	$\Theta_{\text{C, em, out}}$	PT100	°C		±0.1 K
301	$Q_{\text{W, sk}}$	Wärmemengenzähler	kWh		Kl. 2 (EN1434) ²
302	Q_{W}	Wärmemengenzähler	kWh		Kl. 2 (EN1434) ²
304	$\Theta_{\text{W, st, top}}$	PT100	°C		±0.3 K
305	$V_{\text{W, sk}}$	Volumenstromzähler	m ³ /h		±0.05 m ³ /h
306	V_{W}	Volumenstromzähler	m ³ /h		±0.05 m ³ /h
307	$\Theta_{\text{W, st, in}}$	PT100	°C		±0.1 K
401	$\Theta_{\text{V, ra}}$	PT100	°C		±0.1 K
403	$\Theta_{\text{V, sa}}$	PT100	°C		±0.1 K
404	$V_{\text{V, sa}}$	Anemometer	m ³ /h		±8 m ³ /h
501	$\Theta_{\text{a, gf}}$	NTC	°C		±0.5 K
502	$\varphi_{\text{a, gf}}$	Kap. Feuchtefühler	% _{r.H.}		±3% _{r.F.}
503	$\Theta_{\text{a, uf}}$	NTC	°C		±0.5 K
504	$\varphi_{\text{a, uf}}$	Kap. Feuchtefühler	% _{r.H.}		±3% _{r.F.}
505	$\Theta_{\text{a, bm}}$	PT100	°C		±0.1 K
601	Θ_{oa}	PT100	°C		±0.3 K
602	φ_{oa}	Kap. Feuchtefühler	% _{r.H.}		±1.5% _{r.F.}

² Details sind in 9.4 Genauigkeitsbetrachtungen ersichtlich

9.4 GENAUIGKEITSBETRACHTUNGEN

Generell gilt, dass Feldmessungen an Haustechnikanlagen und nicht unter Laborbedingungen erfolgen. Der Einbau der Messfühler und deren Verdrahtung müssen also unter den gegebenen Bedingungen erfolgen. Daher ist das erstellen lehrbuchmässiger Messstellen leider oft nicht möglich. Der Betrieb des Datenloggers, die Datenaufzeichnung und die Datenübertragung muss auch unter ungünstigen Bedingungen stabil möglich sein.

Um die geforderte Genauigkeit bei den Temperaturmessungen zu erreichen, werden direkte Temperaturmessstellen kalibriert und Fehler korrigiert. Bei sonstigen Messstellen wurden geeichte Messgeräte verwendet.

Die eingesetzten Wärmemengenzähler entsprechen der Klasse 2 EN 1434. Der Elektrizitätsverbrauch wird mit Hilfe von Elektro-Energiezählern der Klasse 2 IEC 1036 erfasst. Die Genauigkeit dieser Messinstrumente wird durch die Hersteller wie folgt angegeben:

- Elektrozähler $\pm 2\%$
- Wärmemengenzähler gemäss Tabelle 13

Wärmemengenzähler	Messfehler			
	Durchfluss	Temperatur ([°] gepaarte Fühler)	Medium- Korrektur ([°] eingestellter Wärmeträger)	Gesamtfehler
Fussbodenkreis - Heizen	$\pm 0.07 \text{ m}^3/\text{h}$	$\pm 0.10 \text{ K}^*$	$+3.5\%^*$	$+7\% / 0\%$
Solekreis - Heizen	$\pm 0.13 \text{ m}^3/\text{h}$	$\pm 0.10 \text{ K}^*$	$+3.5\%^*$	$+6.5\% / +0.5\%$
Fussbodenkreis - Kühlen	$\pm 0.07 \text{ m}^3/\text{h}$	$\pm 0.10 \text{ K}^*$	$+3.5\%^*$	$+9\% / -2\%$
Solekreis - Kühlen	$\pm 0.13 \text{ m}^3/\text{h}$	$\pm 0.10 \text{ K}^*$	$+3.5\%^*$	$+12\% / -5\%$
Warmwasser - Ladung	$\pm 0.05 \text{ m}^3/\text{h}$	$\pm 0.02 \text{ K}$	-	$\pm 4\%$
Warmwasser - Entnahme	$\pm 0.05 \text{ m}^3/\text{h}$	$\pm 0.40 \text{ K}$	-	$\pm 3\%$

Tabelle 13 Messfehler der eingesetzten Wärmemengenzähler

Für die Auswertung wurden grundsätzlich die Werte der Wärmezähler und Elektrozähler verwendet. Die Anzeigewerte der Wärmezähler wurden zur Plausibilitätsprüfung mit den Werten der Wärmezählung über den Datenlogger verglichen. Aufgrund der gegebenen Messungenauigkeiten muss von den folgenden Toleranzen für die ermittelten Kennzahlen (WNG, SNG) ausgegangen werden:

- $\text{WNG}_H, \text{SNG}_H$ $\begin{matrix} +9\% \\ -2\% \end{matrix}$
- SNG_C $\begin{matrix} +11\% \\ -4\% \end{matrix}$
- $\text{WNG}_W, \text{SNG}_W$ $\begin{matrix} +6\% \\ -6\% \end{matrix}$