FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 2772

Sören Peper, Jürgen Schnieders,
Fabian Ochs, Wolfgang Feist

Messtechnische Untersuchung und wissenschaftliche Auswertung zur saisonalen Wärmespeicherung über Sole-Register unter der Bodenplatte eines Passivhauses mit Dämmschürze

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 2772

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8460-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

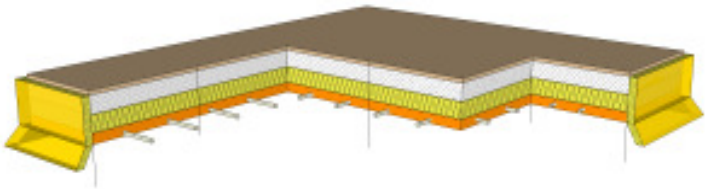
www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

PASSIV
HAUS
INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist

Messtechnische Untersuchung und wissenschaftliche Auswertung zur saisonalen Wärmespeicherung über Sole-Register unter der Bodenplatte eines Passivhauses mit Dämmschürze

Abschlussbericht



Im Auftrag des BBR

Bundesamt
für Bauwesen und
Raumordnung

FORSCHUNGSINITIATIVE
Zukunft BAU

e·on

Dezember 2010

PASSIV
HAUS
INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist

Messtechnische Untersuchung und wissenschaftliche Auswertung zur saisonalen Wärmespeicherung über Sole-Register unter der Bodenplatte eines Passivhauses mit Dämmschürze

Abschlussbericht

Forschungsvorhaben Aktenzeichen:
Z 6 – 10.08.18.7-06.19. / II2-F20-06-013

Autoren:
Dipl.-Ing. Søren Peper (Projektleitung)
Dr. Jürgen Schnieders
Dr. Fabian Ochs (Universität Innsbruck)
Prof. Dr. Wolfgang Feist

Unter Mitarbeit von:
Dr. Rainer Pfluger (Universität Innsbruck)
Florian Meffert
Henning Aust
Dipl.-Ing. Wolfgang Hasper
Dipl.-Ing. Cornelia Baumgärtner
Dipl.-Ing. Markus John
Dipl.-Ing. Vahid Sariri
Dipl.-Ing. Roland Schuhmacher
Dipl.-Ing. Zeno Bastian
Joachim Probst

Herausgeber:
PASSIVHAUS INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstr. 44/46
D-64283 Darmstadt
Tel: 06151 / 82699-0
Fax: 06151 / 82699-11
E-Mail: mail@passiv.de
www.passiv.de

Darmstadt Dezember 2010

Dieser Bericht entstand mit Förderung durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau und
mit Förderung durch E.ON.

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren

Wir danken den Bewohnern des untersuchten Gebäudes für die Bereitschaft, an diesem Messprojekt teilzunehmen, sowie für die Mitarbeit, Geduld und Gelassenheit bei den diversen Ortsterminen und telefonischen Nachfragen. Unser Dank gilt auch dem Architekten Hr. Trykowski, der die Messung angeregt hat, sowie der Haustechnikplanerin Fr. Betz für diverse Auskünfte.

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG 3

2 GEBÄUDEKURZVORSTELLUNG 6

2.1 HAUSTECHNIK 10
2.1.1 Funktion Energiespeicherung und -entnahme unter der Bodenplatte .. 17
2.1.1.1 Ladung Kombispeicher durch Solarwärme 17
2.1.1.2 Ladung Erdreichspeicher durch Solarwärme (Speicherbeladung) ... 18
2.1.1.3 Wärmeentnahme aus dem Erdreichspeicher (Speicherentladung) .. 19
2.1.2 Austausch Pumpe und Korrekturen in der Anlagenregelung 20
2.2 MESSTECHNIK 21
2.2.1 Messungen Erdreich 23
2.2.1.1 Beschaffenheit des Erdreichs 29
2.2.2 Wärmemengen und Mediumstemperaturen 29
2.2.3 Stromverbrauch 30
2.2.4 Speichertemperaturen 31
2.2.5 Wetterstation 31

3 MESSDATENAUSWERTUNG 33

3.1 WETTERDATEN 33
3.1.1 Heizwärmebedarf mit gemessenen Wetterdaten 39
3.2 TEMPERATUREN 40
3.2.1 Temperaturen Solekreis 40
3.2.2 Erdreichtemperaturen 46
3.2.3 Temperaturen oberhalb der Wärmedämmung 52
3.2.4 Warmwasserspeicher 54
3.3 BETRIEBSWEISE WÄRMEPUMPE 55
3.3.1 Systemgrenze niedrige Soletemperaturen 57
3.4 HYDRAULIK – ABWEICHUNG VON DER GEPLANTEN FUNKTIONSWEISE 65
3.4.1 Ungewollte Warmwasserspeicherentladung 65
3.4.2 Absperrventil Solaranlage und Effizienz Solepumpe 69
3.5 ENERGETISCHE AUSWERTUNGEN 71
3.5.1 Hilfsstromverbrauch 71
3.5.2 Heizwärme und Heizlast 73
3.5.3 Erdreichbe- und -entladung 75
3.5.4 Wärmepumpe 77
3.5.4.1 Arbeitszahl Wärmepumpe 79
3.6 ENERGIEBILANZEN 88
3.6.1 Nutz- und Endenergie 88
3.6.2 Primärenergie 91

4 SIMULATIONSRECHNUNGEN UND ANALYSEN 94

4.1 ANALYSE DER SPEICHEREFFEKTE IM ERDREICH 94
4.1.1 Simulationsmodell 94
4.1.2 Ergebnisse 97
4.1.2.1 Keine Gefahr langfristiger Erschöpfung des Erdreichs 97
4.1.2.2 Wechselwirkung mit dem Gebäude 98
4.1.2.3 Das Erdreich als saisonaler Wärmespeicher 98
4.2 SIMULATIONEN ZUR OPTIMIERUNG DER VERSORGUNGSTECHNIK 102
4.2.1 Beschreibung des 1D Erdreich-Wärmeübertrager-Modells 104
4.2.2 Dimensionierung und Abstimmung der Komponenten – Taktung 107

4.2.3 Untersuchung von Systemteilen bzw. alternativen Systemen 109
4.2.3.1 Einfache erdgekoppelte Wärmepumpenheizung 109
4.2.3.1 Einfache Solare Trinkwarmwassererwärmung 112
4.2.4 Erkenntnisse 115

5 GESAMTBEWERTUNG 117

5.1 OPTIMIERUNGSPOTENTIAL 122
5.2 DENKBARE ALTERNATIVSYSTEME 124

6 LITERATUR 126

7 ANHANG 128

1 Einleitung und Zusammenfassung

Das im vorliegenden Forschungsprojekt messtechnisch und mittels Simulation untersuchte freistehenden Einfamilienhaus in Passivhausstandard (152 m² Energiebezugsfläche) in der Nähe von Bamberg wird mit einer innovativen Haustechnik wärmeseitig versorgt: Die 10 m² große thermische Solaranlage belädt einen Kombispeicher für die Warmwasser- und Heizungsversorgung. Der Wärmeüberschuss wird mit Hilfe eines kostengünstigen Soleregisters, welches in der Sauberkeitsschicht verlegt ist, unter dem Gebäude im Erdreich gespeichert. Eine kleine Dämmschürze von 30 cm Tiefe erschwert die Abkühlung des unter dem Haus entstehenden „Wärmesees“. Wenn Wärme benötigt wird, kann diese mit Hilfe einer Wärmepumpe über ein Soleregister dem Erdreichwärmespeicher entzogen werden. Das Warmwasser wird – wenn das Temperaturniveau im Kombispeicher nicht ausreicht – mit Hilfe von Durchlauferhitzern direktelektrisch nacherwärmt. Das Gebäude ist damit – in Bezug auf nicht-erneuerbare Energieträger – monovalent mit Strom versorgt.

Voraussetzung für das Konzept ist eine hochwärmegedämmte Gebäudehülle, um insgesamt einen sehr niedrigen Wärmeverbrauch zu gewährleisten. Die Bodenplatte des Gebäudes muss hochwertig wärmegedämmt sein, damit insbesondere im Winter keine störend großen Wärmeverluste durch den Bodenaufbau ins Erdreich entstehen können.

Die Untersuchung des Gebäudes hat ergeben, dass es sich um ein funktionierendes Passivhaus mit leicht erhöhtem Heizwärmeverbrauch (von gut 23 kWh/(m²a)) und einem Energieverbrauch für die Warmwasserversorgung (inkl. Verluste) in ähnlicher Größenordnung handelt. Der leicht erhöhte Heizwärmeverbrauch hat seine Ursache zum Teil darin, dass das Erdreich unter der Bodenplatte im Winter überwiegend kühler ist als ohne aktiven Wärmeentzug. Das führt trotz 30 cm Bodenplattendämmung zu einem erhöhten Wärmeabfluss ins Erdreich (knapp 2 kWh/(m²a)). Außerdem ist offenbar die winterliche Raumtemperatur höher als die in der Bilanz angesetzten 20 °C (Einfluss: 2,5 kWh/(m²a) je K Temperaturerhöhung. Üblich sind Werte um 21,5 °C.). Zusätzlich führt der Umstand, dass das als Zweifamilienhaus geplante Gebäude mit 152 m² Energiebezugsfläche z. Z. von nur zwei Personen bewohnt wird, zu spezifisch niedrigeren inneren Wärmequellen als in der PHPP-Bilanz angesetzt wurden. Auch dies erhöht den Heizwärmeverbrauch, macht aber zugleich deutlich, dass der Standard PHPP-Ansatz für die inneren Wärmquellen keinesfalls zu gering gewählt ist.

Die Anlagentechnik benötigt zum Betrieb der Wärmepumpe, Umwälzpumpen, Warmwassernachheizung sowie der Lüftungsanlage ausschließlich elektrischen Strom. Im dritten Bilanzjahr 2009/2010 wurden für alle haustechnischen Aufwendungen (sämtliche Energieaufwendungen im Gebäude mit Ausnahme des Haushaltsstroms) 16,7 kWh/(m²a) Strom verbraucht. Die generelle Funktionstüchtigkeit des Konzeptes ist damit belegt. Bei dem niedrigen Preis für Wärmepumpenstrom von

0,14 €/kWh (Bewohnerangabe von Sep. 2009) werden nur knapp 30,- € im Monat für Heizung, Warmwasser und Lüftung benötigt.

In dem nach unten offenen „Erdreichwärmespeicher“ unter dem Gebäude werden nur moderate Erdreichtemperaturen von maximal ca. 22 °C erreicht. Auch eine weiter vergrößerte Kollektoranlage würde, aufgrund der vergleichsweise raschen Verteilung der Wärme im Erdreich, während der Entnahmeperiode im Winter nur zu geringfügig höheren Temperaturen unter dem Haus führen. Es wurde deutlich, dass eine saisonale Speicherung von solarer Überschusswärme unter der Bodenplatte bei den gegebenen Dimensionen eines Einfamilienhauses nur eingeschränkt erfolgreich ist. Es kann daher weniger von einem System mit saisonaler Speicherung gesprochen werden, sondern vielmehr von einem System mit solarer Regeneration des Erdreichs als Quelle für die Wärmepumpe.

Die Wärmepumpe (ohne Hilfsaggregate) erreicht Jahresarbeitszahlen im Bereich von 3,1. Die Ursache für die nur durchschnittlichen Werte sind insbesondere nicht optimal abgestimmte Einzelkomponenten, die im Verlauf des Winters relativ niedrige Quellentemperatur (Erdreich) sowie das Erreichen der Grenze der thermischen Erdreichleistung am Ende des Winters. Die Bewohner wurden dabei allerdings immer ausreichend mit Wärme versorgt. Die Nachheizung („Temperaturhub“) des Trinkwarmwassers erfolgte in dieser Zeit dann verstärkt direktelektrisch.

Es wurde festgestellt, dass die vorhandene Solepumpe nur eine sehr geringe Energieeffizienz aufweist; zudem wird sie aufgrund ihrer Überdimensionierung an einem ungünstigen Betriebspunkt gefahren. Hier ist mit das größte Optimierungspotential zu finden. Dagegen hat die thermische Solaranlage mit 485 kWh/ ($m^2_{Kollektor}$a) gute bis sehr gute spezifische solare Erträge erreicht.

Primärenergetisch erreicht das System mit fast 44 kWh/(m²a) ein ähnliches Ergebnis wie Passivhäuser mit herkömmlichen Wärmeversorgungssystemen. Dies ist zunächst enttäuschend angesichts des erhöhten technischen und finanziellen Aufwands im Vergleich zu üblicherweise im Passivhaus eingesetzten Versorgungstechniken. Mit Verbesserungen im Bereich des Stromverbrauchs der Heizungs- und insbesondere der Solepumpe kann der Primärenergiekennwert dieses Systems aber auf etwa 37 kWh/(m²a) gesenkt werden. Wird nach den Erkenntnissen der Simulation das weitere Optimierungspotential von 5 bis 15 % ausgeschöpft (insbesondere durch die Reduktion des Taktverhaltens der Wärmepumpe), sind Primärenergiewerte von bis minimal etwa 32 kWh/(m^2a) erreichbar. Damit könnte mit künftigen Anlagen dieser Art ein sehr guter Primärenergiekennwert erreicht werden.

In einem Nachfolgeprojekt mit ähnlicher Technik wurde eine deutlich kleinere Wärmepumpe (Sonderanfertigung mit 2 kW Heizleistung) eingesetzt. Primärenergetisch bewertet ergibt sich damit der sehr gute Wert von 27,3 kWh/(m²a). Allerdings liegen keinerlei weitere messtechnische Details (Erdreich, Nutzung, Technik) zu dem relativ großen Gebäude (190 m²) vor. Eine valide Interpretation der Daten wäre erst

mit einer aufwendigeren Untersuchung, ähnlich wie beim hier betrachteten Gebäude, möglich.

Die jahreszeitliche Energiespeicherung mit individuellen technischen Speichern für Einfamilienhäuser ist und bleibt mit der verfügbaren Technik unwirtschaftlich. Aus diesem Grund wurden u. a. mit diesem Projekt Möglichkeiten gesucht, die Speicherkosten stark zu reduzieren. Die Verwendung des Erdreichs direkt unter dem Haus ohne weitere technische Einrichtungen reduziert die Kosten deutlich gegenüber jeder anderen gesonderten technischen Vorrichtung zur Speicherung. Es bleiben nur die Kosten der Verlegung der Soleleitung zum Laden des Erdreichwärmespeichers. Wie oben beschrieben zeigt sich allerdings bei diesem Gebäude, dass damit nicht von einem Wärmespeicher im engen Sinn gesprochen werden kann, sondern nur von der solaren Regeneration des Erdreichs als Wärmequelle der Wärmepumpe.

Es kann insgesamt gezeigt werden, dass mit Optimierungen durchaus ein noch besseres Gesamtergebnis erzielt werden kann. Daher ist es auch von Interesse, wie sich die optimierte Gebäudetechnik auf das Gesamtergebnis auswirken wird. Es muss aber betont werden, dass eine solche Lösung mit innovativer Versorgungstechnik – insbesondere bei einem solchen Prototyp – relativ kompliziert und daher besonders fehleranfällig ist. Mit technisch einfacheren Haustechniksystemen (z.B. Kompaktgerät mit thermischer Solaranlage) können mit weniger Aufwand und höherer Sicherheit ähnliche Primärenergiekennwerte erreicht werden.

Voraussetzung dafür, derart geringe Primärenergiekennwerte zu erreichen, ist jedoch immer eine besonders energieeffiziente Bauweise (in diesem Fall Passivhaus) und eine effiziente Verteiltechnik (insbesondere beim Warmwasser). Im Fall der Nutzung des Erdreichs unter dem Haus als Wärmequelle ist die hohe Energieeffizienz des Gebäudes sogar eine Voraussetzung für die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Systems, wie frühere Untersuchungen an schlechter gedämmten Gebäuden gezeigt haben.

2 Gebäudekurzvorstellung

Bei dem untersuchten Gebäude handelt es sich um ein freistehendes Einfamilien-Passivhaus mit Doppelgarage in der Nähe von Bamberg. Die Planung wurde vom Architekturbüro Trykowski aus Frensdorf ausgeführt. Das Gebäude wurde Ende des Jahres 2006 fertiggestellt und wird seitdem von zwei Personen bewohnt.

Abbildung 1: Südfassade des Gebäudes. Auf dem Süddach befindet sich die dreieckige thermische Solaranlage (Foto: Houwen).

Es handelt sich um ein nicht unterkellertes Massivhaus mit Wärmedämmverbundsystem. Die Energiebezugsfläche beträgt **EBF = 152 m²**. Die Nutzfläche nach EnEV beträgt A_N = 216,3 m² und ist damit 42 % größer. Das obere Geschoss des Gebäudes kann auch separat als zweite, unabhängige Wohnung genutzt werden („Zweifamilienhaus"). Daher befindet sich im EG und im OG jeweils ein Badezimmer mit Dusche und Badewanne.

Tabelle 1: Technische Daten der Gebäudehülle (lt. [PHPP] des Architekten)

Bauteil	
U-Wert Außenwand	0,11 W/(m²K)
U-Wert Bodenplatte	0,12 W/(m²K)
U-Wert Dach	0,09 W/(m²K)
U-Wert Fenster	0,72 W/(m²K)
Luftdichtheit	n_{50} = 0,4 1/h
A/V-Verhältnis	0,67 m²/m³

Abbildung 2: Südost-Ansicht.

Abbildung 3: Gebäude von Osten gesehen.

Die Grundfläche des beheizten Gebäudeteils ist nahezu quadratisch, die Ausrichtung weicht um 30 Grad von den Haupthimmelsrichtungen ab (Nordfassade 30 Grad nach Ost gedreht). Das flache Zeltdach hat eine Dachneigung von 16 Grad. Auf der Nordseite befindet sich ein offener, überdachter Eingangsbereich und der Zugang zur vorgelagerten Garage. Nach Osten steigt das Gelände zur Straße hin leicht an.

Abbildung 4: Eingangbereich des Gebäudes auf der Nordseite, dahinter die vorgelagerte Doppelgarage. Links im Bild befindet sich die Fortluftausblasöffnung.

Abbildung 5: Gebäude von Norden (Eingangsbereich und Doppelgarage).

Abbildung 6: Gebäude von Westen mit der vorgelagerten Doppelgarage (Foto: Houwen).

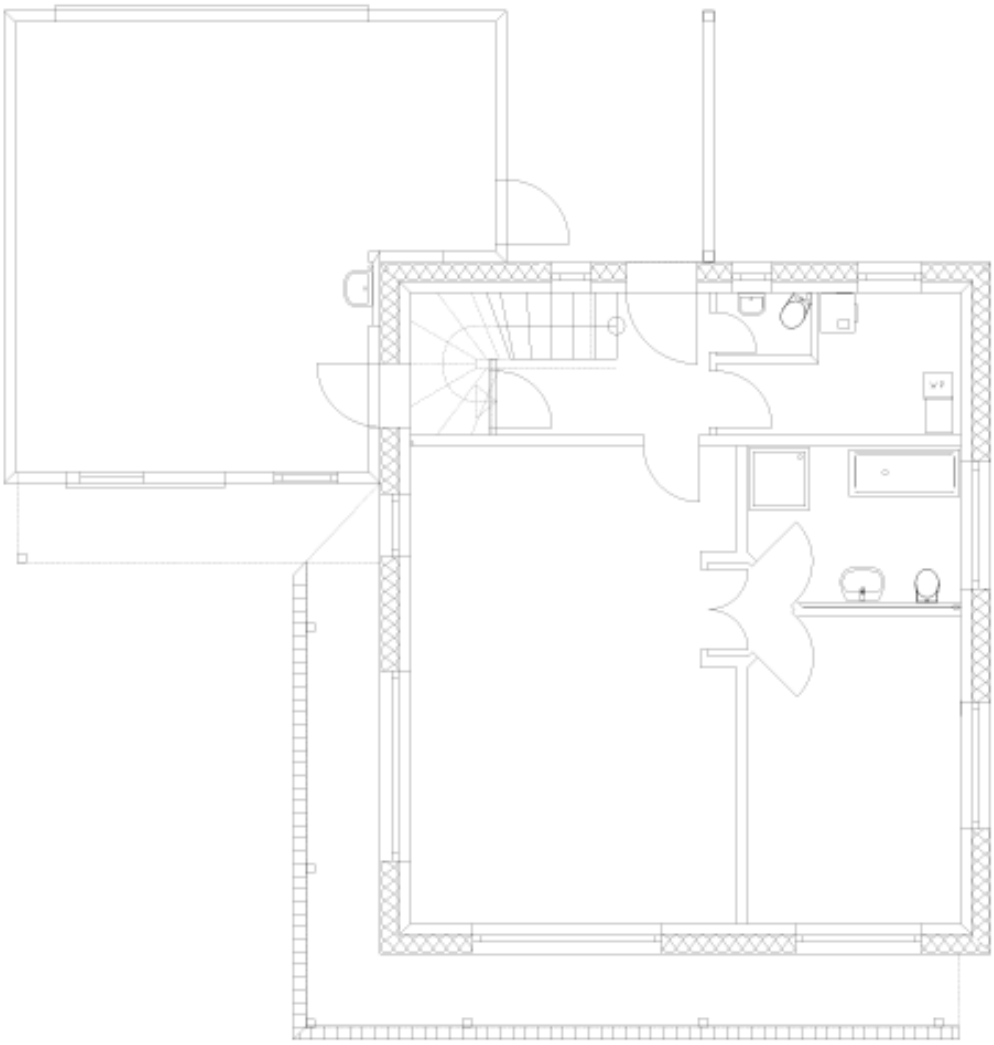


Abbildung 7: Grundriss EG mit Garage (Quelle: Architekturbüro Trykowski).

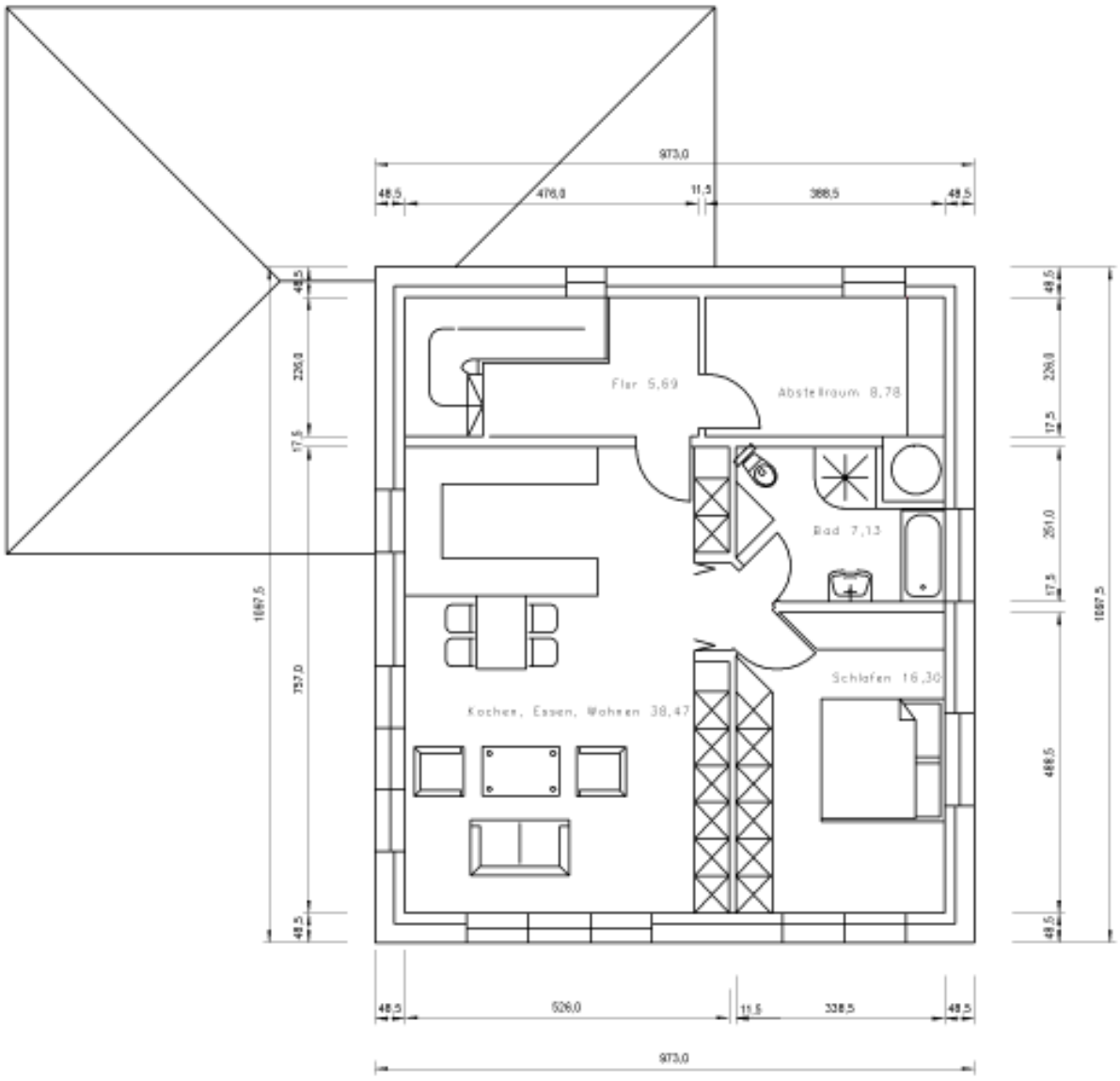


Abbildung 8: Grundriss OG (Quelle: Architekturbüro Trykowski).

2.1 Haustechnik

Die Wärmeversorgung des Gebäudes (Beheizung und Warmwasser) erfolgt über eine 10 m² große thermische Solaranlage zur direkten Warmwasserversorgung. Die im Sommer anfallende Überschusswärme der Anlage wird über ein Soleregister, welches kostengünstig in der Sauberkeitsschicht unter der Sohlplattendämmung verlegt ist, im Erdreich eingespeichert. Zur Verringerung der Wärmeverluste des Erdreichwärmespeichers unter der ca. 106 m² großen Bodenplatte und zur Reduzierung der Wärmeverluste an den Rändern wurde umlaufend eine kleine sog. „Dämmschürze“ verlegt. Die ca. 41 m lange Dämmschürze wurde im 45°-Winkel angeordnet, sie ist ca. 45 cm lang und 14 cm stark. Sie schließt lückenlos an die aufsteigende Perimeterdämmung an. Auf diese Weise soll in einem relativ eng begrenzten Bereich unter dem Gebäude eine Temperaturanhebung durch die sommerliche Beladung über die thermische Solaranlage erreicht werden.

Mit Hilfe einer Sole-Wärmepumpe wird dem Erdreichspeicher unter dem Gebäude bei Bedarf Wärme zur Beheizung bzw. zur Warmwasserbereitung entzogen und auf ein höheres Temperaturniveau angehoben. Wenn die Warmwassertemperatur des Warmwasserspeichers nicht ausreicht, erfolgt die Nacherhitzung über zwei externe Elektro-Durchlauferhitzer (jeweils einer je Badezimmer). Damit kann auf eine direkte elektrische Nachheizung des oberen Teils des Warmwasserspeichers verzichtet werden.

Das gesamte Gebäude wird somit - in Bezug auf nichtregenerative Energien - monovalent mit elektrischem Strom versorgt, als Wärmequelle dient das solar erwärmte Erdreich.

Tabelle 2: Technische Eckdaten der Haustechnik und des Gesamtgebäudes.

Komponente	**Details**
Lüftungsanlage	Kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung (η_{eff} = 87 %) und vorgeschaltetem Erdwärmetauscher
Solaranlage	10,2 m² (brutto) thermische dachintegrierte Flachkollektor-anlage (Trüsolar GmbH)
Warmwasserspeicher	750 Liter Pufferspeicher mit innenliegendem Wärme-tauscher
Sole/Wasser-Wärmepumpe	Viessmann Vitocal 300 Typ BW 104, Nenn-Wärmeleistung P = 4,8 kW, Kälteleistung: 3,7 kW, elektr. Leistungsauf-nahme: 1,1 kW, Sole-Eintrittstemperatur: max. 25 °C, min -5 °C
Erdkollektor	4 x 75 m Kunststoffrohr (DN 20 x 2 mm) unter der Bodenplatte in der Sauberkeitsschicht (Verlegeabstand 0,33 m). Temperaturbegrenzung bei Erdreichbeladung auf max. 40 °C durch Beimischung
Beheizung	Fußbodenheizung in EG und OG in 8 Heizkreisen mit thermoelektrischen Stellantrieben und 7 Raumtemperatur-reglern. Festwertregelung auf Vorlauf 35 °C
Heizenergiebedarf	15 kWh/(m²a) (lt. PHPP)
Heizlast	10,6 W/m² (lt. PHPP)

Das vereinfachte hydraulische Schema der Anlage ist in Abbildung 9 dargestellt. Den detaillierten Hydraulikplan der Planungsfirma zeigt Abbildung 10.

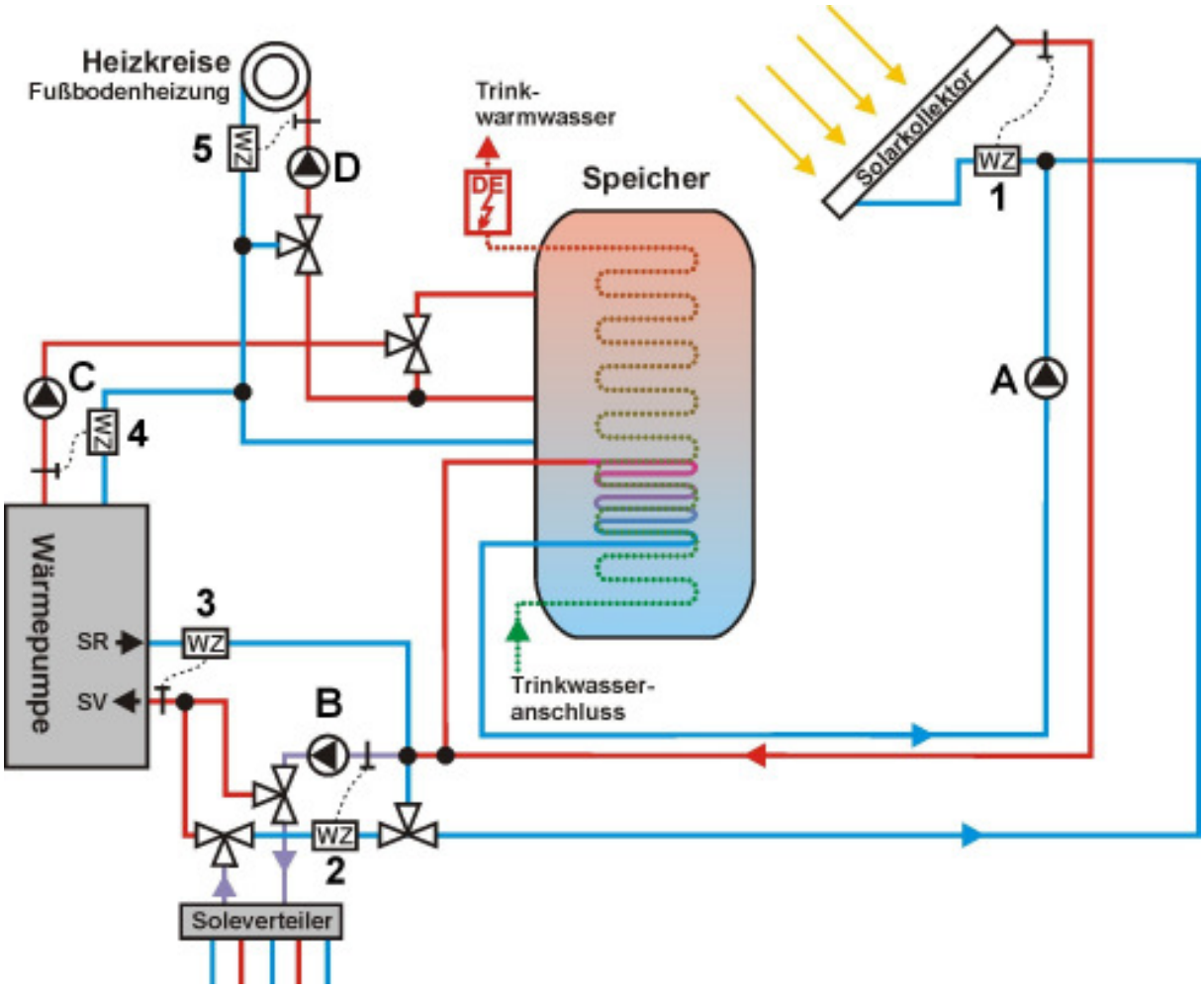


Abbildung 9: Vereinfachtes Funktions-Hydraulikschema (WMZ = Wärmemengenzähler, hier mit „WZ“ bezeichnet).

Tabelle 3: Zuordnung der Wärmemengenzähler (WMZ) als Legende zu Abbildung 9.

WMZ	Bezeichnung / Einsatz
1	Ertrag Solaranlage
2	Einspeisung Erdreich (Soleregister)
3	Entnahme Erdreich (Soleregister) = Quelle Wärmepumpe
4	Lieferung Wärmepumpe gesamt
5	Heizkreis
A	Solarpumpe
B	Solepumpe
C	Pumpe Wärmepumpe Lieferung
D	Heizkreispumpe

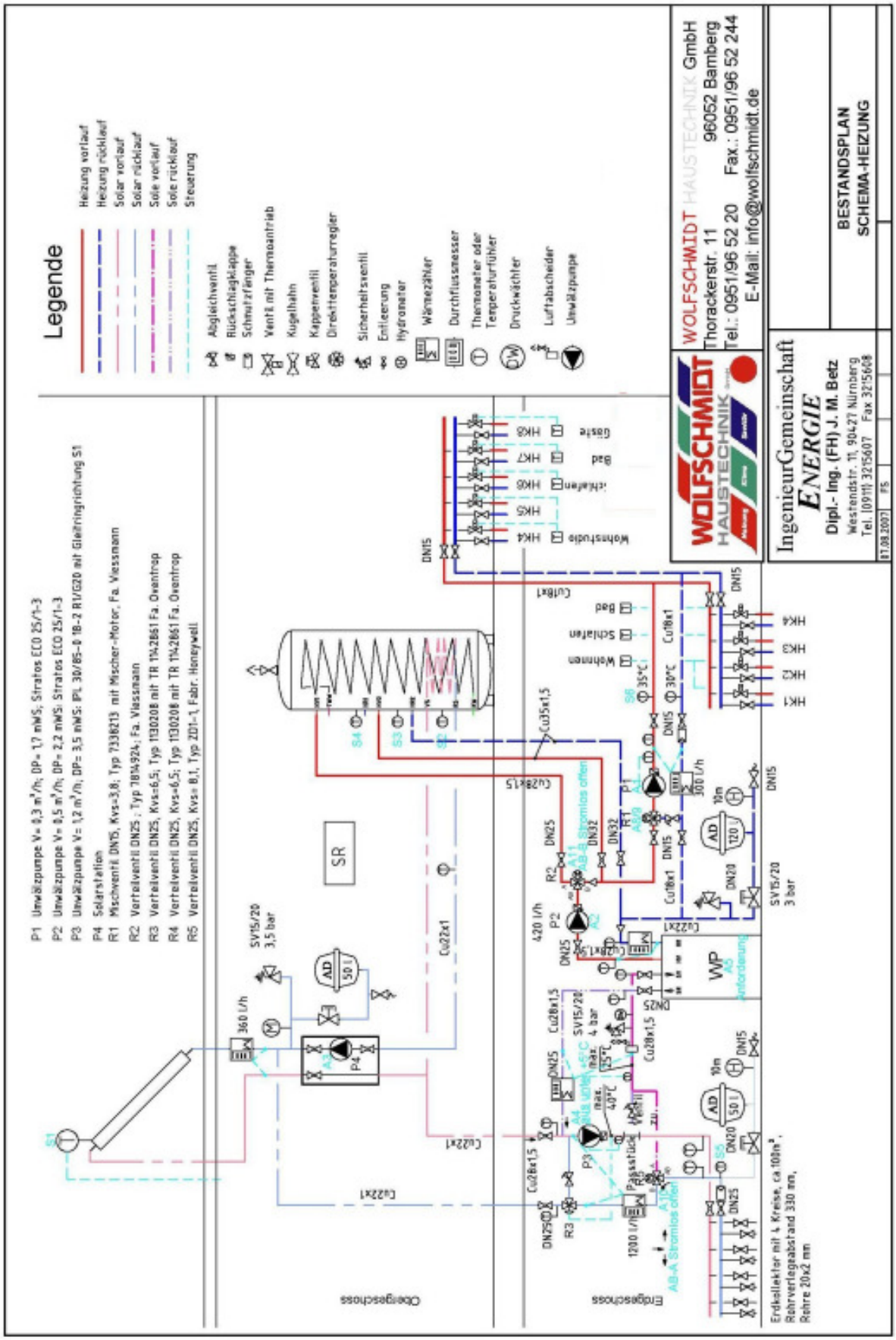


Abbildung 10: Hydraulikschema der gesamten Anlage (Quelle: Fa. IngenieurGemeinschaft Energie).

Die Haustechnik mit Wärmepumpe und Lüftungsanlage befindet sich im Technikraum im EG des Gebäudes. Der große Warmwasserspeicher und die Solarstation befinden sich im OG, über dem Technikraum.

Abbildung 11: Haustechnik im EG. Rechts befindet sich das Lüftungsgerät, in der Mitte unten die Wärmepumpe.

Abbildung 12: Planum vor dem Herstellen der Sauberkeitsschicht. Umlaufend ist die Oberkante der Dämmschürze zu erkennen, innen angrenzend eine Schotterschüttung bzw. „Schotterkeule“ (Foto: Trykowski).

Abbildung 13: Herstellen der Sauberkeitsschicht mit den verlegten Solewärmetauscher-Rohren (Foto: Houwen).

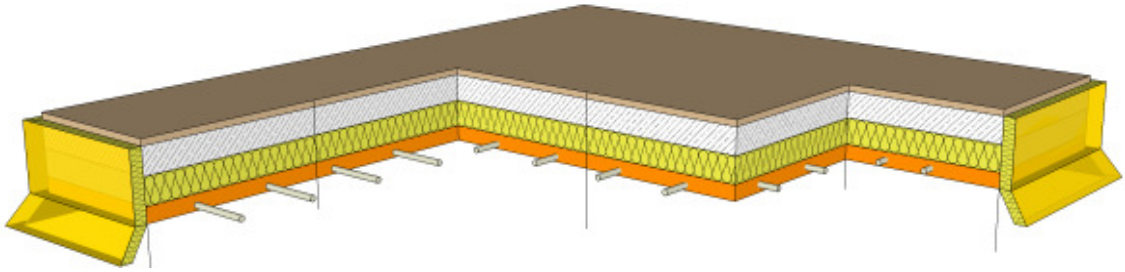


Abbildung 14: Skizze des Bodenaufbaues des Solewärmeübertragers mit der Sauberkeitsschicht (orange) inkl. der Sole-Rohre, seitlich die Perimeterdämmung mit der Dämmschürze (gelb vertikal und abgeschrägt), der Fußbodendämmung (gelb horizontal) und der Bodenplatte mit Bodenbelag.

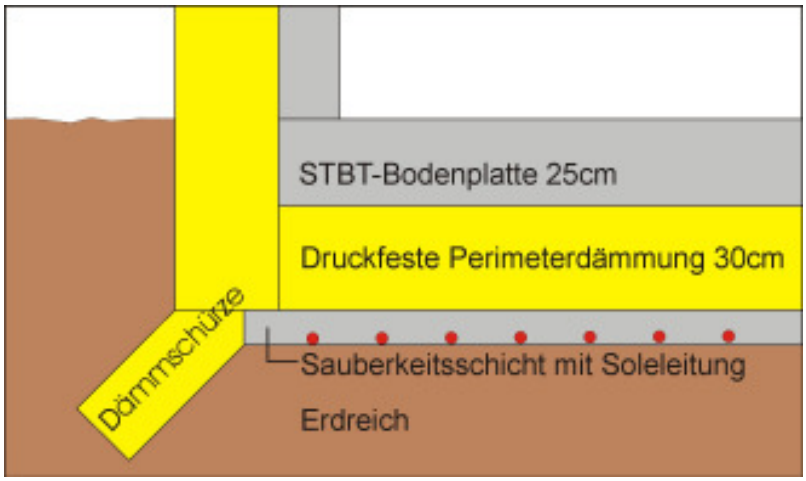


Abbildung 15: Schematisch vereinfachter Bodenaufbau des Gebäudes mit den Soleleitungen in der Sauberkeitsschicht.

Abbildung 16: Verlegung der Rohrschlangen für die Fußbodenheizung in der Bodenplatte OBERHALB der Wärmedämmung (Foto: Trykowski).

Abbildung 17: Warmwasserspeicher (750 Liter) im OG des Gebäudes vor der Dämmung der Rohrleitungen. Rechts neben dem Speicher befinden sich die beiden Durchlauferhitzer zur Nacherwärmung des Brauch-Warmwassers, darunter die Solarstation. Über den beiden Durchlauferhitzern befindet sich der Wärmezähler (rot) für die Messung der Solarwärme.

2.1.1 Funktion Energiespeicherung und -entnahme unter der Bodenplatte

Der Anlagenaufbau und die Regelung der Anlage ermöglichen unterschiedliche Funktionen. Die für die Funktion wichtigsten Betriebsweisen werden hier beschrieben.

2.1.1.1 Ladung Kombispeicher durch Solarwärme

Mit vorrangiger Funktion wird durch die Solaranlage die Warmwasserversorgung sichergestellt. Dazu wird bei ausreichender Temperaturdifferenz (> 7 K) zwischen Solaranlagenvorlauf und unterer Speichertemperatur des Kombiwasserspeichers

durch die Freigabe der Solarpumpe der Speicher beladen (vgl. Abbildung 18). Die Beladung ist auf 85 °C am unteren Speichertemperatursensor begrenzt.

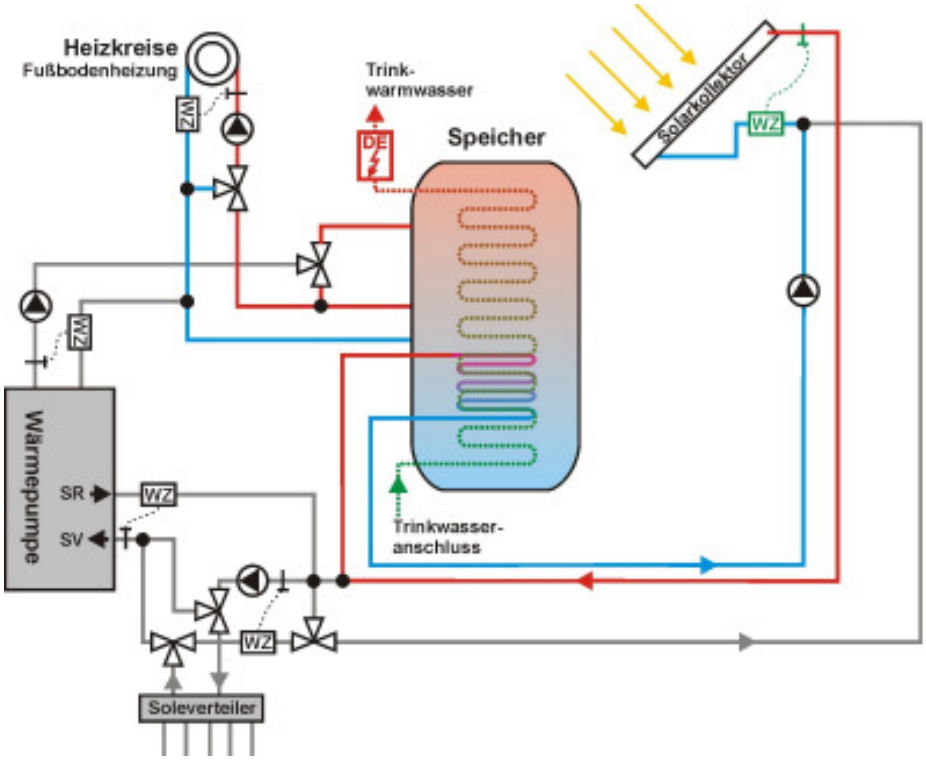


Abbildung 18: Hydraulisches Funktionsschema zur Ladung des Solar-Speichers durch solarthermische Anlage (nicht aktive Rohrleitungsabschnitte sind grau gezeichnet).

2.1.1.2 Ladung Erdreichspeicher durch Solarwärme (Speicherbeladung)

Eine weitere Schaltweise des hydraulischen Systems ermöglicht die Energieeinspeicherung in das Erdreich unter der Bodenplatte. Diese Funktion erschließt die Nutzung des Erdreichs als saisonaler Speicher der Solarwärme auf niedrigem Niveau. Zur Beladung wird die Solepumpe in Betrieb genommen (Solarpumpe ist dann nicht in Betrieb), diese betreibt dann den Solar- und den Solekreis. Die maximale Temperatur am Erdkollektor soll 40 °C nicht überschreiten (Vorgabe des Architekten zum Schutz der Bausubstanz). Daher soll bei höheren Temperaturen Rücklaufwasser aus dem Soleregister über ein Dreiwegeventil dem Vorlauf des Soleregisters beigemischt werden. Der gesamte Vorgang ist schematisch in Abbildung 19 dargestellt.

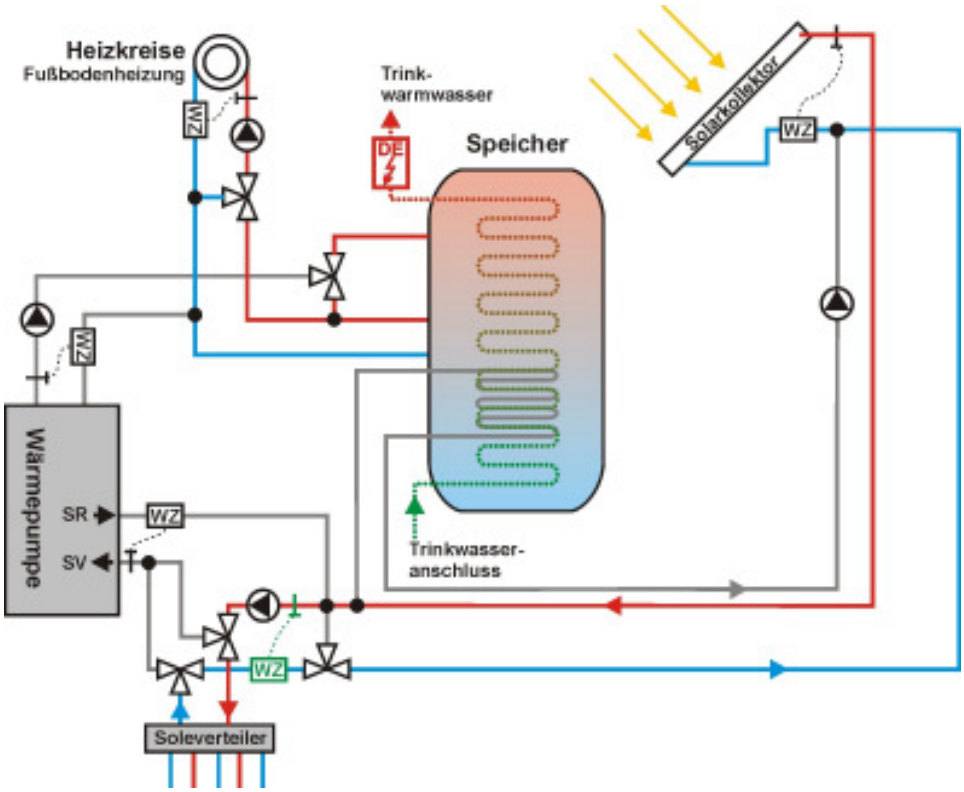


Abbildung 19: Hydraulisches Funktionsschema bei derEnergieeinspeisung von der thermischen Solaranlage in den Erdreichwärmespeicher unter dem Gebäude (nicht aktive Rohrleitungsabschnitte sind grau gezeichnet).

2.1.1.3 Wärmeentnahme aus dem Erdreichspeicher (Speicherentladung)

Zur Entnahme der Energie aus dem Erdreichspeicher wird die Wärmepumpe freigegeben und die Solepumpe aktiviert. Mit dieser Funktion wird der Warmwasserspeicher geladen. Dabei soll die Temperatur an der unteren Stelle des oberen Drittels des Speichers auf 45 °C gehalten werden (Normalbetrieb, 17:00 bis 21:00 Uhr). Im Absenkbetrieb (21:00 bis 17:00 Uhr) sollen 40 °C gewährleistet werden.

Die Mediumtemperatur „Sole“ der Wärmepumpe darf 25 °C nicht überschreiten. Bei höheren Temperaturen arbeitet das Gerät nicht mehr (Systemdruck zu hoch für das Gerät). Als untere Grenze muss verhindert werden, dass das Fundament des Gebäudes auffrieren kann. Daher kann Energie nur bis ca. zur Frostgrenze entnommen werden.

Zum winterlichen Heizbetrieb werden die Fußbodenheizungskreise mit 35 °C Vorlauf angefahren. Die mittels des Wärmeübertragers im Speicher erzeugte Warmwassertemperatur kann elektrisch mit den beiden Durchlauferhitzern angehoben werden.

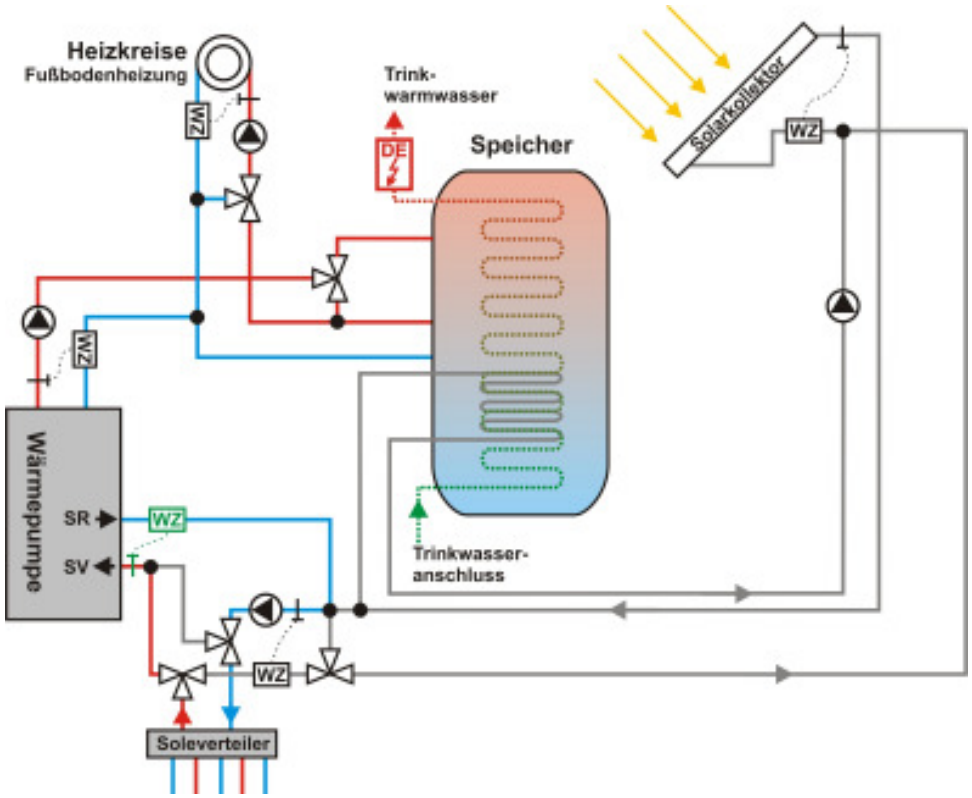


Abbildung 20: Hydraulisches Funktionsschema zur Wärmeentnahme durch die Wärmepumpe aus dem Erdreichspeicher unter dem Gebäude (nicht aktive Rohrleitungsabschnitte sind grau gezeichnet).

2.1.2 Austausch Pumpe und Korrekturen in der Anlagenregelung

Durch Überprüfungen der ausführenden Firma und durch die ersten Messdaten der hier publizierten Untersuchung zeigte sich, dass der Volumenstrom des Solekreislaufes zeitweise zu niedrig war. Der Temperatureinfluss auf die Viskosität der Soleflüssigkeit war nicht ausreichend berücksichtigt worden. Die Pumpenleistung reichte bei niedrigen Soletemperaturen nicht aus. Aus diesem Grund wurde am 09. Oktober 2007 die Pumpe Fa. Wilo / Typ Stratos ECO 25/1-5 PN10 gegen einen leistungsstärkeren Typ (Fa. Wilo Trockenlaufpumpe, Inline Bauweise, Modell IPL 30/85-0 18/2) ausgetauscht.

Zusätzlich wurde eine Fehlfunktion der Hydraulik durch ein Regelventil festgestellt. Dieses sollte verhindern, dass die Wärmepumpe mit einer zu hohen Vorlauftemperatur versorgt wird (max. ca. 25 °C). Es sollte kälteres Wasser aus dem Erdreichkreislauf beigemischt werden. Es zeigte sich aber, dass beim Erdreichladebetrieb der Durchgang zwischen Pumpe und Erdreichkreislauf gesperrt wurde. Daher wurde das Ventil (R4) zunächst außer Betrieb gesetzt. Es sollte weiter beobachtet werden, ob so hohe Soletemperaturen aus dem Erdreich vorliegen, dass die Wärmepumpe nicht mehr ordnungsgemäß arbeiten kann. In diesem Fall wäre ein Umbau

notwendig. Die Messung zeigt allerdings, dass derart hohe Temperaturen nicht erreicht werden.

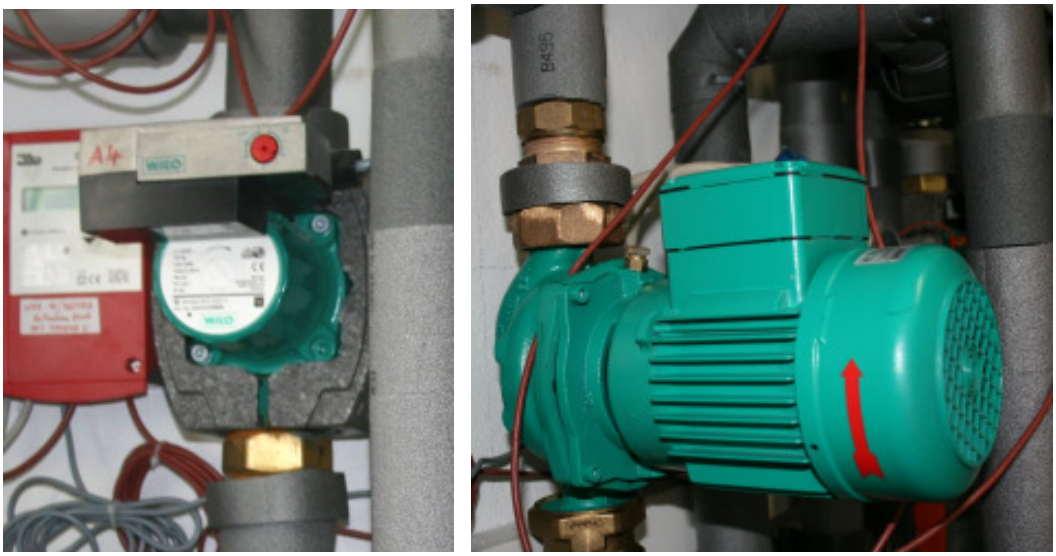


Abbildung 21: Alte (links) und neue leistungsstärkere (rechts) Solekreispumpe.

2.2 Messtechnik

Für die begleitenden Messungen wurden Temperatursensoren im Erdreich, in der Sauberkeitsschicht und in der Sohlplatte vor und während der Bauphase montiert. Des weiteren wurden eine Wetterstation und Sensoren zur Überprüfung der Anlagenfunktion (Wärmemengen und Temperaturen) montiert. Eine Übersicht über die realisierte Messtechnik und die Anordnung des Bus-Netzes ist Abbildung 22 zu entnehmen.

Der Bus-Master zur Datenerfassung sowie der zentrale Datenlogger befinden sich in einem Schaltschrank im Technikraum des Gebäudes. Zum gesicherten Betrieb bei Stromausfall (höhere Ausfallsicherheit) ist die Anlage mit einer USV („Unterbrechungsfreie Stromversorgung“) ausgerüstet. Einige Datenausfälle z.B. durch defekte Datenumsetzer ließen sich in der Messzeit dennoch nicht verhindern. Die Störungen wurden jeweils schnellstmöglich durch Ortstermine eines PHI-Mitarbeiters oder den Eingriff der Bewohner, behoben.

Die Daten werden kontinuierlich in 10-Minuten Auflösung gemessen und abgespeichert. Die mindestens wöchentliche Datenkontrolle und der Datendownload erfolgt per Online-Zugriff via ISDN-Verbindung.

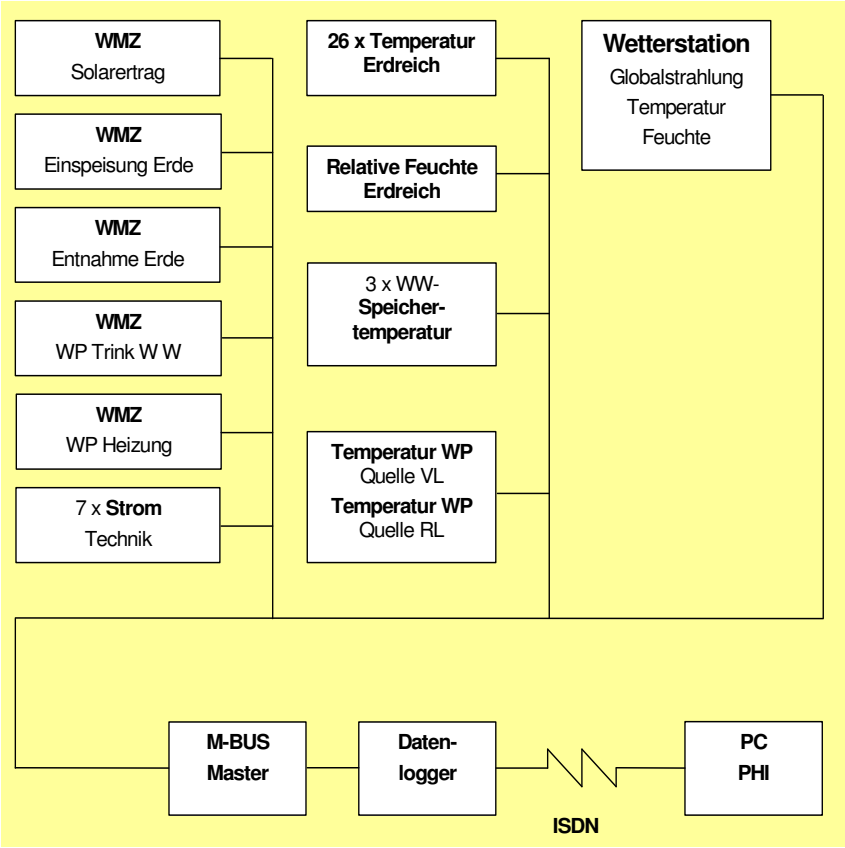


Abbildung 22: Schematischer Aufbau der Messdatenerfassung mit M-Bus-Netz.

Abbildung 23: Schaltschrank mit der Messdatenerfassungsanlage im Haustechnikraum (EG).

2.2.1 Messungen Erdreich

Zur Beurteilung der Temperaturveränderungen im Erdreich wurden in, unter und neben der Bodenplatte sowie im Erdreich des Gartens Temperatursensoren verlegt. Eine Übersicht über die Temperaturmesspunkte in und unter der Bodenplatte zeigt schematisch Abbildung 24. Die Sensoren sind in fünf vertikalen Achsen angeordnet: Mitte Haus, Ost 1 und 2 sowie Süd 1 und 2. In jeder Achse sind drei bis vier Messpunkte untereinander angeordnet. Ein Messpunkt „oben“ befindet sich dabei jeweils oberhalb der Wärmedämmung (5 cm unter der Betonoberfläche der Bodenplatte) in der Ebene der Fußbodenheizung. Darunter liegen die Sensoren in der Ebene des Soletauschers – also unter der Dämmung, in der Sauberkeitsschicht („mitte“). Darunter folgt die Ebene in der Höhe der Unterkante der Dämmschürze („unten“) und dann noch weitere 15 cm (Mitte und Süd) bzw. 32 cm (Ost) tiefer die unterste Ebene („tief“).

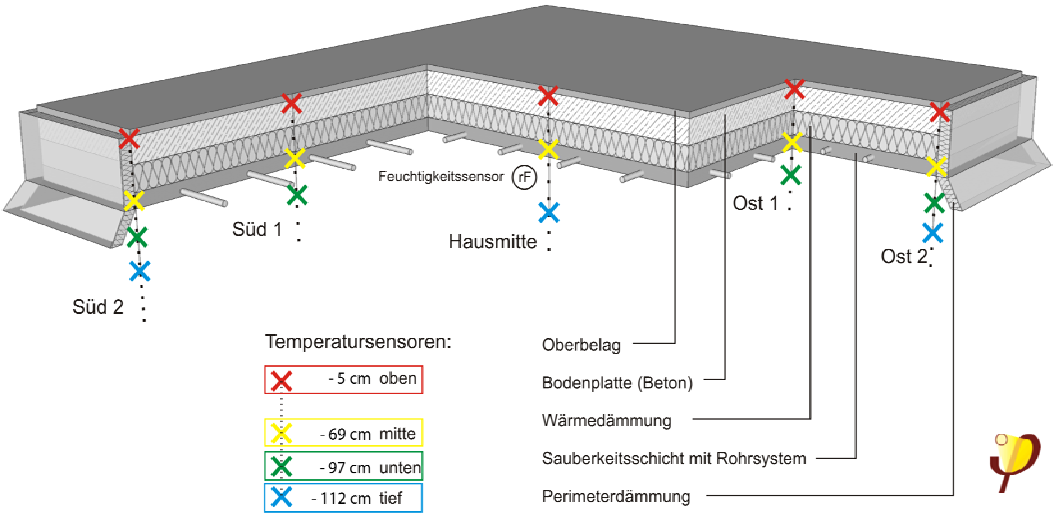


Abbildung 24: Skizze des Bodenaufbaues des Sohlewärmeübertragers mit den Positionen der Temperatur- und der Feuchtemessung. Die Positionsangabe im Bild geben nur grob die geplante Lage der Sensoren an. Die realen Positionen weichen davon ab und sind Abbildung 25 zu entnehmen.

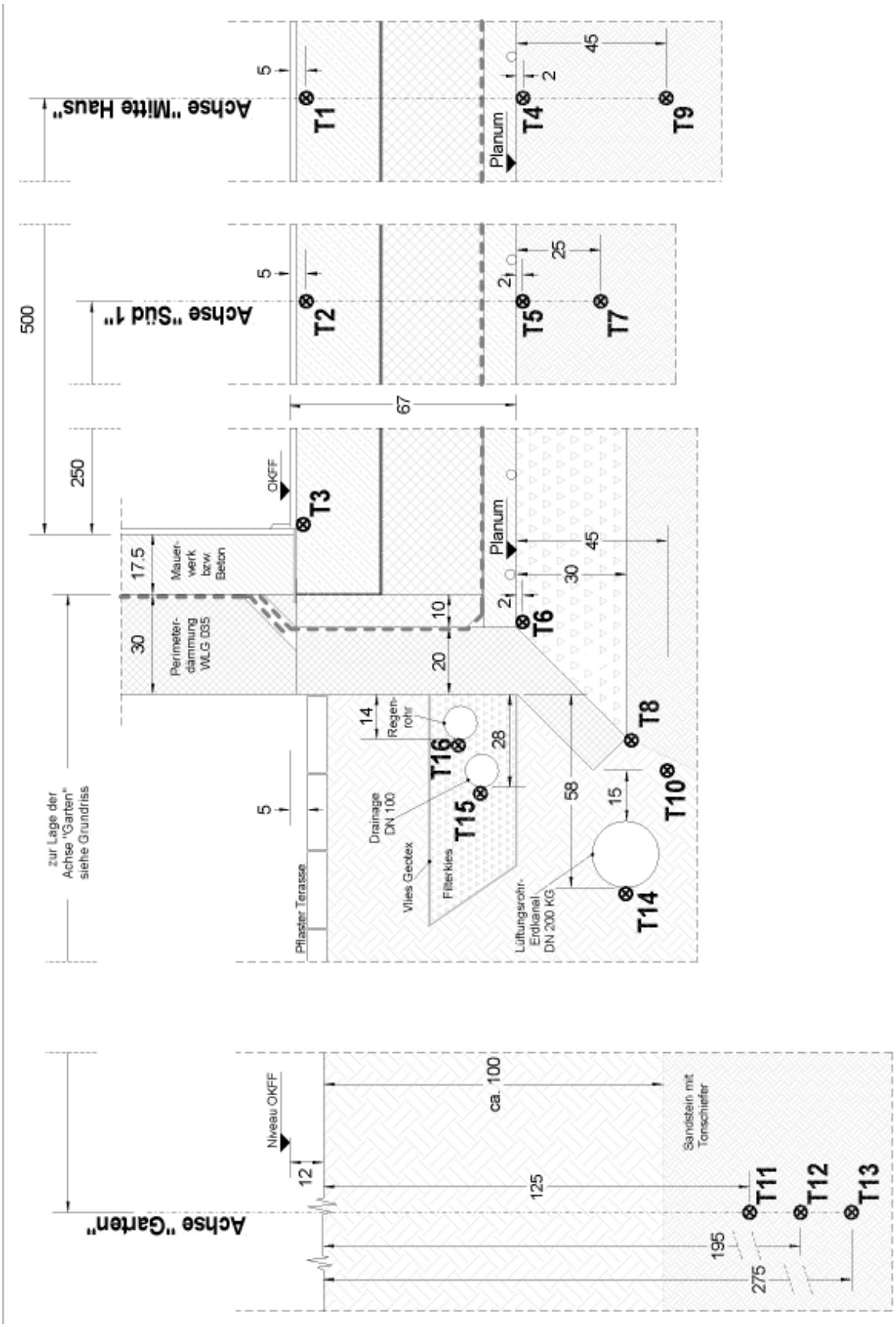


Abbildung 25: Vermessene Positionen der Temperatursensoren in der Achse „Süd 1“ und „Süd 2“, „Mitte Haus“ und „Garten“ (Grundlage der Zeichnung sind die Pläne vom Büro Trykowski).

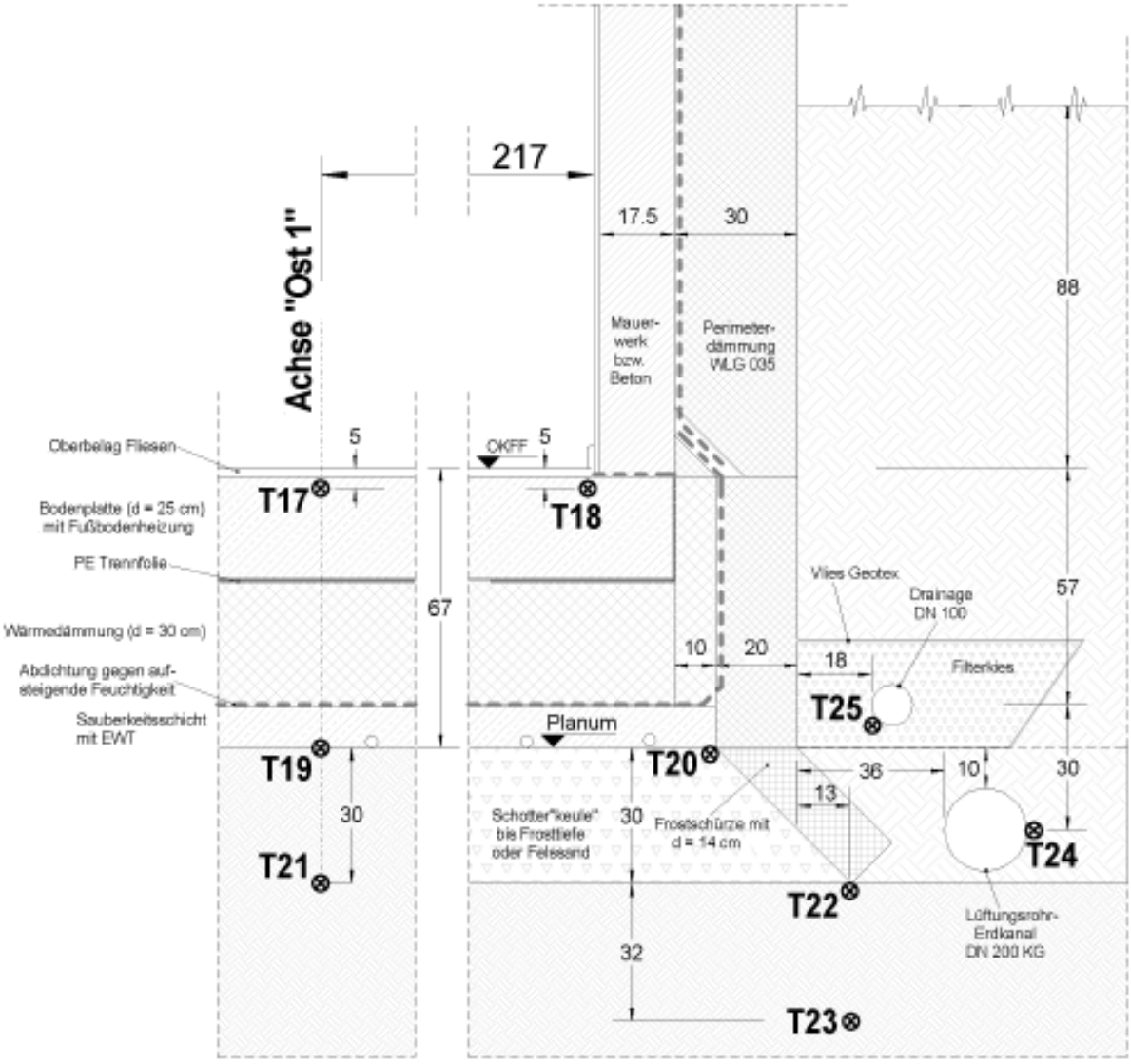


Abbildung 26: Vermessene Positionen der Temperatursensoren in der Achse „Ost 1“ und „Ost 2“ (Grundlage der Zeichnung sind die Pläne vom Büro Trykowski).

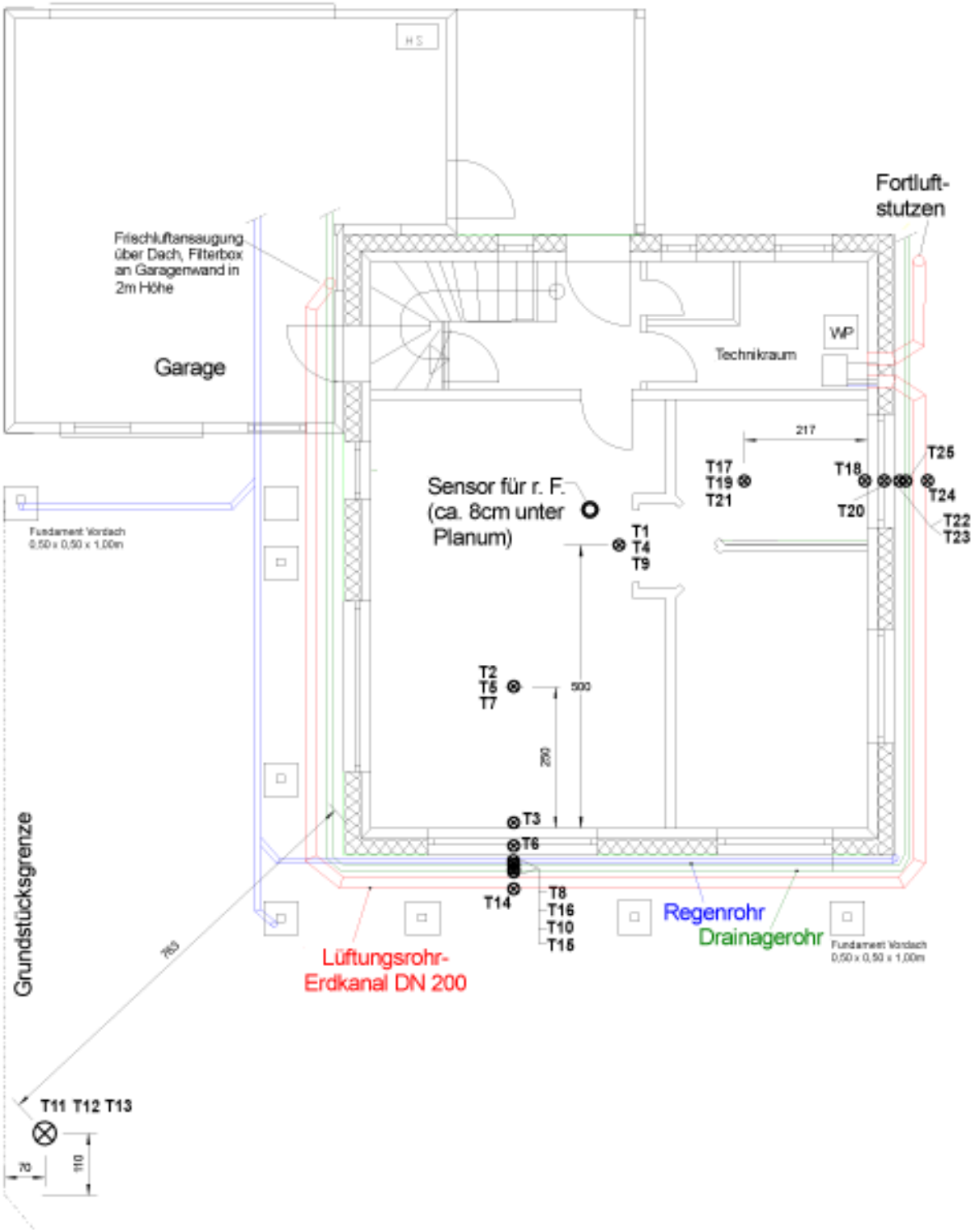


Abbildung 27: Vermessene Positionen der Temperatursensoren im Grundriss (Grundlage der Zeichnung sind die Pläne vom Büro Trykowski).

Tabelle 4: Zuordnung der Sensorenbezeichnungen zu den Bus-Nummern und ihrer Position.

Sensor Bezeichnung	Bus-Nr.	Position/Name
T1	30	Hausmitte oben
T2	31	Süd_1 oben
T3	32	Süd_2 oben
T4	33	Hausmitte mitte
T5	34	Süd_1 mitte
T6	35	Süd_2 mitte
T7	36	Süd_1 unten
T8	37	Süd_2 unten
T9	38	Hausmitte tief
T10	39	Süd_2 tief
T11	40	Garten oben (- 1,25 m) (Süd_3 oben)
T12	41	Garten unten (- 1,95 m) (Süd_3 unten)
T13	42	Garten tief (- 2,75 m) (Süd_3 tief)
T14	43	Luftrohr Süd
T15	44	Drainrohr Süd
T16	45	Regenrohr Süd
T17	46	Ost_1 oben
T18	47	Ost_2 oben
T19	48	Ost_1 mitte
T20	49	Ost_2 mitte
T21	50	Ost_1 unten
T22	51	Ost_2 unten
T23	52	Ost_2 tief
T24	53	Luftrohr Ost
T25	54	Drainrohr Ost

Abbildung 28: Verlegung der Temperatursensoren durch PHI Mitarbeiter vor dem Aufbringen der Sauberkeitsschicht. Bei den grünen Kabeln handelt es sich um die Sensorkabel, die roten Kabelenden enthalten die vergossenen Sensoren.

Abbildung 29: Verlegung der Temperatursensoren unterhalb und am oberen Rand der Dämmschürze. Die sichtbaren Kieselsteine bilden die Oberfläche der sogenannten Schotterkeule.

2.2.1.1 Beschaffenheit des Erdreichs

Am 31.05.2006 wurden vor dem Herstellen der Sauberkeitsschicht zwei Bodenproben auf der Baustelle entnommen. Eine Probe wurde im Garten im Bereich vor der zukünftigen Bodenplatte entnommen (Probe A: „verdichtete Oberfläche vor der Dämmschürze“) und die andere Probe entstammt direkt dem Erdreich unter der Sauberkeitsschicht (Probe B: „Planum Mitte Haus“).

An der Universität Cottbus (Lehrstuhl Angewandte Physik/Thermophysik) wurden die thermischen Eigenschaften untersucht (Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität) und die Sorptionsisothermen der beiden Proben erstellt.

Der Prüfbericht von Herrn Dr. Ulrich Fischer von der Universität Cottbus vom 24. Januar 2007 ist als Anlage angefügt.

Für die Einschätzung der Erdreichbeschaffenheit, die Übertragbarkeit auf andere Standorte und nicht zuletzt für die spätere Durchführung der Simulationsrechnung sind die ermittelten Kennwerte des Erdreichs notwendig.

2.2.2 Wärmemengen und Mediumstemperaturen

Zum Erfassen der Wärmemengen inkl. der Temperaturen und der Volumenströme werden fünf Wärmemengenzähler eingesetzt. Drei davon sind für den Betrieb mit Soleflüssigkeit ausgelegt, die Wärmekapazität c_p des Mediums lässt sich bei diesen Geräten einstellen. Die Zähler wurden entsprechend den Konzentrationen der Frostschutzmittelbeimischung programmiert.

Die Zähleranordnung und Bezeichnungen sind in Abbildung 9 dargestellt.

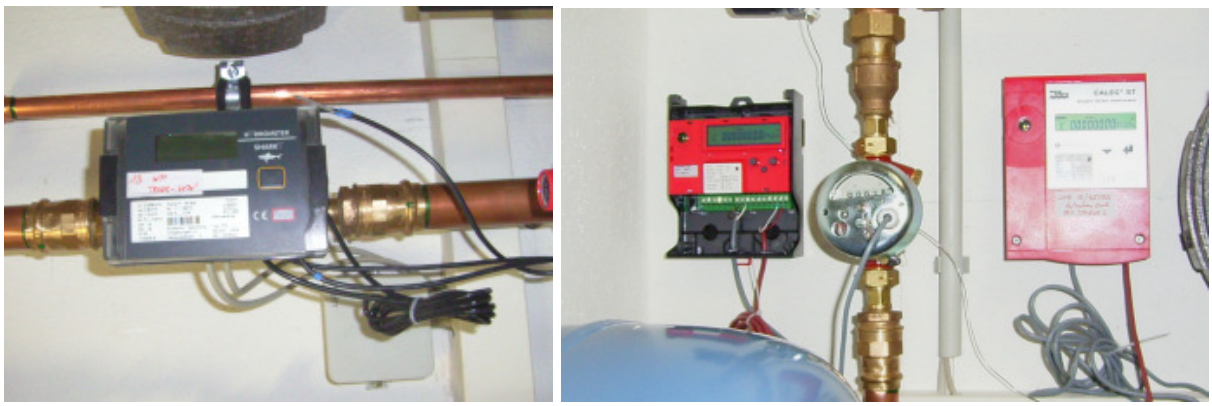


Abbildung 30: Montierte Wärmemengenzähler unterschiedlicher Bauart.

Die Vor- und der Rücklauftemperaturen des Solekreislaufs werden mittels Tauchfühlern in den Rohren kurz vor dem Eintritt ins bzw. Austritt aus dem Erdreich gemessen.

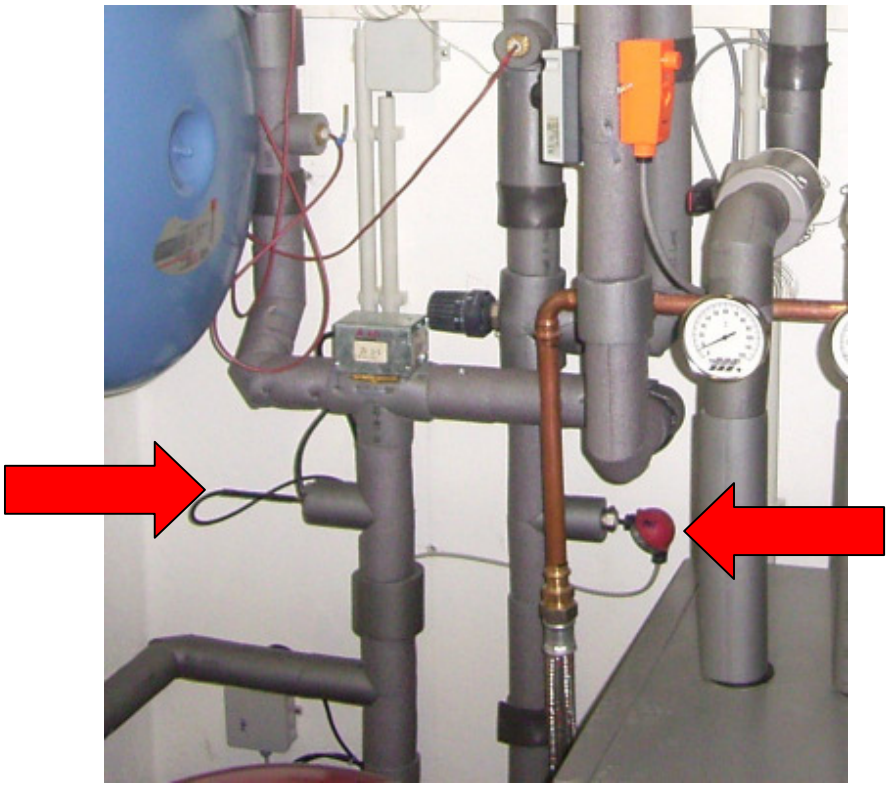


Abbildung 31: Messpunkte der Temperaturmessung des Vor- und Rücklaufs des Solekreislaufes.

2.2.3 Stromverbrauch

Zu Beginn der Messung wurden die Stromverbräuche der beiden Durchlauferhitzer sowie der Verbrauch der Wärmepumpe mit drei Stromzählern erfasst. Nach dem Umbau der Solepumpe im Oktober 2007 gegen ein leistungsstärkeres Gerät wurde entschieden, dass weitere Messungen elektrischer Verbraucher der Haustechnik notwendig sind. Aus diesem Grund wurden fünf weitere Stromzähler nachgerüstet. Insgesamt werden die folgenden elektrischen Verbraucher erfasst:

Tabelle 5: Messtechnisch erfasste Verbraucher

Nr.	Gemessene elekt. Verbraucher
1	Durchlauferhitzer 1
2	Durchlauferhitzer 2
3	Wärmepumpe
4	Pumpe Fußbodenheizung
5	Pumpe Vorlauf Wärmepumpe
6	Pumpe Solekreislauf
7	Pumpe Solarkreis
8	Lüftungsanlage gesamt

Abbildung 32: Stromzähler zum Messen der Verbräuche der beiden Durchlauferhitzer.

Zusätzlich wird auch der Stromverbrauch der Messtechnikanlage sowie der Wettermessung erfasst, um den Verbrauch abrechnen zu können.

2.2.4 Speichertemperaturen

Am 750 Liter Kombispeicher (Höhe 2,55 m, Durchmesser 0,6 m) im OG werden die Temperaturen in drei Höhen auf der Stahlwandung unter der Speicherdämmung mit Anlegefühlern erfasst. Die Messungen erfolgen in den folgenden Höhen:

Tabelle 6: Positionen der Temperatursensoren am Kombispeicher

Position	Höhe Sensor (über Fußboden)
Oben	2,45 m (unterhalb der Deckelschweißnaht)
Mitte	1,27 m
Unten	0,48 m

Die Messpositionen weichen von den Höhen der für die Regelungstechnik genutzten gesonderten Temperatursensoren ab. Die Schaltvorgänge der Regelung passen damit nicht genau zu den gemessenen Temperaturen.

2.2.5 Wetterstation

Zur Erfassung der Wetterbedingungen am Gebäudestandort ist an der westlichen Grundstücksgrenze des Gartens in 7,6 m Entfernung zum Gebäude ein Wettermast aufgestellt worden. An diesem sind in ca. 2,5 m über Grund unter einem belüfteten Strahlungsschutz die Sensoren zur Messung der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte montiert. Darüber wird die Globalstrahlung, entsprechend der Nei-

gung und Ausrichtung der Solaranlage (entspricht dem Süddach) messtechnisch erfasst.

Abbildung 33: Wettermast im Garten mit dem Solarstrahlungsmessgerät in Dachneigung und einem kombinierten Lufttemperatur- und Feuchtesensor im belüfteten Strahlungsschutzgehäuse .

Abbildung 34: Geöffneter Elektroschaltkasten der Wettermessung während der Montage.

Die Umsetzung der analogen Wettermessung auf den Messtechnik-Bus erfolgt in einem gesonderten Schaltkasten in der Garage des Gebäudes. Die Messdatenerfassungsanlage fragt die Daten über den Bus dort wie alle anderen Messpunkte ab.

3 Messdatenauswertung

Die Messdaten vom Messbeginn am 01. Februar 2007 bis zum 15. Mai 2010, also drei Jahre und dreieinhalb Monate, werden hier ausgewertet und dargestellt. Einige Sensoren sind erst später in Betrieb gegangen. So wurden die Stromzähler der Durchlauferhitzer erst am 30.3.2007 vom Fachbetrieb montiert und danach auf der Anlage aufgelegt. Daten der später nachgerüsteten Stromzähler sind ab Mitte November 2008 verfügbar.

3.1 Wetterdaten

Die Wetterstation im Garten des Gebäudes liefert die Außenlufttemperatur, relative Luftfeuchte sowie Globalstrahlung in der Neigung und Ausrichtung der thermischen Solaranlage (16 Grad gegenüber Horizontal, 30 Grad nach Osten). Kleinere entstandene Datenlücken wurden mit Wetterdaten der Station „Wiesengiech“ (Gemeinde Scheßlitz) des agrarmeteorologischen Messnetzes Bayern (Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft) ergänzt. Die Station ist etwa 17 km vom Gebäude entfernt und liefert gut nutzbare Daten mit nur geringer Abweichung.

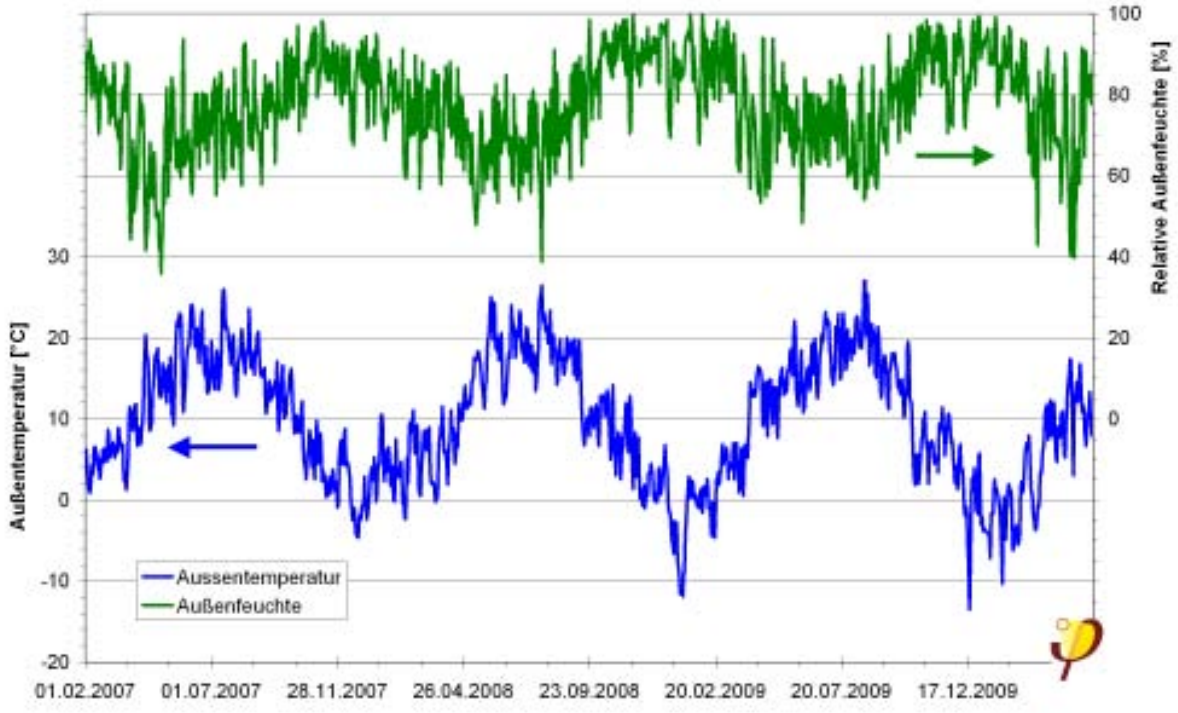


Abbildung 35: Tagesmittlere Außentemperatur und relative Außenfeuchte im Untersuchungszeitraum.

Am Verlauf der Außentemperatur ist abzulesen, dass es sich 2007/2008 um einen recht milden Winter mit nur wenigen Frosttagen gehandelt hat. Die folgenden beiden Winter verfügten über deutlich mehr Frosttage. Dabei ist interessant, dass die „Heiz-

tage“ (hier: Tage unterhalb 12 °C Außentemperatur) im ersten Winter (2007/2008) trotzdem am häufigsten waren. Untersucht man die Anzahl der „kalten Tage“, hier mit Temperaturen unter Null Grad gewählt, ergibt sich ein anderes Bild: Die Anzahl steigt in den drei Wintern jeweils an, die meisten Frosttage gab es mit 54 im Winter 2009/2010.

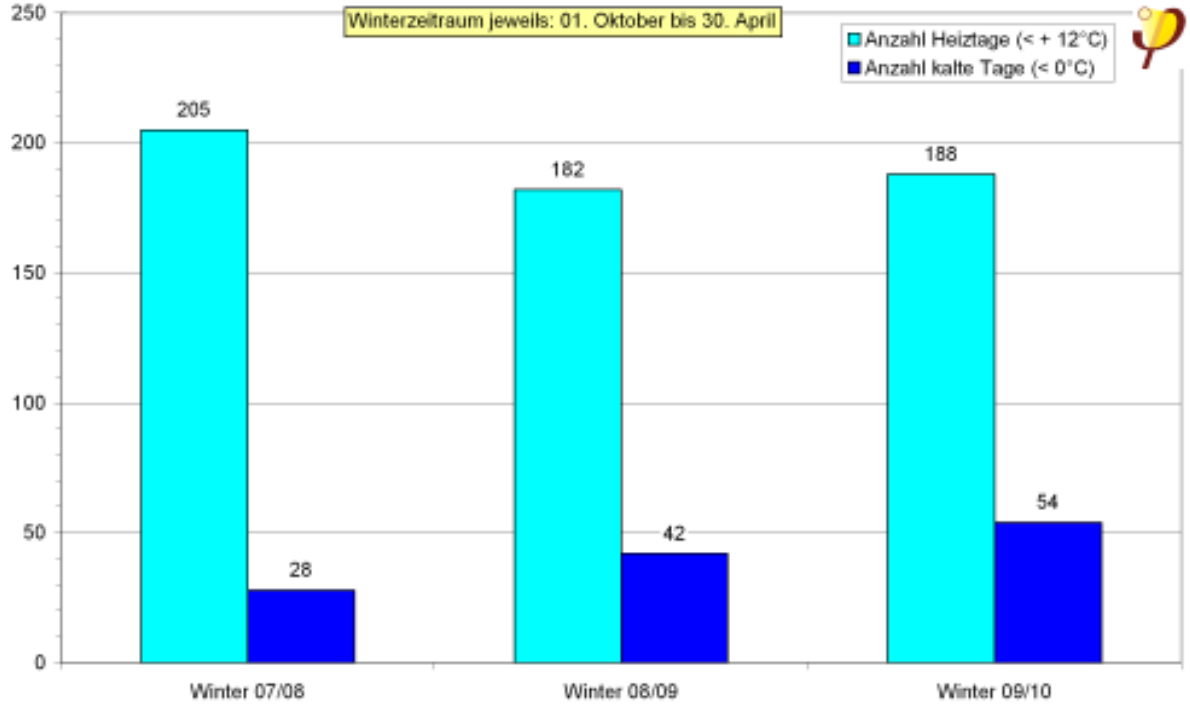


Abbildung 36: Anzahl der Heiztage (< 12 °C) und der Tage unter 0 °C in den drei vollständig untersuchen Winterzeiträumen (jeweils 01. Oktober bis 30. April).

Es können auch Heizgradtagessummen (GTZ = Gradtagszahlen) zur Beurteilung des Klimas während des Messzeitraumes ermittelt werden. Wenn die tagesmittleren Außenlufttemperaturen niedriger als 12 °C betragen („Heizgrenztemperatur“), wird jeweils die Differenz der Innentemperatur minus der tatsächlichen tagesmittleren Außentemperatur gebildet. Dabei wird die Innentemperatur fest mit 19 °C angesetzt. Diese Temperaturgrenzen stellen für Wohnhäuser in Passivhausqualität keine realistischen Grenzwerte dar. Aus Vergleichbarkeitsgründen mit anderen Projekten oder auch langjährigen Standarddatensätzen ist diese Wahl hier beibehalten worden. Aus den berechneten Daten werden jeweils Wintersummen (01. Oktober bis 30. April) gebildet.

Jetzt zeigt sich, dass die drei Winter nicht besonders unterschiedlich sind; die Summen der GTZ liegen nah beieinander. Der kühlste Winter war der letzte (2009/ 2010), der wärmste der mittlere (2008/2009). Die Summen sind in Abbildung 37 dargestellt.

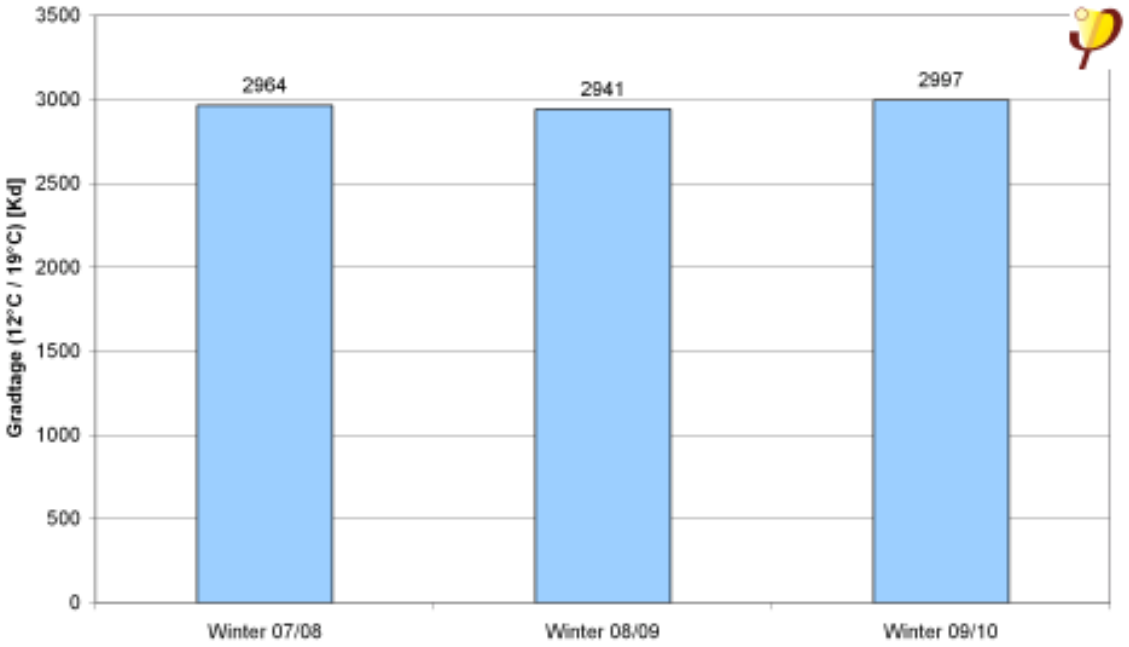


Abbildung 37: Gradtagssummen (12 °C/19 °C) in den drei vollständigen Wintern (jeweils 1. Oktober bis 30. April)

Globalstrahlung

In diesem Zusammenhang ist auch die Global- bzw. Solarstrahlung von Interesse. Diese trägt in einem Passivhaus im Normalfall aufgrund des niedrigen Heizwärmeverbrauchs nennenswert zur Deckung des Wärmeverlustes bei. Die Untersuchung der Strahlungsleistung, insbesondere der Unterschied zwischen den Sommer- und Winterzeiträumen wird hier detailliert durchgeführt. Der große Unterschied zwischen sommerlicher und winterlicher Einstrahlung ist die war ein Grund zur Wahl des Versorgungskonzeptes mit der jahreszeitlichen Energiespeicherung.

Alle Angaben der spezifischen Solarstrahlung und spezifischen Solarerträge in diesem Abschnitt beziehen sich auf eine **Einstrahlungsfläche von 1 m²** und nicht wie bei allen anderen Angaben in diesem Bericht auf die Energiebezugsfläche des Gebäudes. Es muss außerdem berücksichtigt werden, dass es sich um die Strahlungsleistungen handelt die in Kollektorebene gemessen wurden (siehe oben) und nicht auf die Horizontale.

Die tagesmittleren Strahlungsleistungen des Messzeitraumes im nächsten Bild (Abbildung 38) zeigen die typischen Jahresgänge. Die Monatsummen der Globalstrahlung liegen im Untersuchungszeitraum zwischen minimal 23 kWh/(m² Monat) im Dezember 2008 und maximal 184 kWh/(m² Monat) (Mai 2008). Wie Abbildung 39 zeigt gibt es zwischen den gleichen Monaten der verschiedenen Jahre z.T. große

Unterschiede in den Strahlungssummen (z.B April). Die Summen der Globalstrahlung der jeweiligen Winterzeiträume (01. Oktober bis 30. April) sind allerdings nicht besonders unterschiedlich. In Abbildung 40 ist zu sehen, dass sie zwischen 420 und 434 kWh/(m² Winter) betragen. Der strahlungsärmste Winter ist demnach der Winter 08/09, der sich oben allerdings gleichzeitig als der mildeste der drei Winter herausgestellt hat.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass die Unterschiede zwischen den drei Wintern bei dieser Art der Analyse relativ gering sind. Für ein energieeffizientes Gebäude ist entscheidend, wie groß das nutzbare Strahlungsangebot an kalten Tagen ist und wie lange trübe Zeiträume um Null Grad anhalten; nur die Gradtagssummen und Strahlungsdaten geben darüber keine Auskunft. Aufgrund der sehr hohen Zeitkonstanten von Passivhäusern haben kurzzeitige extreme Wetterbedingungen nur geringen Einfluss. Die Zusammenhänge sind in [Feist 2005] im Detail untersucht und an Messergebnissen von über 150 Wohneinheiten nachgewiesen. Aus diesem Grund haben wir in 3.1.1 die Auswirkung der gemessenen Wetterbedingungen auf den Heizwärmebedarf nach dem PHPP des Gebäudes untersucht und dargestellt.

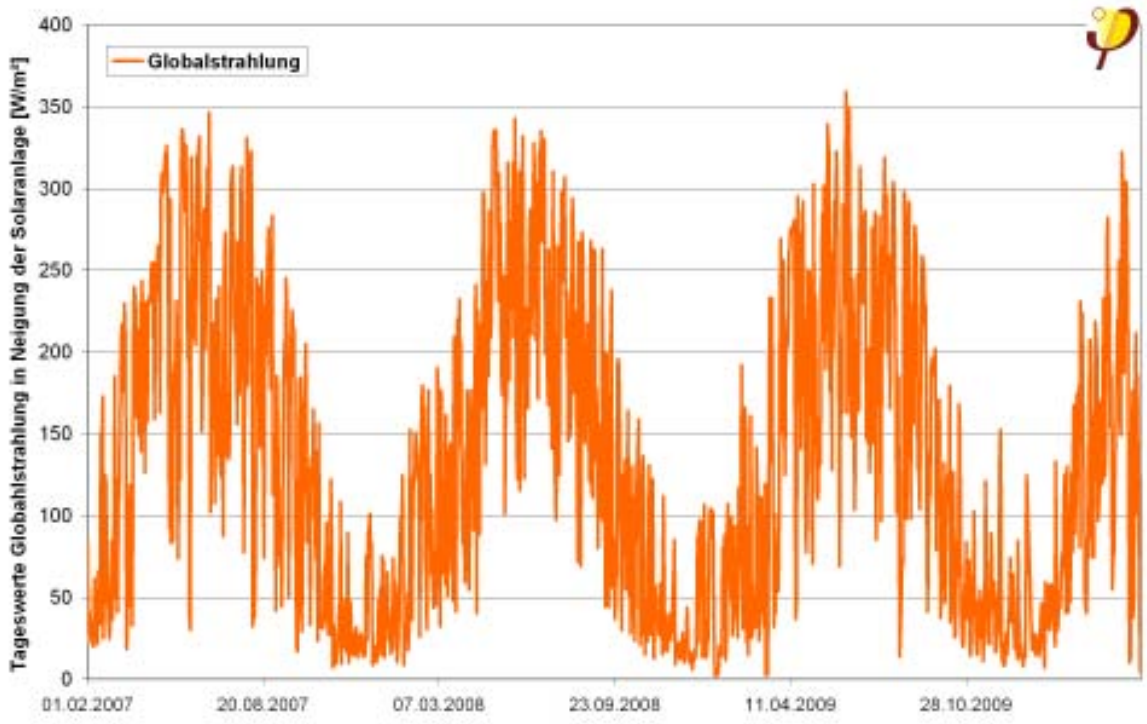


Abbildung 38: Tageswerte der Globalstrahlung in der Ebene der thermischen Solaranlage. Gut erkennbar ist jeweils das „Winterloch“, die Ursache für die Notwendigkeit einer alternativen Wärmebereitstellung im Winter

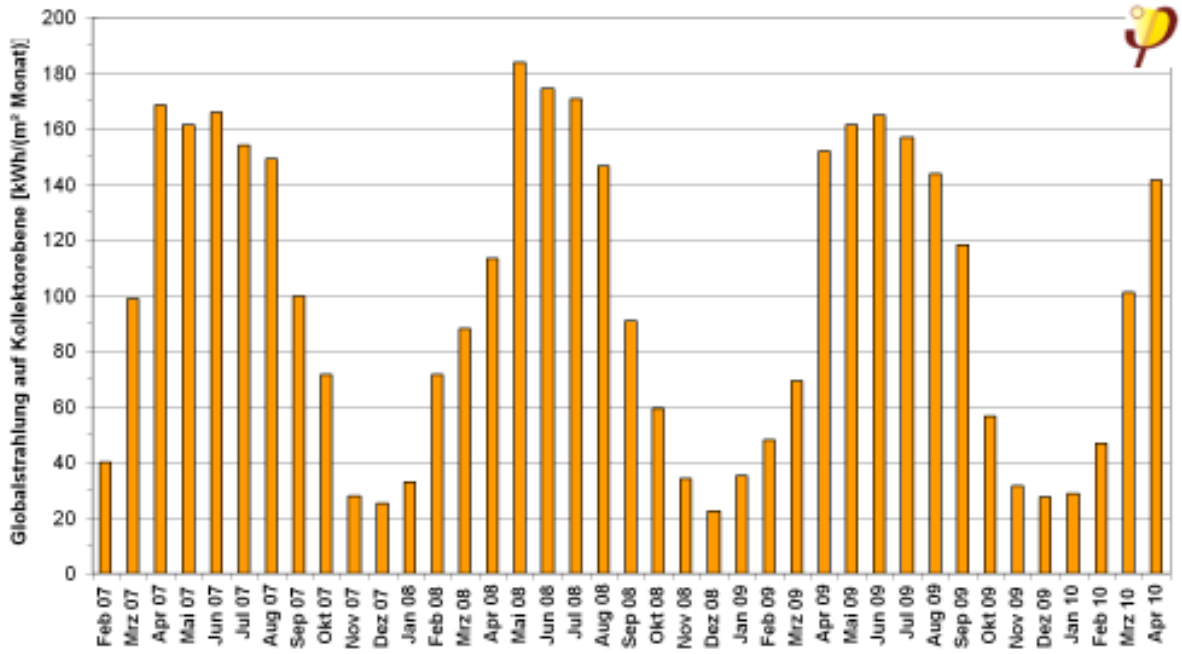


Abbildung 39: Monatssummen der Globalstrahlung in der Ebene der thermischen Solaranlage.

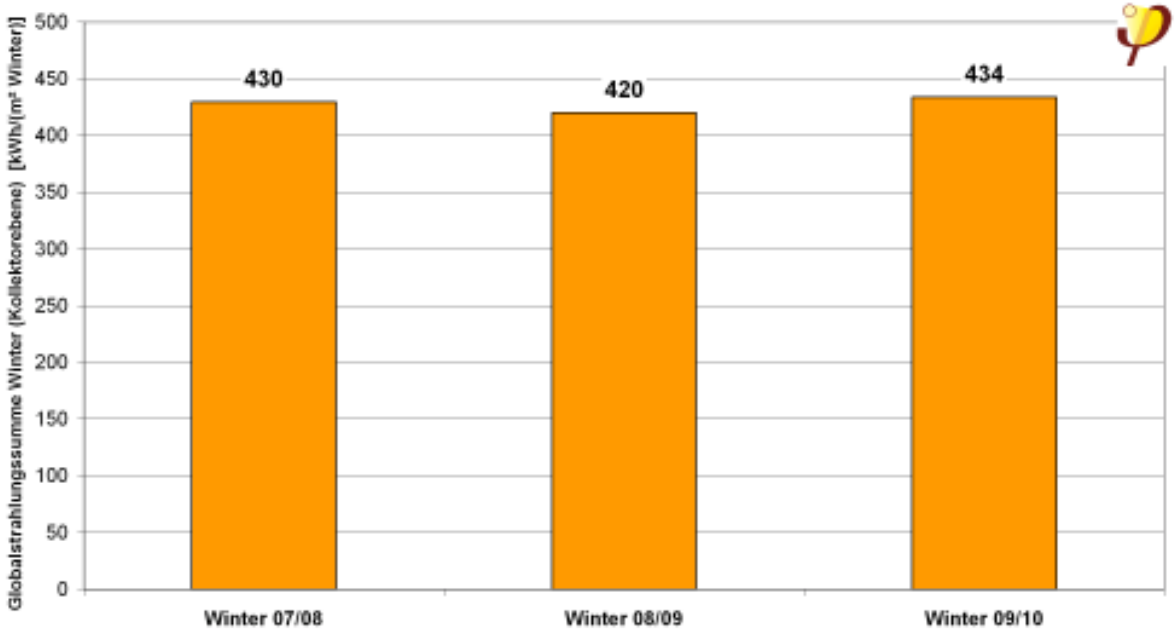


Abbildung 40: Wintersummen (jeweils 7 Monate: Oktober bis April) der Globalstrahlung in der Ebene der thermischen Solaranlage.

Globalstrahlung Sommer

Da bei diesem Gebäude insbesondere die Solarenergie des Sommers aktiv genutzt werden soll, wird diese hier separat untersucht. Als Sommermonate werden die fünf Monate Mai bis September bezeichnet. Die Sommersummen der Globalstrahlung liegen mit Werten zwischen 745 bis 766 kWh/(m² Sommer) rund 41 % bis 45 % über den Summen der jeweils 7 Wintermonate.

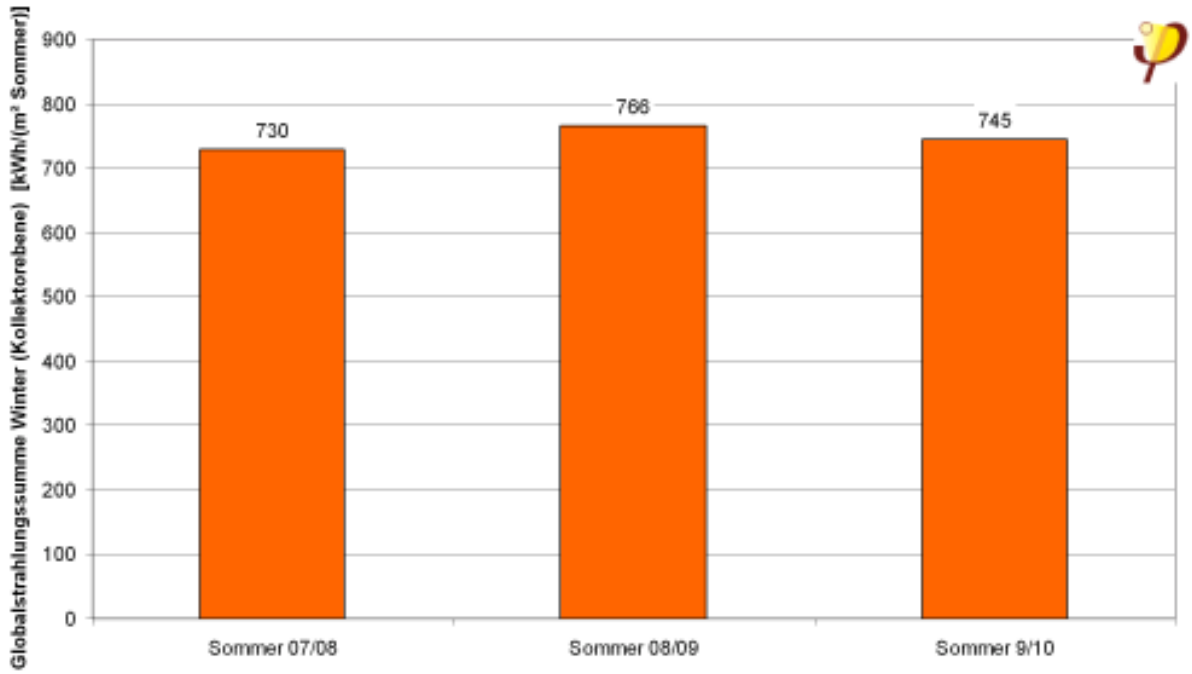


Abbildung 41: Sommersummen (jeweils 5 Monate: Oktober bis April) der Globalstrahlung in der Ebene der thermischen Solaranlage.

Die Ganzjahressummen der Globalstrahlung in Kollektorebene ergeben sich als Summen des jeweiligen Winter- und Sommerwertes und sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 7: Globalstrahlung in Kollektorebene [kWh/(m²a)]

	Globalstrahlung in Kollektorebene [kWh/(m²a)]
Mai 2007 bis April 2008	1160
Mai 2008 bis April 2009	1186
Mai 2009 bis April 2010	1179

Mittlere Solarstrahlung Winter und Sommer

Da die Sommer- (5 Monate) und Winterzeiträume (7 Monate) nicht gleich lang sind, ist ein Vergleich der Solarstrahlung über die in diesen Zeiten eingestrahlten Energie nur begrenzt aussagekräftig. Daher werden hier zusätzlich die mittleren spezifischen Strahlungsleistungen für die Zeiträume dargestellt (in Kollektorebene). Damit wird nochmals deutlich, dass der Unterschied zwischen den drei Wintern wie auch zwischen den drei Sommern nur sehr gering sind.

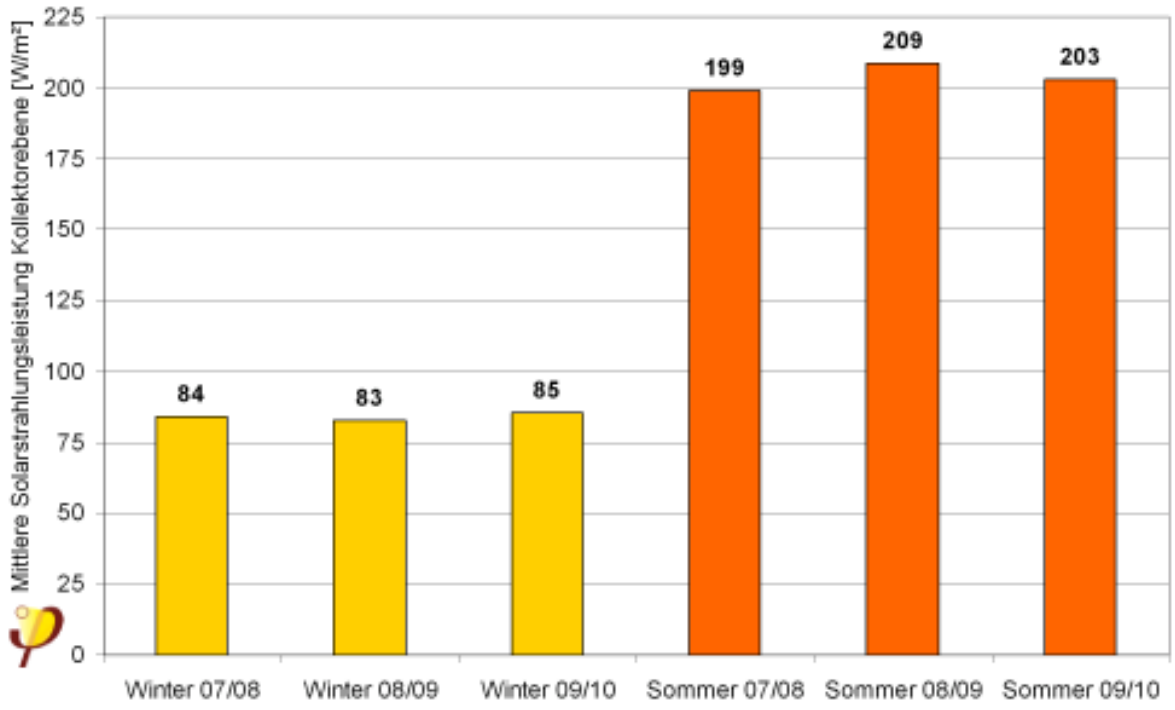


Abbildung 42: Mittlere spezifische Solarstrahlungsleistung in den Winter- und Sommerzeiträumen.

3.1.1 Heizwärmebedarf mit gemessenen Wetterdaten

Es sollen die Auswirkungen der Wetterbedingungen während der drei Bilanzjahre auf den Heizwärmebedarf bzw. -verbrauch des Gebäudes untersucht werden. Damit können die unterschiedlichen Winter verglichen werden. Wie zuvor gezeigt ist die Analyse der Wetterdaten dazu allein nicht geeignet. Entscheidend sind besonders bei energieeffizienten Gebäuden vielmehr die Auswirkungen der Außentemperatur und Strahlungsdaten auf die Gebäudeenergiebilanz. Für die drei Jahreszeiträume wurden dafür die gemessenen Wetterdaten verwendet. Die Globalstrahlung (Messung in der Kollektorebene mit 16° Neigung gegenüber der Horizontalen) wurde umgerechnet auf die horizontale Messebene. Aus den Strahlungs- und Temperaturmessdaten wurden dann Monatssummen bzw. -mittelwerte gebildet und im PHPP des Gebäudes eingesetzt. In allen Fällen wurde das Jahresverfahren angewendet.

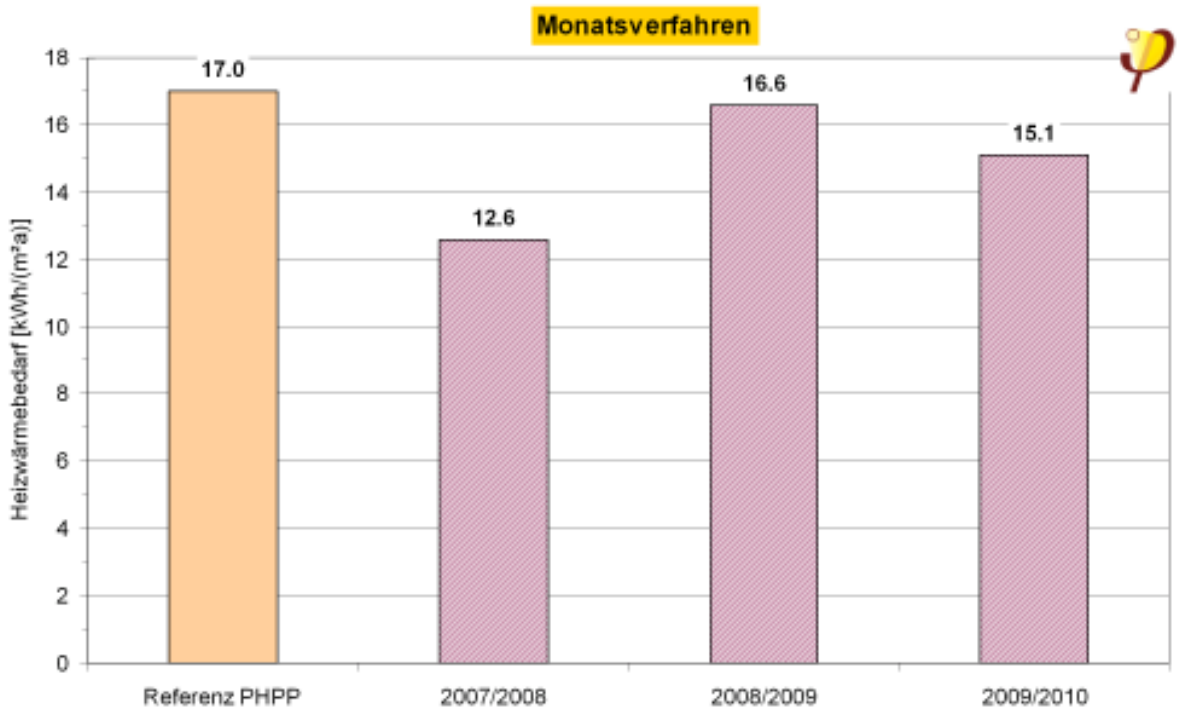


Abbildung 43: Vergleich der Heizwärmebedarfswerte des Gebäudes nach PHPP Berechnung (Monatsverfahren) für den Referenzfall (Standardklima Deutschland) und unter Verwendung der gemessenen Wetterdaten (Berechnung für 20 °C Innentemperatur).

Es zeigt sich zuerst, dass der Heizwärmebedarf in allen drei Jahren niedriger liegt als im Referenzfall (Standardklima Deutschland nach DIN 4108 Teil 6). Der Heizwärmebedarf im ersten Jahr fällt deutlich niedriger aus als in den beiden nachfolgenden. Dabei führt der Winter 2008/2009 zum relativ höchsten Heizwärmebedarf. Somit zeigt sich nochmals, dass die Gradtagszahluntersuchung von oben keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt. Der im PHPP enthaltene Klimadatensatz, der für die Planung des Gebäudes verwendet wurde, erscheint für diesen Standort eher pessimistisch.

3.2 Temperaturen

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die wichtigsten Temperaturmessdaten gegeben. Dabei werden hauptsächlich tagesmittlere und in Sonderfällen stundenmittlere Temperaturen bzw. 10-Minuten Direktdaten der unterschiedlichen Messstellen dargestellt und interpretiert.

3.2.1 Temperaturen Solekreis

Die Vor- und Rücklauftemperaturen des Erdreich-Soleregisters als Wärmesenke der Solaranlage und als Wärmequelle für die Wärmepumpe werden hier untersucht. Dazu wurden in den 10-Minuten-Messdaten nur die Vor- und Rücklauftemperaturen

herausgefiltert, die bei Betrieb des Kreislaufes zur Wärmeentnahme (WMZ „Entnahme Erde“, Durchfluss größer 1 Liter/Minute) anstanden. Die herausgefilterten Stillstandstemperaturen bringen diesbezüglich keine verwertbare Aussagen, da sie sich immer wieder langsam an die Raumtemperatur annähern. Die Temperaturen der Erdreichbeladung (Beladung Solekreis von der Solaranlage) werden ebenfalls nach der gleichen Methode ausgefiltert (WMZ „Einspeisung Erde“, Durchfluss größer 1 Liter/Minute). Diese gefilterten Vor- und Rücklauftemperaturen des Solekreislaufs werden dann zu Tagesmittelwerten zusammengefasst und sind in Abbildung 44 dargestellt.

Mit „Vorlauf“ wird hier der Einlauf in das Soleregister bezeichnet. Im Sommer, bei überwiegender Einspeisung von Solarwärme unter die Bodenplatte, sind die Vorlauftemperaturen höher als die Rücklauftemperaturen. Im Sommer passen die Bezeichnungen damit zu der klassischen Begrifflichkeit. Im Winter dagegen – bei überwiegender Wärmeentnahme - kehren sich die Temperaturen erwartungsgemäß um: Die Vorlauftemperatur des Erdregisters ist bei Betrieb niedriger als der Rücklauf. Mit Hilfe der Wärmepumpe (WP) wird dem Erdreichwärmespeicher Energie über den Rücklauf des Soleregisters entzogen.

In Abbildung 44 sind zuerst die Jahrestemperaturgänge deutlich zu erkennen. Erwartungsgemäß liegen die Erdreich-Entnahmetemperaturen im Winter deutlich niedriger als die bei winterlichen Beladungen. Die sehr starken sommerlichen Streuungen und zum Teil höheren Temperaturen der VL-Temperatur bei Energieentnahme (grün) haben ihre Ursache in den zum Teil nur sehr kurzen Laufzeiten der Solepumpe im Sommer (siehe Erklärung Abbildung 46 und weiter unten in diesem Abschnitt).

Im dritten Winter (Januar/Februar 2010) gehen die Entnahme-Vorlauftemperaturen minimal bis auf -1,5 °C zurück (Tagesmittelwert). Zuvor lagen sie immer über dem Nullpunkt. Die Regelung richtet sich aufgrund eines fehlenden Erdreichsensors nach der Rücklauftemperatur des Solekreislaufes (Merke: Durch die gewählten Bezeichnung VL/RL gilt hier im Winter RL-Temp. > VL-Temp. Solekreis) . Die tagesmittleren Rücklauftemperaturen betrugen minimal + 2,1 °C.

Im Diagramm ist der Beginn der Beheizung (Anschalten der Heizkreispumpe für die Fußbodenheizkreise) zu erkennen. Ab dem 29.09.2008 sowie dem 17.10.2009 liegen die tagesmittleren VL- und RL-Temperaturen bei Entladung sprunghaft niedriger als in den Monaten vorher mit der nur zeitlich begrenzten und geringeren Entladung des Erdreichwärmespeichers. Sie fügen sich zu einer klarer erkennbaren Zeitentwicklung als die verstreuten Sommerpunkte der Entladung.

In den Sommermonaten dagegen fügen sich die dann dominierenden Temperaturen bei Beladung des Erdreichwärmespeichers zu einer deutlich sichtbaren „Beladekurve“ (orange und blaue Markierungen). Während der Sommerzeiten wird das Erdreich mit VL-Temperaturen bis um die 30 °C (orange) beladen.

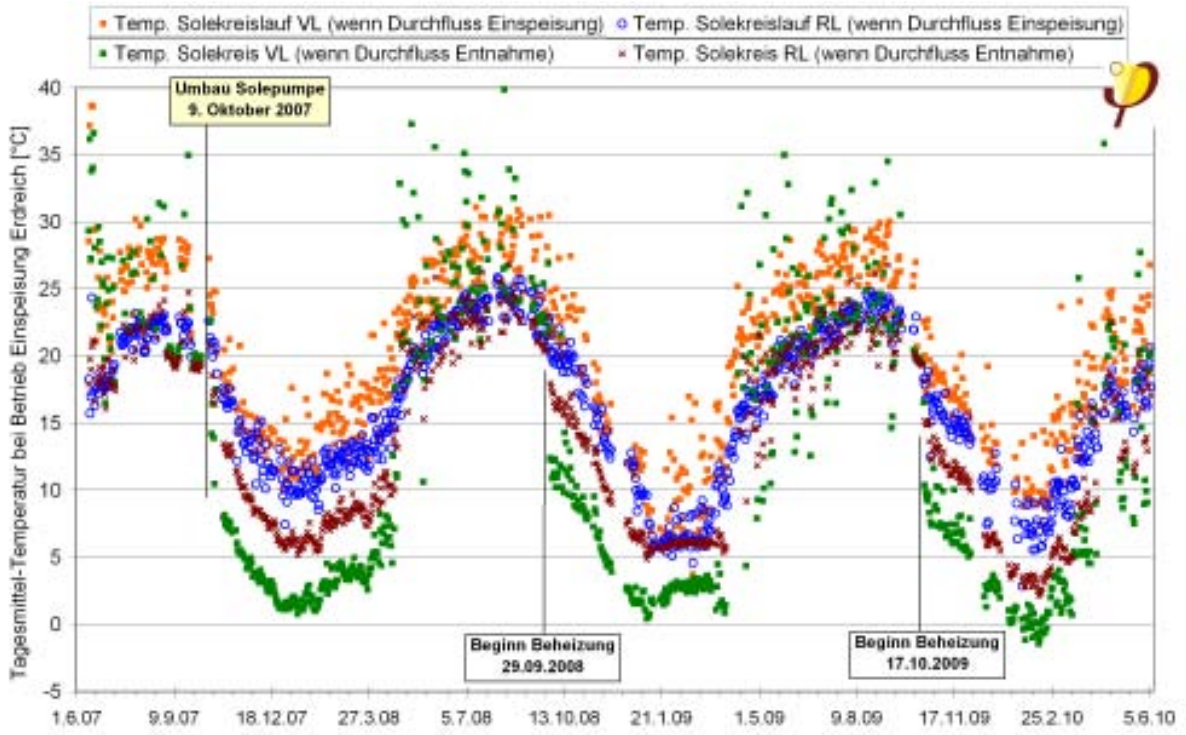


Abbildung 44: Tagesmittlere Vor- und der Rücklauftemperatur des Soleregisters bei Durchflüssen „Beladung“ und „Entnahme“ wenn die Volumenströme jeweils größer als 1 Liter pro Minute sind. Als Vorlauf wird hier die Sole beim Eintritt in das Erdregister, als Rücklauf nach dem Durchlaufen des Soleregisters bezeichnet.

Die tagesmittleren sommerlichen Temperaturdifferenzen zwischen VL- und RL-Temperaturen („Temperaturspreizung“) bei Energieeinspeisungsbetrieb (Beladung Erdreich) bewegen sich überwiegend in einem Feld zwischen 2 bis 6 K (Abbildung 45). Bei der Energieentnahme in den Wintermonaten liegen die Temperaturdifferenzen ebenfalls in ganz ähnlicher Größe. Hier ist allerdings insbesondere ab dem zweiten Winter deutlich eine Verringerung der Temperaturdifferenzen abzulesen. Dies deutet auf einen im Laufe der Winterzeit abnehmenden Energieinhalt des Erdreichwärmespeichers hin.

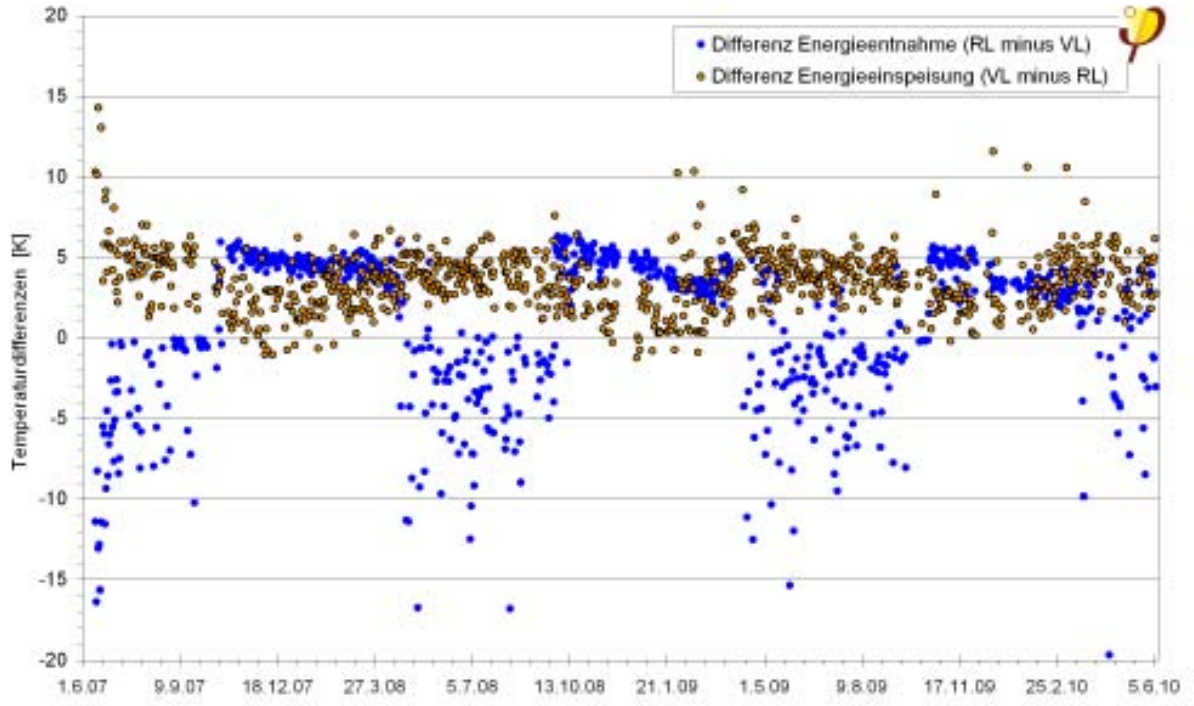


Abbildung 45: Tagesmittlere Temperaturdifferenzen zwischen VL- und RL-Temperatur („Temperaturspreizung“) für den Einspeise- und für den Entnahmebetrieb (für die Daten aus Abbildung 44).

Es soll hier noch geklärt werden, welche Ursache die relativ großen Temperaturschwankungen insbesondere der VL-Temperatur bei Energieentnahme in den Sommermonaten hat. Diese sind in Abbildung 44 und Abbildung 45 gut zu erkennen. Wie bereits geschildert überwiegen im Sommer die Beladungszeiten des Erdreichwärmespeichers, es wird nur selten Energie entnommen. An den drei Beispieltagen in Abbildung 46 (10-Minuten Daten) wird dies deutlich: Die Wärmepumpe hat pro Tag nur jeweils eine sehr kurze Betriebszeit von unter 10 Minuten. **Das ist keine sinnvolle Betriebsweise, da es zu keinen nennenswerten Energiebeiträgen führen kann, sich aber negativ auf den COP bzw. die Arbeitszahl niederschlägt.** In Abbildung 46 ist zu sehen, dass der Betrieb der Wärmeentnahme deutlich überwiegt. Da für Abbildung 44 die Temperaturen nur bei Durchfluss am entsprechenden WMZ dargestellt wurden, führt der so entstandene Tagespeak jeweils zu einer entsprechend wenig aussagekräftigen Tagesmitteltemperatur.

Bei den deutlich höheren Temperaturen, die in den Sommer- und Übergangszeiten gemessen wurden, handelt es sich damit um Temperatureinflüsse durch die Erdreichbeladung mit Solarwärme (siehe Abbildung 47 mit gleicher Zeitskala). Da es auch Zeiten gibt, in denen nach der solaren Erdreichbeladung bald eine Entnahme erfolgt, liegen hier Temperaturen vor, die höher sind als die Erdreichtemperaturen (vgl. folgender Abschnitt Erdreichtemperaturen).

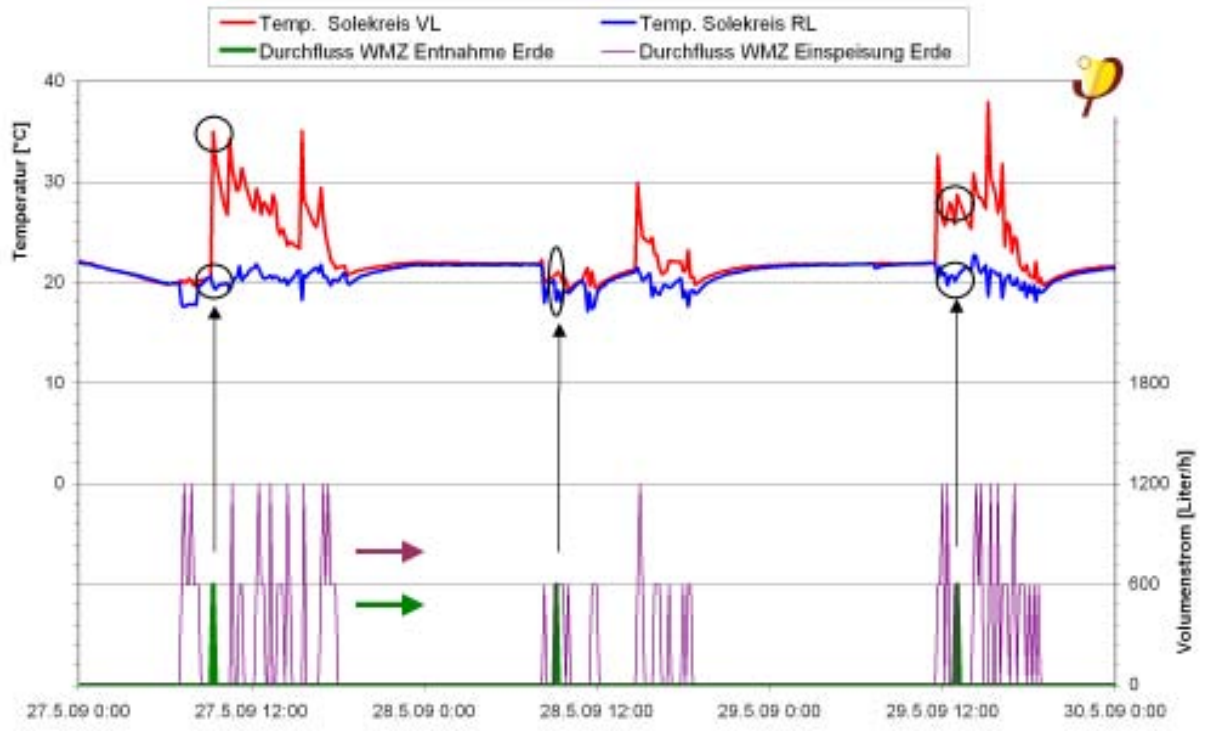


Abbildung 46: Temperaturen des Solekreises und Durchflüsse von zwei WMZ an drei typischen Sommertagen im Mai 2009 (10-Minuten-Daten).

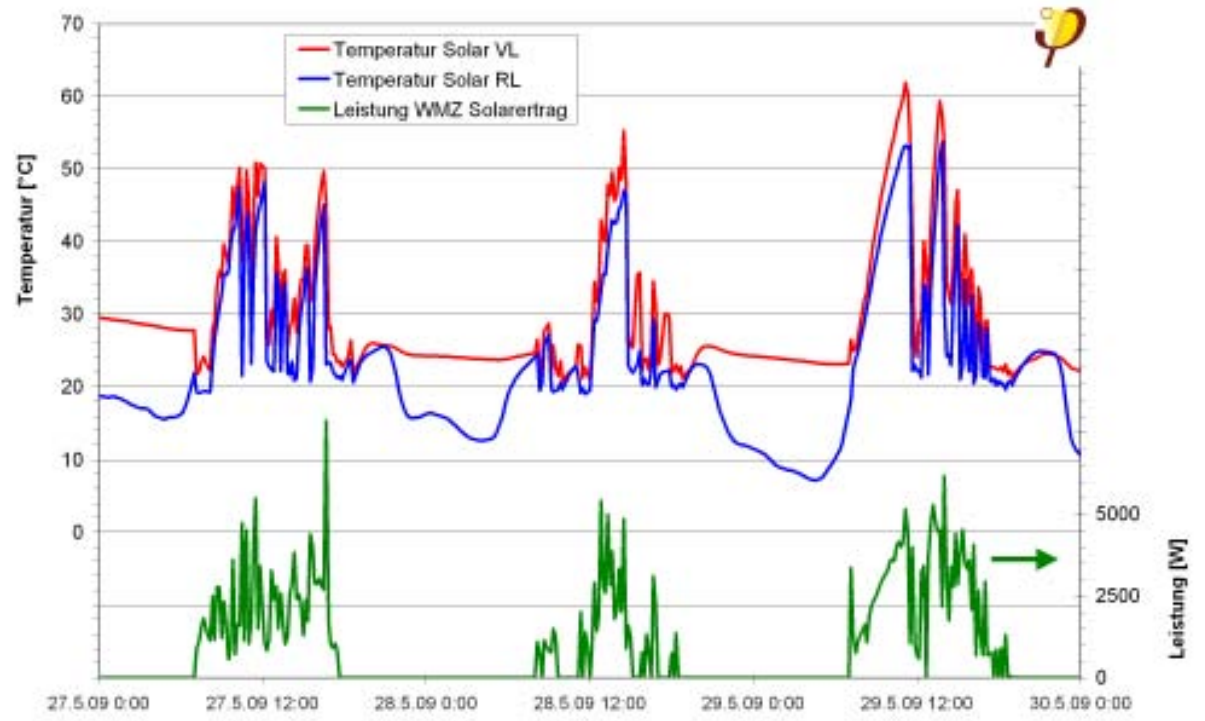


Abbildung 47: Messdaten der Solaranlage (VL- und RL-Temperatur, Momentanleistung) an den gleichen Sommertagen wie die Daten in Abbildung 46 (10-Minuten Daten).

Ganz anders stellt sich die Energieentnahme aus dem Erdreichwärmespeicher in der **Winterzeit** dar. Hier sind als Beispiel drei Tage im Januar 2010 dargestellt (Abbildung 48). Täglich mehrmals fordert die Wärmepumpe Energie aus dem

Erdreich an mit längeren Laufzeiten. Dies führt immer zu einem sofortigen Absinken der VL- und RL-Temperatur, die sich nach dem Abschalten jeweils langsam wieder der Technikraumtemperatur anpassen. Nur um die Mittagszeit des dritten Tages (18.01.2010) wird das Erdreich mit Solarwärme beladen. Dies führt zur Umkehr der Temperaturdifferenz, die VL-Temperatur ist erwartungsgemäß höher als die RL-Temperatur. Kurz danach wird dem Erdreich aber schon wieder Wärme entzogen. An der Abbildung wird deutlich, dass die Wärmepumpe relativ stark taktet und es nicht zu längeren Laufzeiten kommt. Die vorgegebenen Warmwasserspeicher-Temperaturen werden aufgrund der vorhandenen Leistung der Wärmepumpe relativ schnell erreicht. Weitere Untersuchungen zum Verhalten der Wärmepumpe sind im Abschnitt 3.3 zu finden.

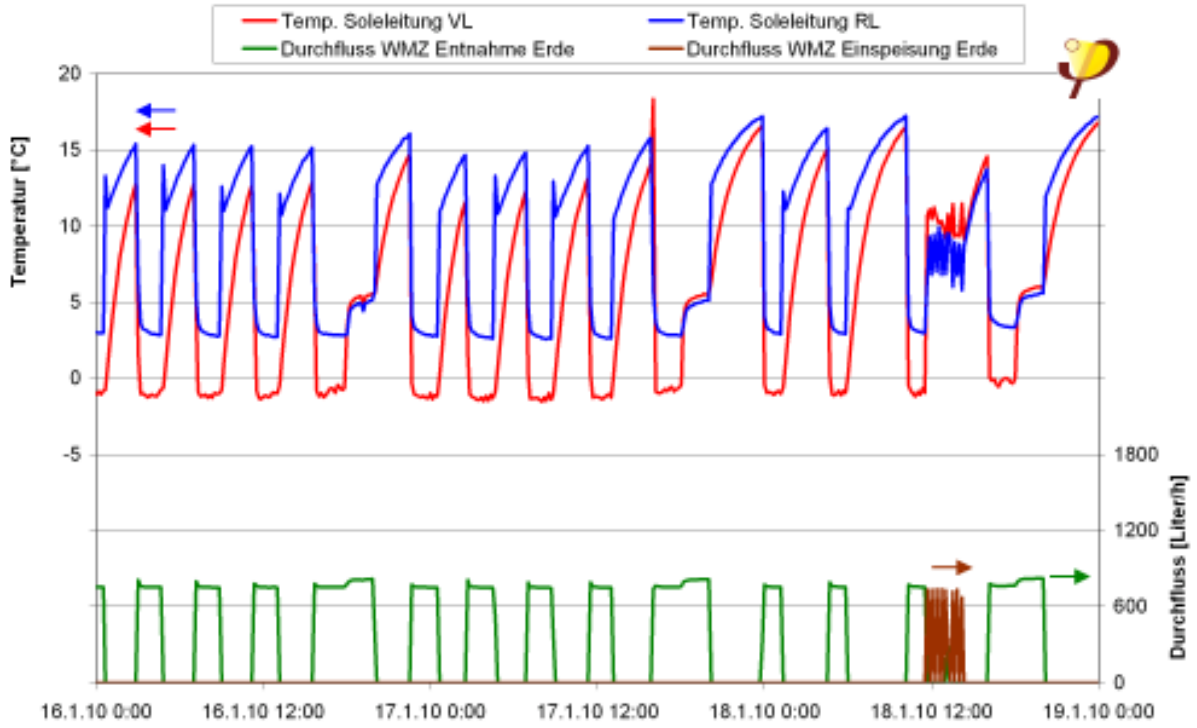


Abbildung 48: Temperaturen des Solekreises und Durchflüsse vom WMZ „Entnahme Erde“ an drei typischen Wintertagen im Januar 2010 (10-Minuten Daten).

Die stundenmittleren Temperaturen des Solekreislaufes (gesamter Messzeitraum) zeigen die folgenden niedrigsten Vorlauftemperaturen in den drei untersuchten Wintern:

Tabelle 8: Niedrigste Stundenmittlere Solekreis-Vorlauftemperaturen in den drei untersuchten Winterperioden und zugehörige Rücklauftemperaturen

Zeitraum	Zeitpunkt	Niedrigste stunden-mittlere Vorlauf-temperatur [°C]	Rücklauf temperatur [°C]	Spreizung [K]
Winter 07/08	15.01.2008 03:00 Uhr	+ 0,48	+ 6,1	5,6
Winter 08/09	07.01.2009 05:00 Uhr	- 0,12	+ 4,14	4,3
Winter 09/10	15.02.2010 08:00 Uhr	- 2,2	+ 1,6	3,8

Die maximal gemessene stundenmittleren Temperatur im Sommer betrug knapp 50 °C.

3.2.2 Erdreichtemperaturen

In diesem Abschnitt werden die zahlreichen gemessenen Erdreichtemperaturen der Messsensoren unter und neben dem Gebäude dargestellt und ausgewertet.

Als erstes werden die an der Ostkante des Gebäudes eingebauten Sensoren untersucht. Diese verfügen neben dem Gebäude - durch die leichte Hanglage - über eine stärkere Erdreichüberdeckung als die Sensoren in der Südachse (vgl. Abbildung 25 bis Abbildung 27). Die Temperaturen der Mess-Achse Ost 1 und Ost 2 sind in Abbildung 49 für den gesamten Messzeitraum dargestellt. Unter der Bodenplatten-dämmung zeigt sich im Sommer bei der Beladung des Erdreichwärmespeichers eine stärkere Aufspreizung der Temperaturen in den unterschiedlichen Höhen als im Winter. In der Ebene der Soletauscherrohre (Niveau: „Mitte“, Position siehe Abbildung 50) ergeben sich mittlere Temperaturen bis maximal etwa 20/22 °C. Die tieferen Ebenen (Niveau: „unten“ und „tief“) liegen im Hochsommer 2 bis 4 K niedriger. Dabei ist zu erkennen, dass die weiter am Rand liegenden Bereiche (Ost_2) in den unterschiedlichen Tiefen jeweils eindeutig niedrigere Temperaturen erreichen als die Bereiche mit weiterer Entfernung zum Randbereich (Ost_1). Der Randeinfluss ist also deutlich zu verzeichnen. Die Sensoren am unteren Rand der Dämmschürze und unter der Dämmschürze haben eine stärke Ankopplung an das umliegende Erdreich. Im Winter werden die Bereiche im inneren (Ost_1) rund 1 K kühler als die am Rand (Ost_2).

Es ist zu erkennen, das der Erdreichwärmespeicher in jedem Winter stärker entladen wird. Im ersten Winter lag die Minimaltemperatur des Sensors „Ost_1 mitte Sauberkeitsschicht“ bei 7 °C, im Folgejahr bei 5 °C und im Winter 2009/10 dann nur

noch bei 3,2 °C. Damit sind die tagesmittleren Temperaturen noch deutlich von der Null-Grad Frostgrenze entfernt. Die in den Sommern erreichten Temperaturen betragen maximal 22 °C. Die Solaranlage bietet deutlich höhere Temperaturen an. Der Ursache, warum nicht höhere Erdreichtemperaturen durch die solare Beladung erreicht wurden, wird im Abschnitt „Simulation“ nachgegangen.

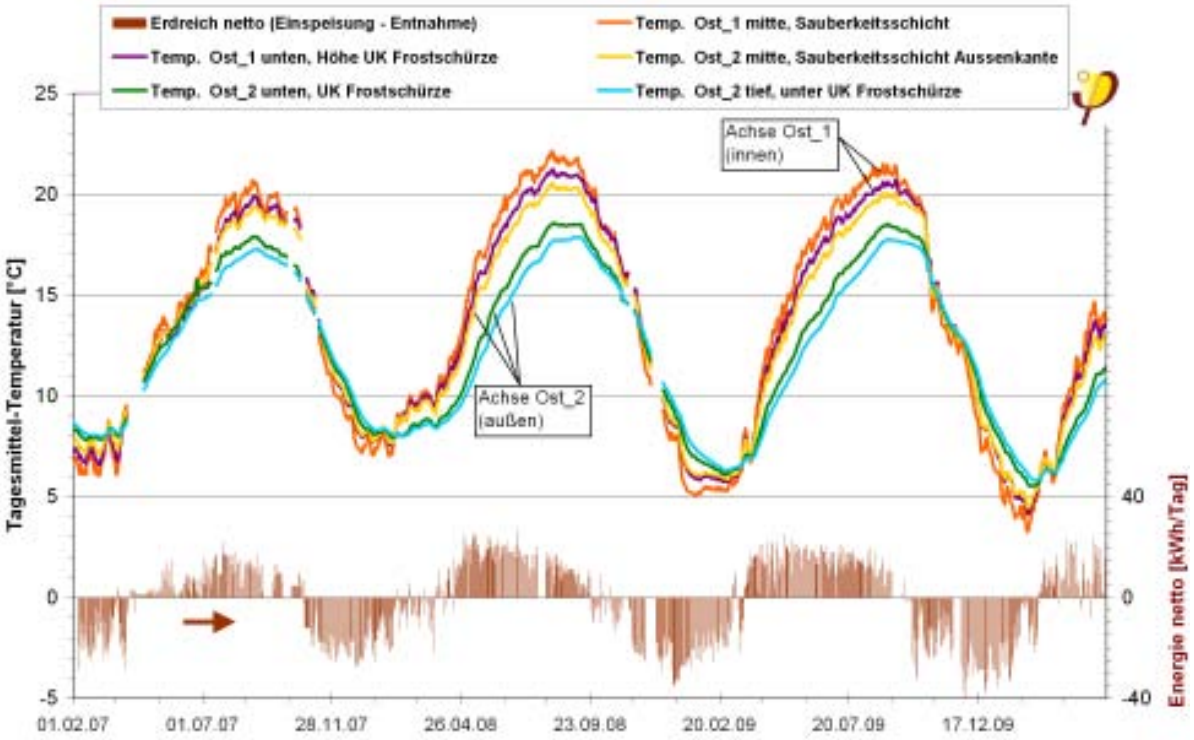


Abbildung 49: Tagesmittlere Temperaturen der Messachsen Ost 1 und 2 in den unterschiedlichen Höhen sowie die täglichen Nettoerträge der Energieeinspeisung minus der Energieentnahme unter der Bodenplatte.

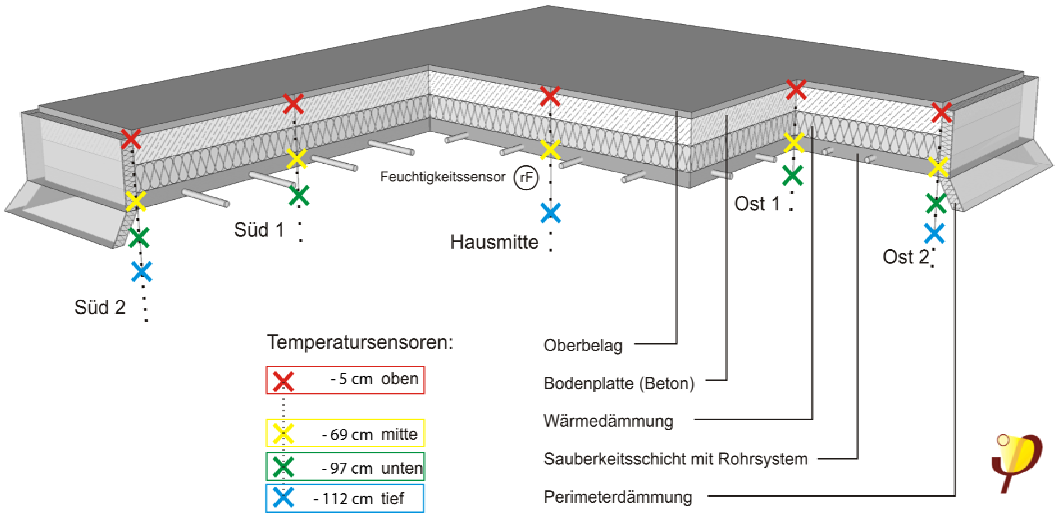


Abbildung 50: Skizze des Bodenaufbaues des Sohlewärmeübertragers mit den Positionen der Temperatur- und der Feuchtemessung (Wiederholung der identischen Abbildung 24) .

Zusätzlich zu den Erdreichtemperaturen sind in Abbildung 49 auch die täglichen „Netto“-Energiemengen die in das Erdreich eingespeisten bzw. entnommen werden dargestellt. Diese „Netto“-Energiemengen sind aus der täglich eingespeisten minus der täglich entnommenen Wärmemenge berechnet (negative Werte stellen also einen Wärmeentzug des Tages dar) . Die Erdreichtemperaturen fächern sich breiter auf, sobald die eingespeicherten Energiemengen im Frühjahr größer werden. Es ist auch zu erkennen, dass mit dem beginnenden netto Wärmeentzug die Erdreichtemperaturen absinken.

Temperaturen Süd

Bei der Darstellung der Temperaturen im Bereich Süd (Achse Süd 1 und 2) in Abbildung 51 zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den beiden Ostachsen. Das Bild der Temperaturgänge über die Jahreszeiten ist erwartungsgemäß sehr ähnlich wie in der Ostachse. Auch die Maxima (knapp 22 °C) und Minima (3,6 °C) liegen in fast der gleichen Größe.

Die Temperaturen der Achse Süd_1, welche sich in größerer Entfernung von der Gebäudekante befinden, zeigen in den Sommerzeiten etwas höhere Temperaturen als die weiter außen liegenden Messpunkte (Süd_2). Die Unterschiede sind allerdings mit Werten um knapp 1 K geringer. Im Unterschied zur Ostachse bleiben hier die Temperaturen im inneren (Süd_1) aber auch im Winter über denen an der Gebäudekante.

Die geringere Abkühlung im Osten resultiert vermutlich durch die stärkere Erdreich-Überdeckung an der Ostseite und die zusätzlich ca. 15 cm tiefere Sensorposition (tief) als im Süden.

Der Temperaturunterschied der Lagen Süd_2 „Unten“ und „Tief“ ist bei den hier betrachteten Tagesmittelwerten durchgehend nur minimal. Die Sensoren befinden sich in einem Abstand von nur knapp 20 cm, was dies erklärt.

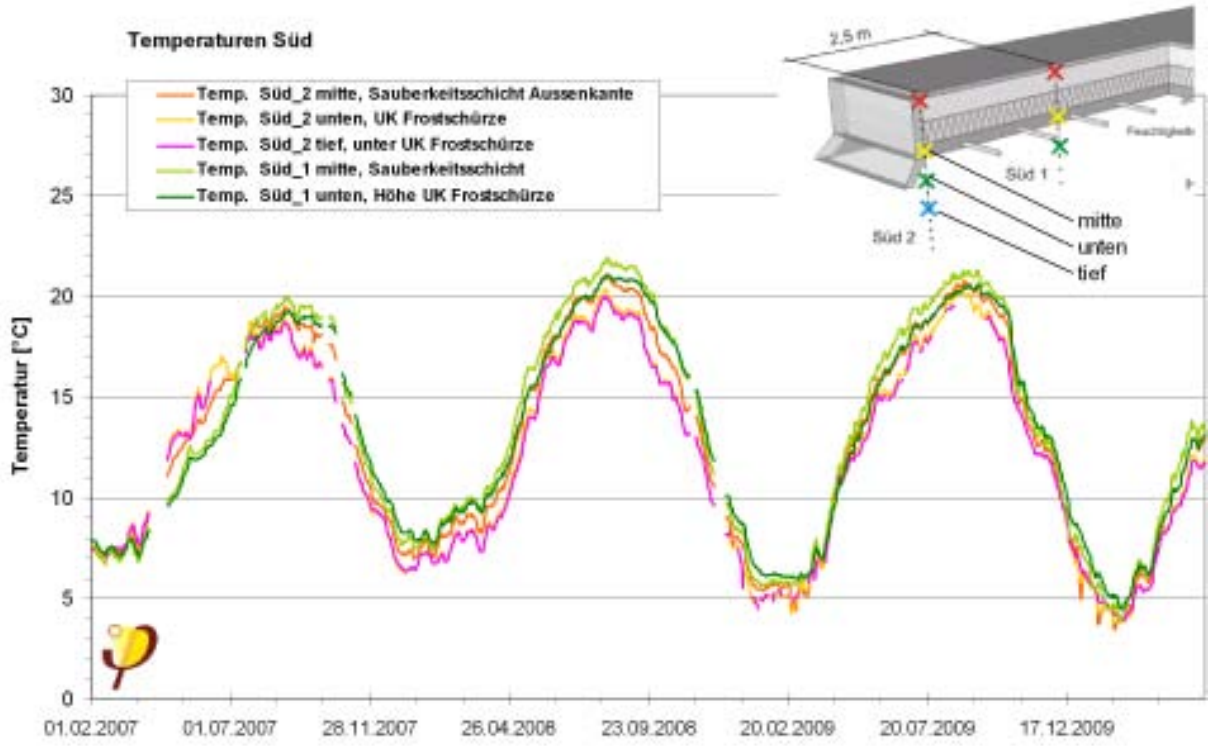


Abbildung 51: Tagesmittlere Temperaturen der Messachsen Süd 1 und 2 in den unterschiedlichen Höhen.

Um die horizontalen Verlegeebenen besser miteinander vergleichen zu können, werden die Temperaturgänge sortiert nach den unterschiedlichen Ebenen „Mitte“, „unten“ und „tief“ dargestellt (Abbildung 52).

Auffällig ist zunächst, dass die Temperaturgänge in dem oberen Bereich („Mitte“) an den unterschiedlichen Positionen näher zusammen liegen als weiter unten (Ebene „unten“ und „tief“). Die stärkste Aufspreizung einer Ebene erfolgt im Bereich „tief“. Die Unterschiede im winterlichen Temperaturniveau sind – unabhängig von der Ebene – nur gering.

Die Temperaturen Süd_2 „unten“ und „tief“ unterliegen stärkeren Schwankungen, sie befinden sich unterhalb der Dämmschürze und sind stärker an die Außentemperatur gekoppelt. Generell zeigt sich, dass die stärker mit Erdreich überdeckten Bereiche (Ost) besonders im Bereich „unten“ und „tief“ etwas zeitverzögert gegenüber den Süd Messpunkten reagieren und über eine geringere Amplitude verfügen. Dabei ist auch zu beachten, dass der Sensor „Ost_2 tief“ etwa 15 cm tiefer verlegt wurde als „Süd_2 tief“.

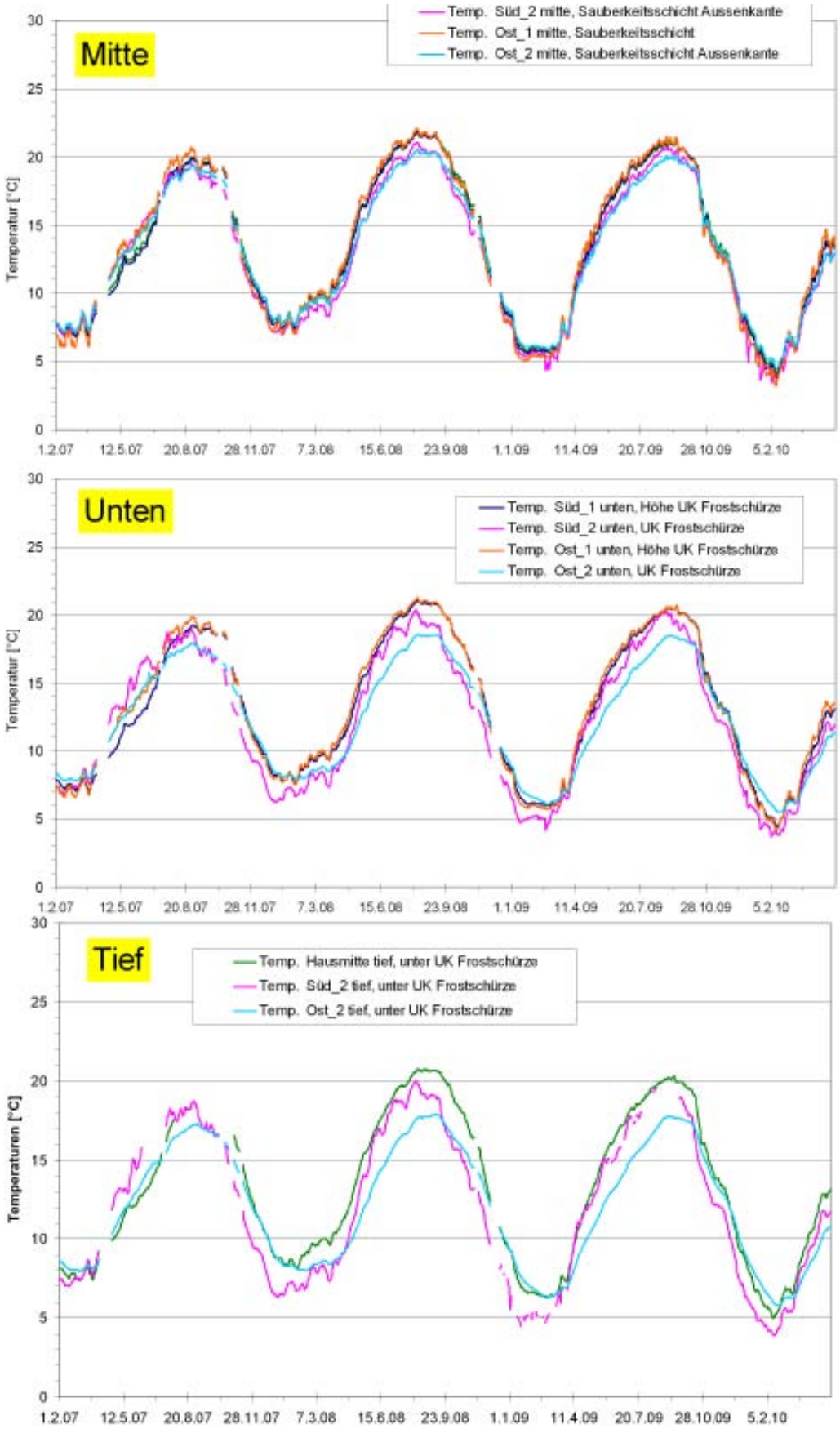


Abbildung 52: Tagesmittlere Temperaturen der Messachsen Hausmitte, Süd 1 und 2 sowie Ost 1 und 2 in den unterschiedlichen Höhen (mitte, unten, tief).

Referenztemperaturen Erdreich Garten

Zum Vergleich mit den Temperaturen unter der Bodenplatte werden im Garten dauerhafte Temperaturmessungen im ungestörten Erdreich vorgenommen. Die Messungen erfolgen ganz am Rand des Grundstückes in einer Entfernung von 7,6 m zur Hausecke. Die Sensoren sind 1,25 m, 1,95 m und 2,75 m unter der Erdoberfläche positioniert. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich die Sensoren nur etwa 0,7 m von der Grundstücksgrenze entfernt befinden. Das Nachbargrundstück ist etwa 0,8 m niedriger und mit einer Betonmauer abgegrenzt. Diese Umstände führen zu einer etwas erhöhten Kopplung der Sensoren an die Außentemperatur. Je weiter oben die Erdreichtemperaturen gemessen werden, um so stärker wirken sich die kurzzeitigen Wetterschwankungen aus. In größeren Tiefen erfolgt eine stärkere Dämpfung. In Abbildung 53 ist dies an den Temperaturgängen gut zu erkennen. Es ist auch die mit der Tiefe wachsende Phasenverschiebung der Jahresgänge zu erkennen.

Die Temperatur-Amplitude in der größten gemessenen Tiefe ist erwartungsgemäß am geringsten. Die niedrigste Erdreichtemperaturen des Sensors „oben“ wird im Winter 2008/09 mit + 1,8 °C erreicht.

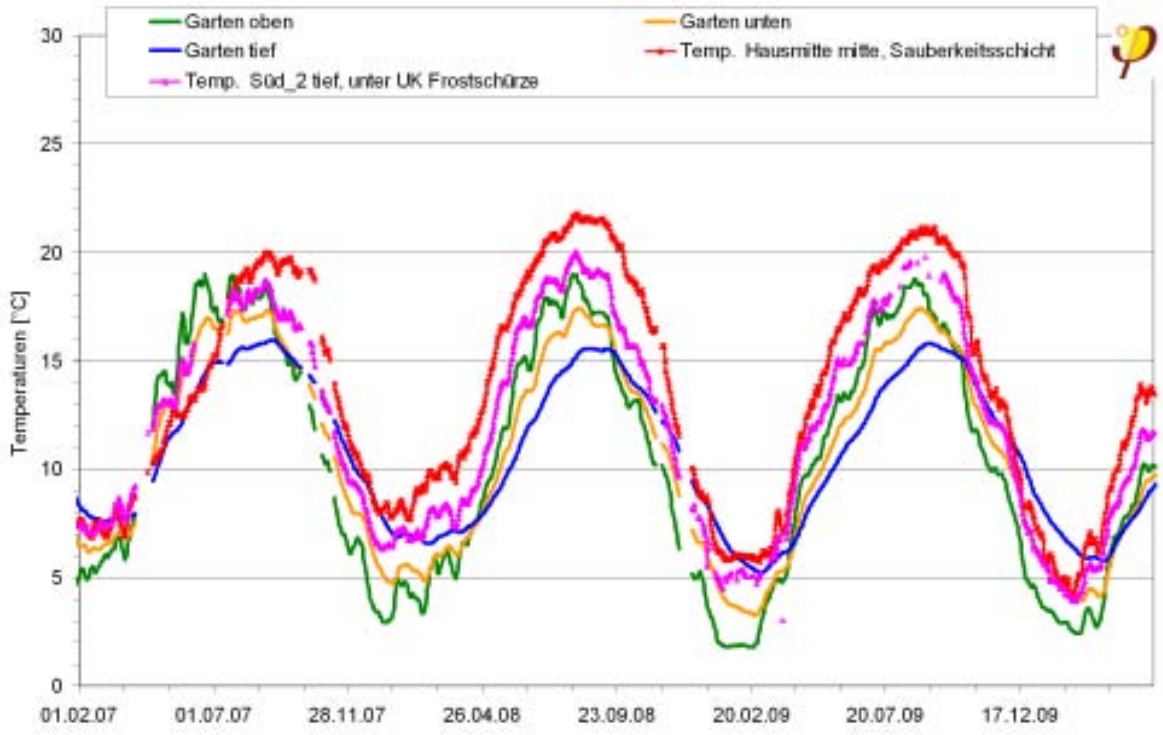


Abbildung 53: Tagesmittlere Temperaturen der vergleichenden Messung im ungestörten Erdreich im Garten (Sensorposition: oben = -1,25 m; unten = -1,95 m; tief = -2,75 m). Ergänzt mit zwei Temperaturen unter dem Gebäude.

Zum Vergleich sind im Diagramm zusätzlich zwei Erdreichtemperaturen unter der Bodenplatte („Hausmitte mitte“ sowie „Süd_2 tief“) dargestellt. Am sommerlichen Temperaturmaximum ist der aktiv erwärmte Erdreichwärmespeicher in der Hausmitte

etwa 3 K wärmer als die Referenzmessung „oben“ im Garten. Gegenüber dem Messpunkt unter der Frostschürze (Süd_2 tief) beträgt die Differenz knapp 2 K. Zur Zeit der winterlichen Temperaturminima sind die Temperaturen im ungestörten Garten „oben“ und „unten“ noch immer um bis zu 3 K kühler als der aktiv entladene Erdreichwärmespeicher.

3.2.3 Temperaturen oberhalb der Wärmedämmung

Bei den Temperaturen oberhalb der Bodenplattendämmung (Niveau „oben“) mit ca. 5 cm Betonüberdeckung zeigen sich erwartungsgemäß stark an den Wohnraum gekoppelte Temperaturen. Die Messachsen „Ost_1“ und „Ost_2“ befinden sich im Fußbodenaufbau des Badezimmers, „Süd_1“ und „Süd_2“ dagegen im Wohnzimmerbereich. In der Bodenplatte sind auch die Rohre der Fußbodenheizung verlegt, die gemessenen Temperaturen sind daher auch stark ans Heizungsmedium gekoppelt.

Sehr deutlich lassen sich die Zeiten der Beheizung im Winter und die Monate ohne Heizbetrieb unterscheiden: In der Winterzeit liegen z.B. die Temperaturen der Achsen „Ost_1“ und „Ost_2“ im konstanten Abstand weiter auseinander (um ca. 1,5 bis 2 K). Die Ursache ist vermutlich der unterschiedliche Abstand der beiden Sensoren zu den Rohren der Fußbodenheizung (siehe auch Abbildung 55). In der Sommerzeit (unbeheizt) liegen die Temperaturen dann relativ nah beieinander.

Die sichtbar stärkeren Schwankungen bei der Messstelle „Süd_2“ (lila) an der südlichen Außenkante des Wohnzimmers werden durch den stärkeren solaren Einfluss verursacht. Hier wird auch die maximale Temperatur von 26,8 °C gemessen.

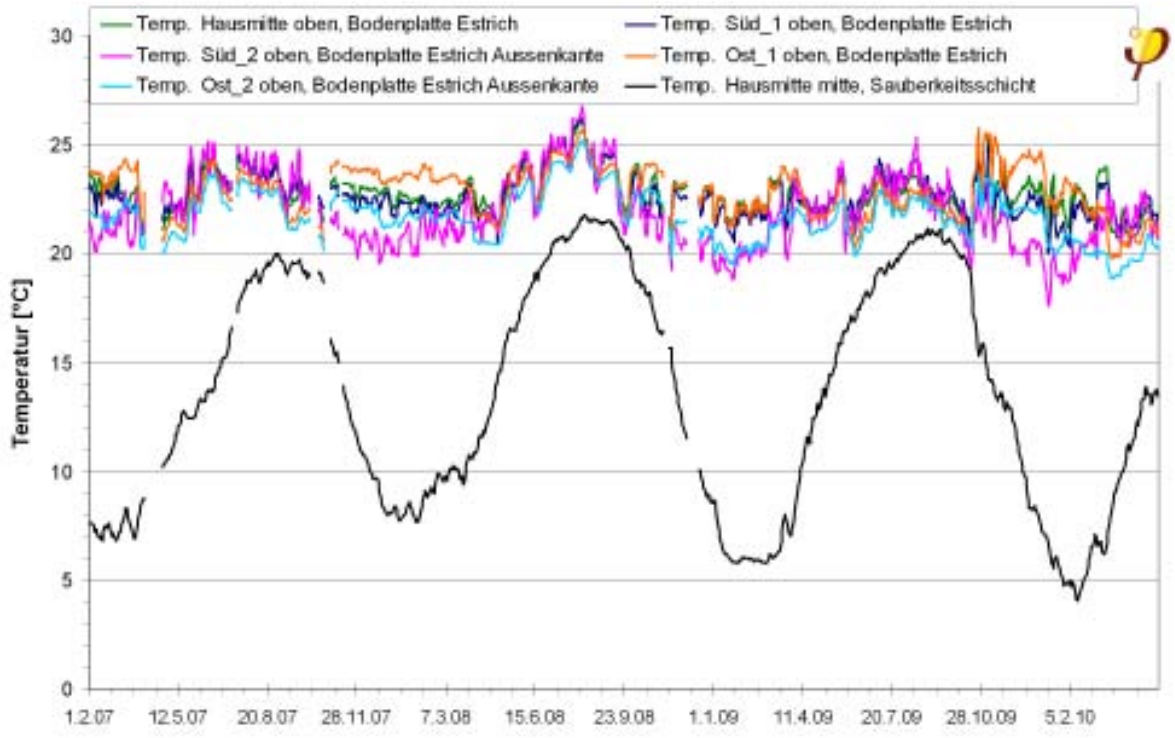


Abbildung 54: Tagesmittlere Temperaturgänge der Sensoren oberhalb der Wärmedämmung mit dem Vergleich zum Verlauf der Erdreichwärmespeichertemperatur in der Hausmitte in der Ebene der Soleleitung.

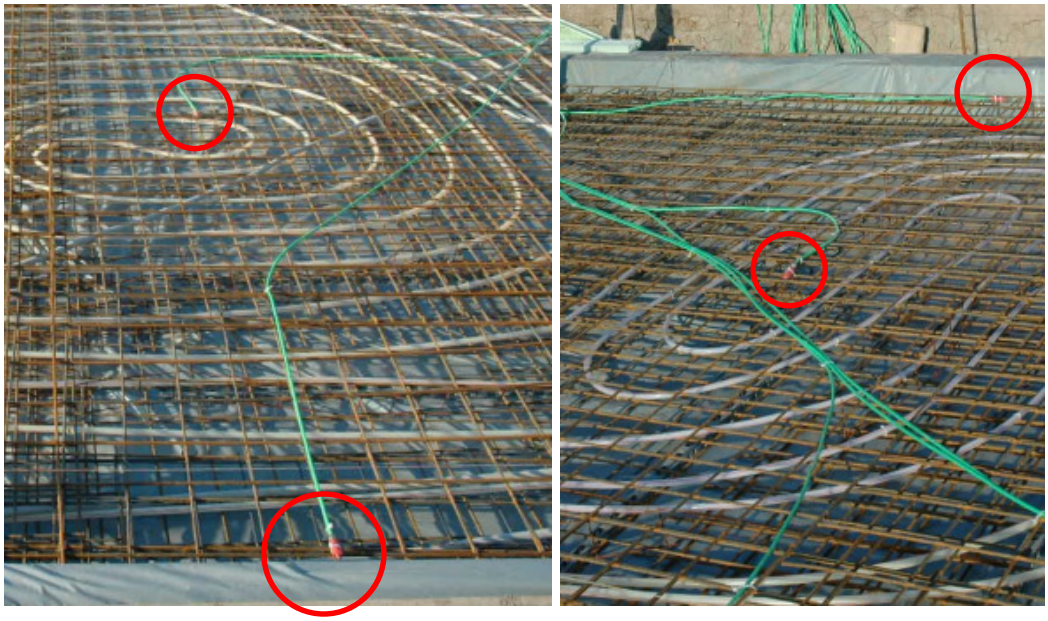


Abbildung 55: Montage der Temperatursensoren „oben“ über der Ebene der Fußbodenheizung im Wohnzimmerbereich (links) und im Badbereich (rechts). Die Kreise markieren die Positionen der Sensoren (Fotos: M. Houwen).

3.2.4 Warmwasserspeicher

Die Temperaturen im 750-Liter-Pufferspeicher (Abbildung 56) in den drei unterschiedlichen Höhen zeigen deutlich die Temperaturschichtung des Speichers sowie den deutlichen Unterschied zwischen der Sommer- und der Winterphase: Im Sommer gibt es durch die unterschiedlich großen solaren Einträge stärkere Schwankungen. Insbesondere die Temperaturen der oberen Schichten liegen näher beieinander. Der Speicher wird stärker durchgeladen. Die Be- und Entladungsvorgänge während des Tages mit ihren Temperaturgängen lassen sich hier in der Übersicht mit den Tagesmittelwerten nicht erkennen. Sie werden später untersucht.

Im Winter zeigt sich ein beruhigteres Temperaturbild mit einer konstanten Schichtung. Die Temperaturregelung der Nachheizung durch die Wärmepumpe hält die Temperaturen im Winter (insbesondere im Winter 2007/2008) konstant: Der Sollwert von 45 °C (17:00 bis 21:00 Uhr) bzw. 40 °C (21:00 bis 17:00 Uhr) wird gehalten. Dabei muss beachtet werden, dass die hier dargestellten Messpunkte in einer anderen Höhe gemessen werden als die Messstelle „S4“ der Regelung (diese befindet sich am unteren Rand des oberen Speicherdrittels). Die Messungen zeigen im Winter 2007/2008 konstante 47,5 bis 48 °C am oberen Rand des Kombispeichers, bzw. knapp 40 °C in der Speichermitte. Erst Ende März 2008 (Mitte), bzw. ab dem 25. April 2008 (oben) sind wieder deutliche solare Einflüsse auf die beiden oberen Temperaturgänge festzustellen. Bei der unteren Schicht ist bereits ab etwa Mitte Februar 2008 ein geringer Einfluss erkennbar. Die Solaranlage belädt den Speicher weiter unten als der Wärmeübertrager, der von der Wärmepumpe versorgt wird. Der Zeitraum Mitte Februar 2008 deckt sich etwa mit der beginnenden aktiven Wärmezufuhr im Erdreichspeicher aus Abbildung 49.

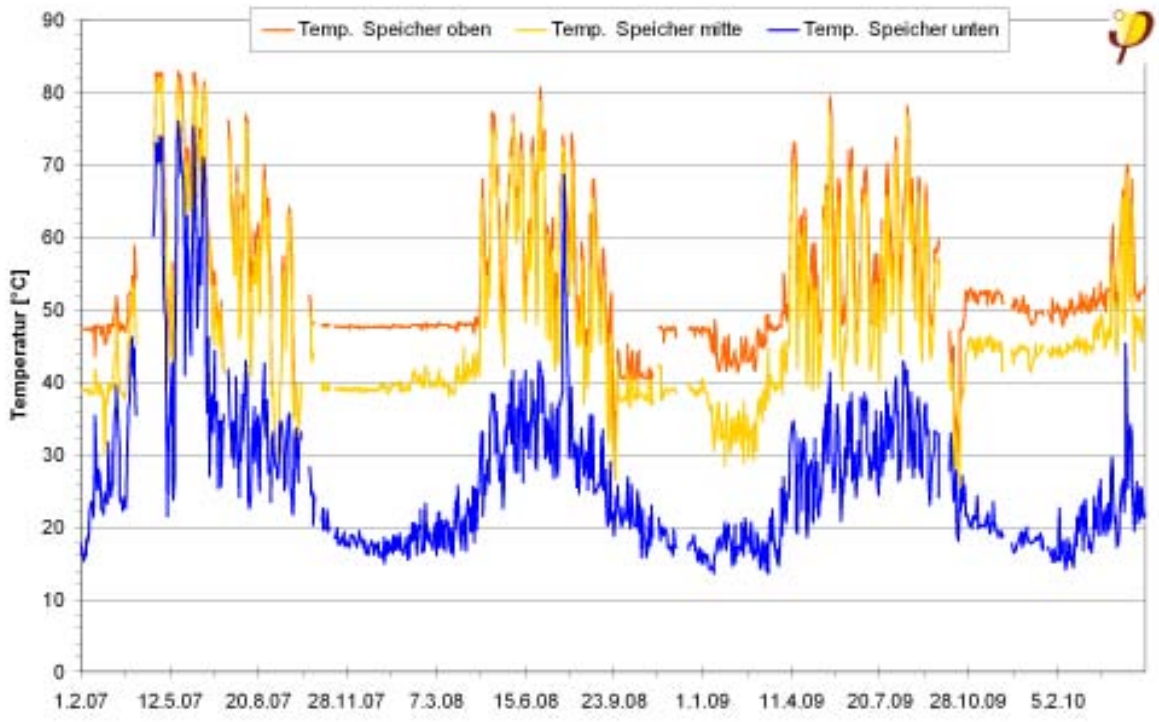


Abbildung 56: Tagesmittlere Temperaturen des Pufferspeichers während der gesamten Messzeit.

Im folgenden Winter 2008/2009 ist eine deutliche Absenkung der beiden oberen Speichertemperaturen Anfang/Mitte Januar 2009 um 3 bis 5 K zu beobachten. Als Ursache ist eine Veränderung der Regelparameter zu vermuten. Nach dieser Absenkungen schwanken die Temperaturen wieder stärker. Eine Veränderung der Sollwerte ist allerdings nicht dokumentiert. Im Winter 2009/2010 sind dagegen die oberen Speichertemperaturen deutlich höher (Erhöhung auf ca. 51 °C) und schwanken auch wieder stärker als im ersten Winter.

3.3 Betriebsweise Wärmepumpe

Der Untersuchung der Betriebsweise der Wärmepumpe (WP) kommt bei diesem Konzept der Gebäudetechnik eine besondere Bedeutung zu. Im Winter wird über die WP dem Erdreichwärmespeicher Wärme entnommen um den Pufferspeicher zu beladen bzw. direkt den Heizkreis zu betreiben. Die Betrachtung der Messdaten in von drei typischen Wintertagen (Außentemperatur -2 bis +4 °C) im Januar 2010 anhand der 10-Minuten Messdaten zeigt das Betriebsverhalten der WP (Abbildung 57): Die Wärmepumpe hat typischerweise Laufzeiten von viermal täglich 1:10 bis 1:50 Stunden und jeweils einmal täglich ab 16:00 Uhr eine etwas längere Laufzeit von 2:00 bis 2:20 Stunden. Diese etwas längeren Laufzeiten ab 16:00 Uhr haben ihre Ursache in der Anforderung an eine höhere Pufferspeichertemperatur von 50 °C (am

Temperatursensor der Regelung). Ab 21:00 Uhr wird Absenkbetrieb mit der Anforderung 40 °C gefahren.

An den drei Speichertemperaturen (weiterhin Abbildung 57) kann die Auswirkung der Wärmelieferung durch die Wärmepumpen abgelesen werden: Die mittlere Speichertemperatur wird jeweils von etwa 35 auf 45 °C angehoben; die obere Speichertemperatur sinkt kontinuierlich bis jeweils 16:00 Uhr ab und wird erst dann von der größeren Wärmelieferung, welche weiter oben eingeschichtet wird, um etwa 7 K wieder angehoben; die untere Speichertemperatur ist aufgrund des fehlenden Solarenergieeintrags in diesem Winterzeitraum fast konstant. Nur am 18. Januar 2010 zwischen 12:10 und 14:00 Uhr ist ein nennenswerter Durchfluss am WMZ der Solaranlage verzeichnet. Die Solaranlage liefert zu dieser Zeit nur niedrige Vorlauftemperaturen (unter 20 °C), weshalb die Wärme in den Solekreislauf eingespeist wird (Abbildung 58). Dies ist aufgrund der Regelung so vorgesehen. Auffällig ist nun aber das Absinken der unteren Speichertemperatur genau in diesem Zeitraum. Da eine hydraulische Störung des Systems vorhanden ist (Erläuterung siehe Abschnitt 3.4.1), wird bei Betrieb der Solekreispumpe auch der untere Speicherwärmetauscher (dient eigentlich nur der solaren Beladung) mit durchströmt und kühlt den unteren Speicherbereich ab.

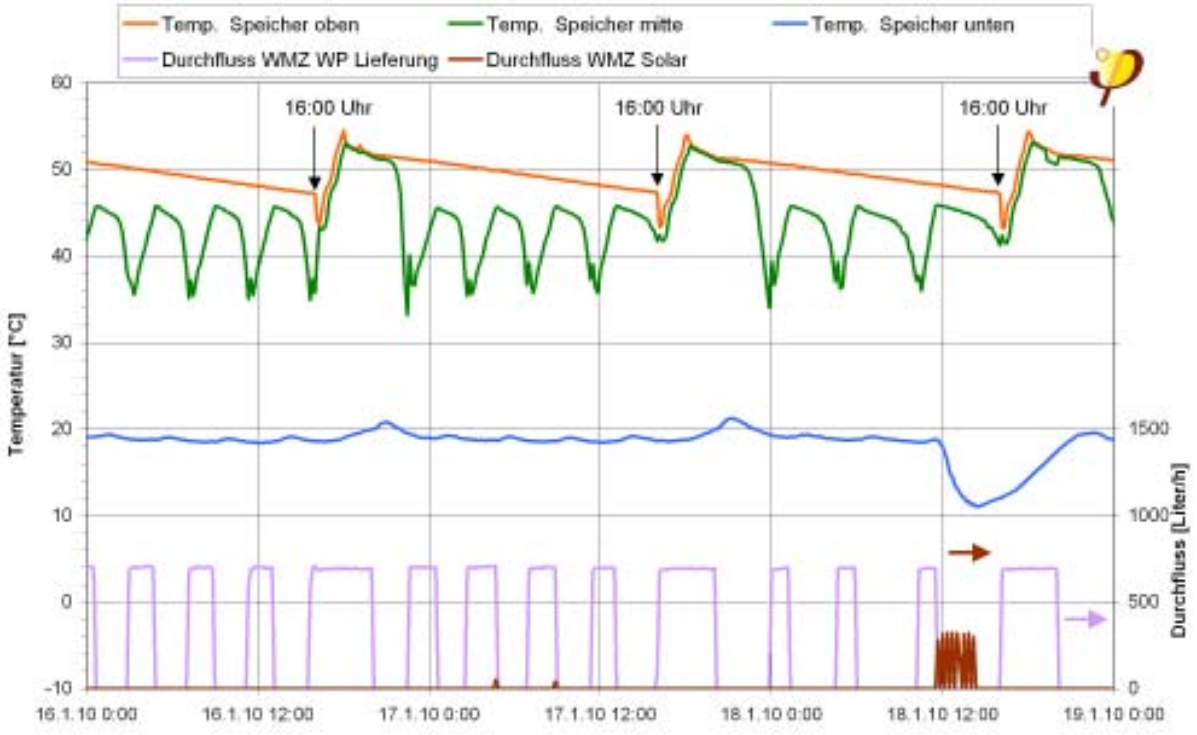


Abbildung 57: Speichertemperaturen und WMZ Durchflüsse zur Erläuterung der Arbeitsweise der Wärmepumpe im Winter am Beispiel von drei Tagen (10-Minuten Daten).

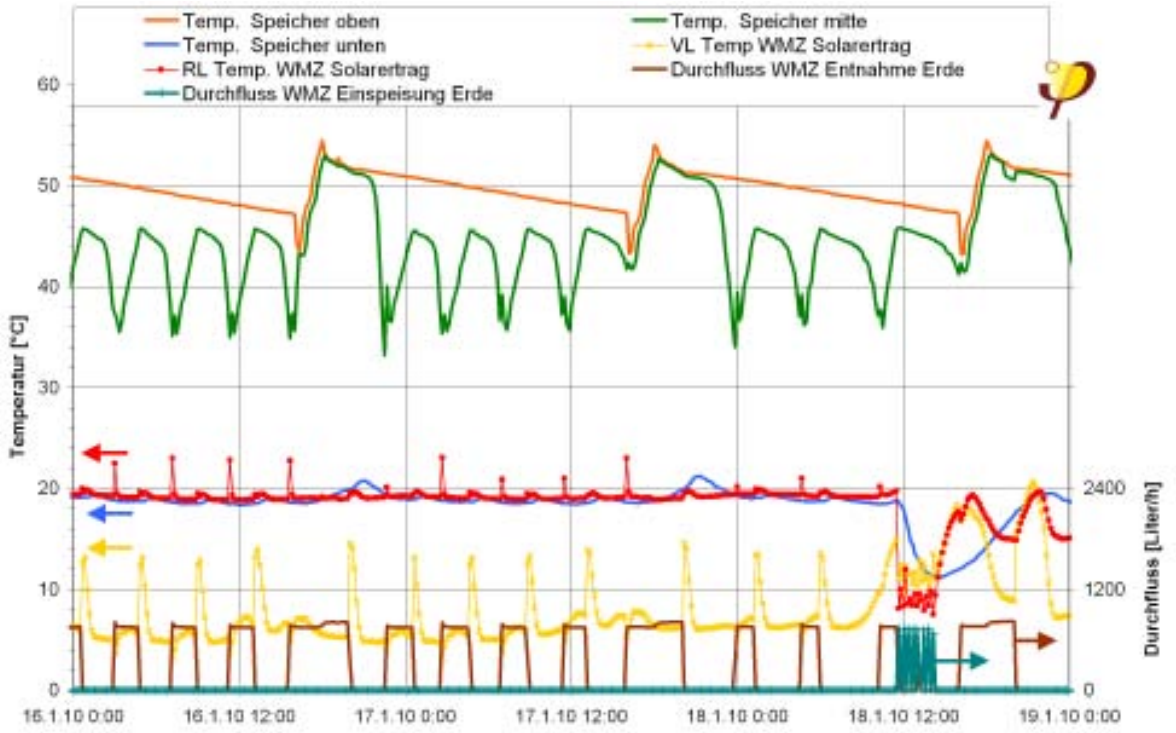


Abbildung 58: In Ergänzung zu Abbildung 57 Durchflüsse WMZ Entnahme und Einspeisung Erdreich sowie VL- und RL-Temperaturen WMZ Solarertrag (10-Minuten Daten). Die Peaks in den Solartemperaturen haben nichts mit der geplanten Betriebsweise zu tun. Sie deuten auf die weiter unten beschriebenen hydraulischen Abweichungen durch die leistungsstarke Solepumpe und ein fehlerhaft geschlossenes Ventil im Solarstrang hin.

3.3.1 Systemgrenze niedrige Soletemperaturen

Da die Gebäudetechnik bei erschöpften Erdeichspeicher (WP-Quelle) über kein Notsystem zur Beheizung verfügt, ist von besonderem Interesse, zu untersuchen, ob die Grenzen des Systems im Betrieb erreicht wurden. Dazu ist zunächst festzustellen, das die Bewohner - auch auf Nachfrage hin - nie von Beeinträchtigungen der Beheizung berichtet haben.

Zunächst wird dazu der - hier auch mit den Energiebilanzen etc. angeführte - dritte Winter 2009/2010 analysiert. In den nächsten Abbildungen sind drei Tage zu Beginn, in der Mitte und am Ende des Winters dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Laufzeiten der Wärmepumpe zu Beginn des Winters erwartungsgemäß seltener und kürzer sind als in der Mitte und am Ende. Die Minimaltemperaturen des Sole-Vor- und Rücklauftemperatur zeigen deutlich die Abkühlung unter dem Gebäude im Laufe des Winters [1]). Die Temperaturen sind gesondert am linken Rand eingezeichnet und mit einer gestrichelten Hilfslinie versehen. Die Differenz zwischen den minimalen VL-

[1]) Merke: Wie beschrieben wird hier das in das Erdreich eintretende Medium als Vorlauf bezeichnet. Im Winter während des Entladebetriebs liegt diese Temperatur damit niedriger als die RL-Temperatur.

und RL-Temperaturen (Abkühlung durch die WP) ist mit Werten zwischen 4,1 und 4,5 K relativ konstant; sie sinkt im Verlauf des Winters nur leicht ab (siehe Tabelle 9).

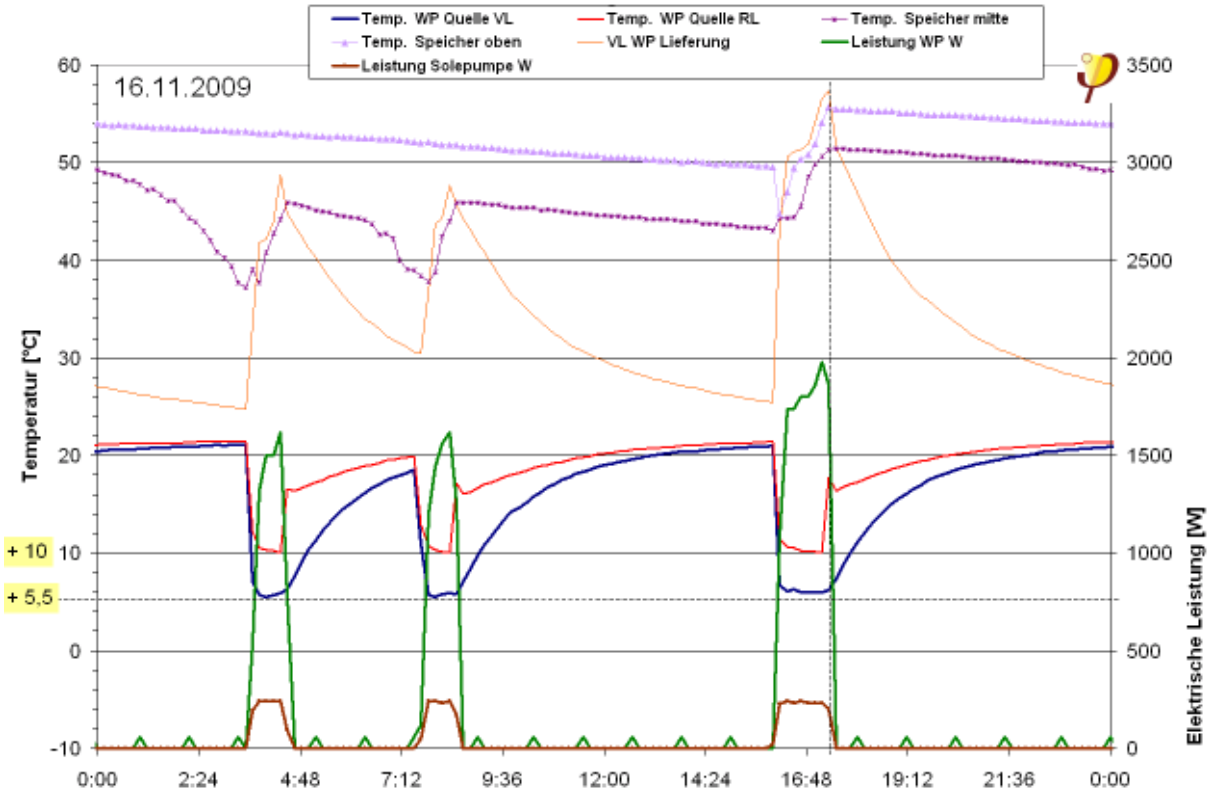


Abbildung 59: Vor- und Rücklauf-Temperaturen der WP-Quelle und VL-Temperatur der WP-Lieferung sowie obere und mittlere Warmwasserspeichertemperaturen. Außerdem sind die elektrische Leistung der WP und der Solepumpe dargestellt. Dargestellt sind die Daten vom 16.11.2009 (alles 10 Minuten-Daten).

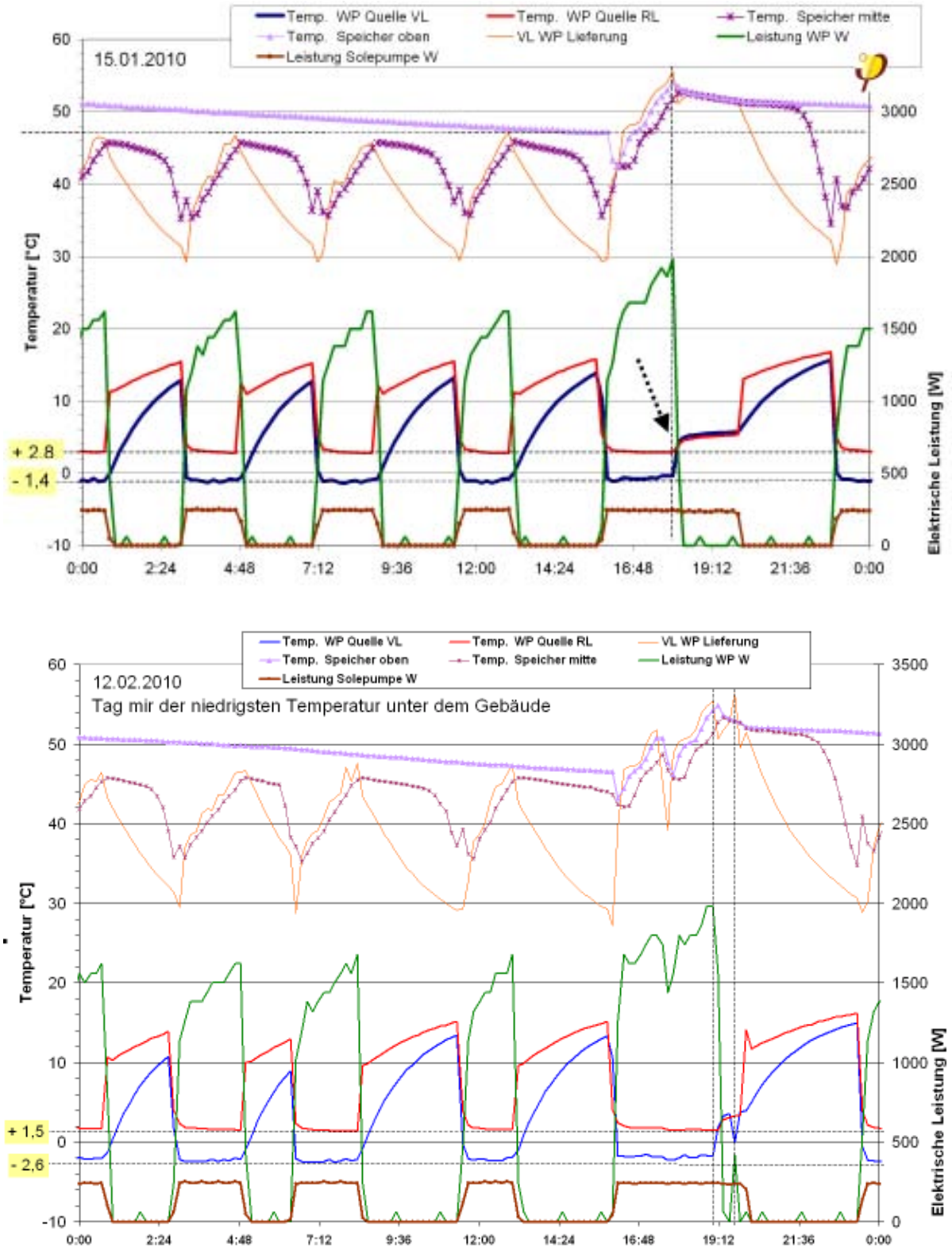


Abbildung 60: Darstellung identisch mit Abbildung 59 mit Daten vom 15.01. und vom 12.02.2010 (10 Minuten-Daten). Beim 12.02.2010 handelt sich um den Tag mit der niedrigsten Temperatur unter dem Gebäude im Winter 2009/2010.

Tabelle 9: Minimale VL- und RL-Temperaturen der Sole (WP Quelle) an den drei Beispieltagen des Winters 2009/2010.

	Min. RL-Temp [°C]	Min. VL-Temp [°C]	**Differenz [K]**
16.11.2009	+ 10,0	+ 5,5	**4,5**
15.01.2010	+ 2,8	- 1,4	**4,2**
12.02.2010	+ 1,5	- 2,6	**4,1**

An Hand der in Abbildung 59 und in Abbildung 60 dargestellten oberen und mittleren Speichertemperatur ist zu erkennen, wie die Warmwasser- bzw. Heizungsanforderungen durch die relativ kurzen Laufzeiten der WP erreicht werden: Wenn die mittlere Speichertemperatur 45 °C erreicht hat gehen die WP, die Solepumpe sowie die Pumpe „Lieferung WP“ (hier nicht dargestellt) wieder aus. Auch am Tag mit der kältesten Temperatur unter dem Gebäude (12.02.2010 19:00 Uhr Stundenmittelwert + 4,0 °C / Mitte Haus Sauberkeitsschicht) wird durch die Wärmepumpe der Speicher ausreichend aufgeheizt, das Versorgungssystem ist noch voll in Funktion.

Jeweils um 16:00 Uhr wird durch die Regelung die erhöhte Warmwassertemperatur angefordert. Die Wärmelieferung der WP wird durch die Umschaltung des Drei-Wege-Ventils weiter oben im Speicher eingeschichtet. Dadurch steigen die mittlere und jetzt auch die obere Temperatur im Speicher an. Beim Erreichen von ca. 55 °C ist die Anforderung erfüllt und die WP schaltet wieder ab. Bereits ab Mitte Dezember 2009 ist für den restlichen Winter zu beobachten, dass die Wärmepumpe täglich abschaltet, die Sole- wie auch die Pumpe „WP Lieferung“ (nicht dargestellt) aber weiter in Betrieb sind (siehe Pfeil in der Darstellung vom 15.01.2010). Dadurch sind dann sofort die Sole-VL- und die RL-Temperatur (= VL/RL WP Lieferung) identisch. Die beiden Pumpen sind in Betrieb, bis das Ende des Zeitraumes der erhöhten Temperaturanforderung (20:00 Uhr) erreicht ist. Der Betrieb ist ohne den Betrieb der WP nicht sinnvoll; es wird ohne Nutzen Pumpenstrom aufgewendet. Vermutlich schaltet die WP ab, da kurz vor dem Erreichen der angeforderten Speichertemperatur mit 55 °C die maximale Temperatur im Gerät erreicht wird (Maximaltemperatur lt. Datenblatt). Die Regelung der WP schaltet das Gerät dann aus Schutzgründen ab (zu hoher innerer Druck). Es wäre sinnvoll, die Solltemperatur des Wasserspeichers etwas zu reduzieren um diese Betriebsweise zu verhindern.

Die beobachteten Abschaltungen der Wärmepumpe bei längeren Laufzeiten (erhöhte Temperaturanforderung ab 16:00 Uhr) erfolgen also nicht, weil die Minimaltemperatur der Erdreichtemperatur bzw. Soletemperatur erreicht worden wäre („Erdreich erschöpft“).

Frostgefahr 2009/2010

An den Temperaturen der Sole ist zu erkennen, dass unter dem Gebäude – zumindest um die Rohrleitungen – in diesem Winter durch die Regelung Frost zugelassen wird. An den Erdreichtemperatursensoren unter dem Gebäude werden dagegen noch deutlich positive Temperaturen gemessen (siehe z.B. Abbildung 52). Diese Betriebsweise sollte zum Schutz des Gebäudes (Auffrieren des Fundamentes) nicht erfolgen. Die WP schaltet aus Schutzgründen lt. Datenblatt erst ab - 5 °C ab. Die Regelung der Gesamtanlage nutzt – in Ermangelung eines Erdreichsensors - den Sensor am Sole Rücklauf (Definition: Austritt aus dem Solekreis). Dieser ist im Winter in der Betriebsweise „Erdreichentladung“ wärmer als der Vorlauf der von der WP zurück kommt. Daher sollte hier – aufgrund der Entzugsleistung der WP – ein Temperatur von ca.+ 4 °C eingestellt werden um den Frostschutz unter dem Gebäude sicherzustellen.

Winter 2008/2009

Ganz anders stellt es sich im vorhergehenden Winter 2008/2009 dar. Bei der Untersuchung zeigt sich bereits bei der Betrachtung der Speichertemperaturen (Abbildung 61), dass die Speichertemperaturen „Mitte“ viel niedriger liegen. Sie sinkt immer wieder auf Werte um 24 °C ab. Hier ist der Wärmepumpenteil augenscheinlich an der Grenze seiner Leistungsfähigkeit.

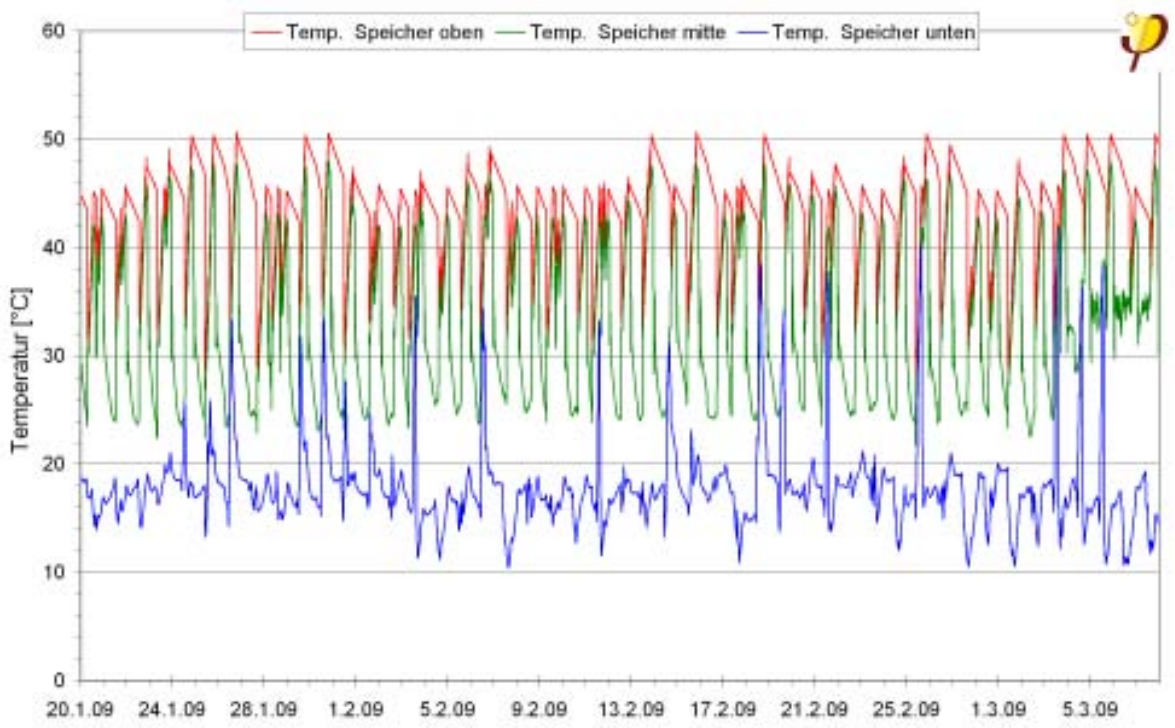


Abbildung 61: Speichertemperaturen des Warmwasserspeichers vom 20.01.2009 bis zum 07.03.2009 (10-Minuten Daten).

Die nähere Betrachtung einzelner Tage vom Winter 2008/2009 zeigt dies. Dazu sollen wieder drei Tage des Winters analysiert werden. Am 06. Januar 2009 zeigt das System noch die normalen Abläufe (siehe Abbildung 62 oben). Das System ist in diesem Winter noch auf die ursprünglich geplanten 40 °C Speichertemperatur (50 °C als erhöhte Warmwasseranforderung) eingestellt. Auch der Zeitraum der erhöhten Temperaturanforderung ist verändert und wie ursprünglich geplant von 17:00 bis 21:00 Uhr.

In Abbildung 62 erkennt man dann, dass bereits 5 Tage später (11.01.2009) die Wärmepumpe die erforderlichen Speichertemperaturen von 40 °C nicht mehr bereitstellen kann. Das Gerät taktet ständig, da die Regelung ab etwa minimal 0 °C das Gerät und die Umwälzpumpe abschaltet. Nur nach einer größeren Warmwasserentnahme[2]) gegen 10:00 Uhr sinken die Speichertemperaturen so weit ab, dass am Speichersensor der Regelung (S3 = Mitte Speicher) die Temperatur unter 35 °C sinkt. Dann erfolgt die Einspeicherung im oberen Bereich nach Umstellung des Drei-Wege-Ventils wie bei der Schaltweise „Erhöhte Warmwasseranforderung“. Damit werden im Speicher wieder höhere Temperaturen erreicht. Bei Erreichen etwa der 40 °C schalten die WP und auch die beiden Umwälzpumpen wieder ab. Durch den laufenden Heizbetrieb sinkt die Temperatur „Speicher Mitte“ schnell wieder ab. Zum Zeitpunkt der erhöhten Temperaturanforderungen ab 17:00 Uhr wiederholt sich der Aufheizvorgang dann wieder bis die geforderten 50 °C erreicht werden.

[2]) Zu dieser Zeit wird mit dem einen Durchlauferhitzer Wasser direktelektrisch nacherwärmt.

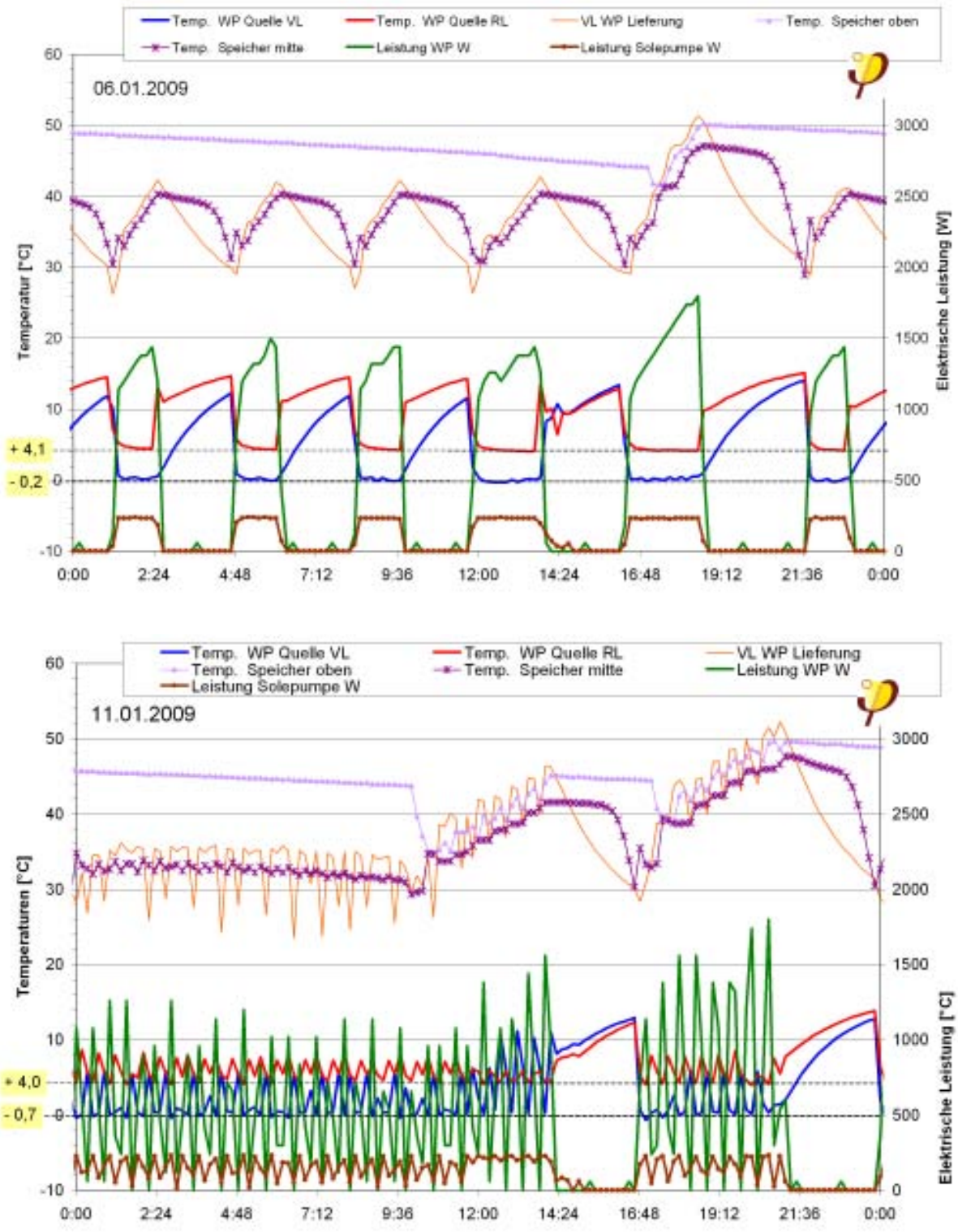


Abbildung 62: Darstellung identisch mit Abbildung 59 mit Daten vom 06. und 11.01.2009 (10 Minuten-Daten).

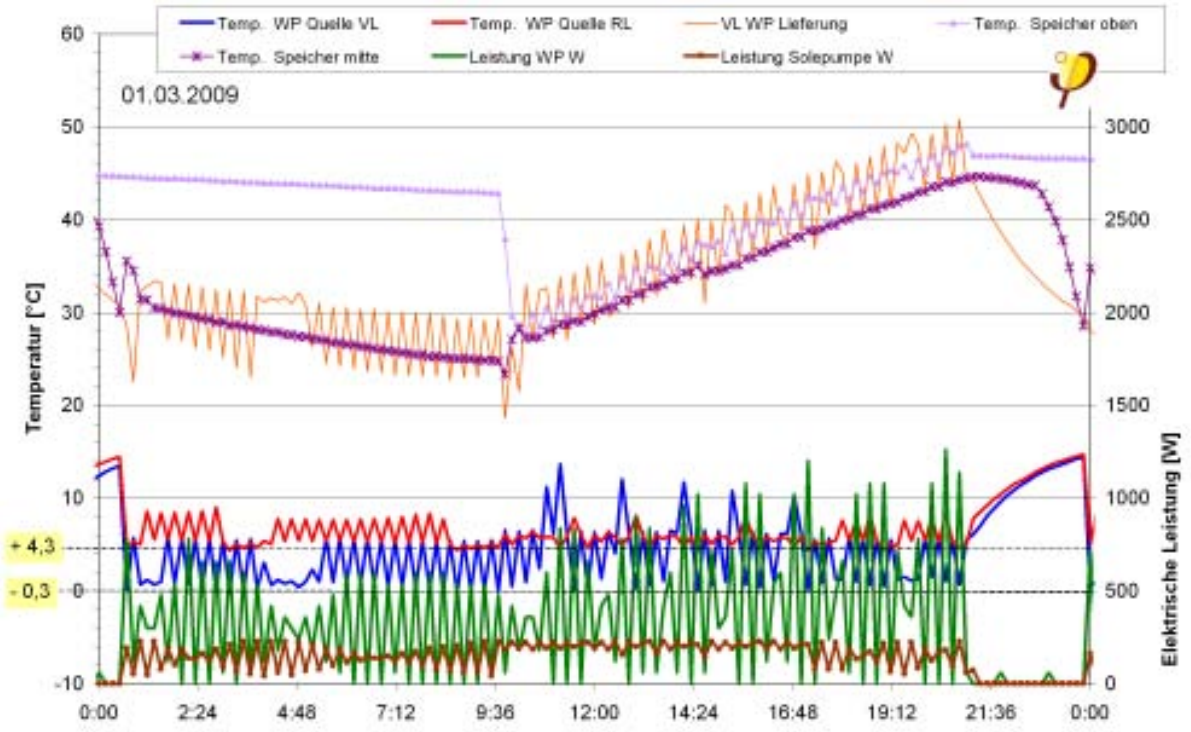


Abbildung 63: Darstellung identisch mit Abbildung 59 mit Daten vom 01.03.2009 (10 Minuten-Daten).

Das Takten der Wärmepumpe erfolgt auch weiterhin den ganzen restlichen Winter bis Anfang/Mitte März 2009. In Abbildung 63 ist zu erkennen, dass auch noch am 01. März 2009 das ausgeprägt Taktverhalten vorliegt. An diesem Beispieltag wird die notwenige Temperatur von 40 °C nicht vor 17:00 Uhr erreicht. Daher wird durchgehend weiter bis 21:00 Uhr mit erhöhter Anforderung (50 °C) aufgeheizt. Diese Temperatur wird bis 21:00 Uhr nicht ganz erreicht.

Die Temperaturspreizung des Solekreises liegt damit mit Werten von 4,3 bis 4,7 K ganz ähnlich wie im Folgewinter 2009/2010 (siehe Tabelle 9). Die Angabe ist nicht so aussagekräftig, da die WP eben ständig taktet und sich keine Temperaturen (wie im Folgewinter) einstellen können. Ursache für das Taktverhalten ist - wie erwähnt - dass Erreichen der Null-Grad-Grenze für das Medium Sole. Abweichend vom Folgewinter wird hier keine nennenswerte Unterschreitung der Frostgrenze beim Eintritt ins Erdreich toleriert. Zu vermuten ist, dass in der Regelung dieser Minimalwert verstellt wurde. Dies ist ebenso wie die veränderten Schaltzeiten der erhöhten Warmwasseranforderung und der Speichertemperatursollwerte nicht bekannt gemacht oder dokumentiert worden.

Für den Betrieb der Flächenheizung wird dauerhaft eine ausreichende Temperatur zur Verfügung gestellt. Die Bewohner haben aufgrund der großen Trägheit des Systems nichts von den niedrigen Vorlauftemperaturen der Heizung bemerkt. Für die Warmwasserversorgung sind zu Zeiten der niedrigeren Temperaturen die Durchlauferhitzer zum Einsatz gekommen. Es muss aber bedacht werden, dass im

Falle von erhöhtem Warmwasserbedarf (z.B. durch einen oder zwei weitere Bewohner) deutlich mehr direktelektrisch nachgeheizt werden müsste und die Wärmeversorgung auch der Flächenheizung dann grenzwertig ausfallen würde. Es muss somit resümiert werden, dass das System zum Ende des Winters an seine Grenzen stößt. Insbesondere wenn die Soletemperatur wieder auf die sinnvolle Null-Grad-Grenze gestellt wird.

3.4 Hydraulik – Abweichung von der geplanten Funktionsweise

Bei der messtechnischen Begleitung des Gebäudes wurde verschiedene Abweichungen vom geplanten Betrieb festgestellt. Die wichtigsten davon, welche die Hydraulik des Systems beeinflussen, werden in diesem Abschnitt aufgeführt.

3.4.1 Ungewollte Warmwasserspeicherentladung

Bei der Datenanalyse zeigte sich ein im vorherigen Abschnitt bereits erwähntes hydraulisches Problem, welches besonders im Sommer starke Auswirkungen zeigt. Am Beispiel der vier Sommertage in Abbildung 64 ist zu erkennen, dass im Sommer nach der solaren Speicherbeladung des Warmwasserspeichers immer eine massive und sehr schnelle Entladung des unteren Speichervolumens erfolgt. Dies ist an der schnellen Abkühlung der unteren Speichertemperatur (hellblau) zu erkennen. Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 65 nur ein Tag aus Abbildung 64 dargestellt.

Abbildung 64: Übersicht über die Temperaturen von Warmwasserspeicher, Solar-VL und Solekreis (10-Minuten Daten). Dargestellt sind vier beispielhafte Tage im Sommer 2009.

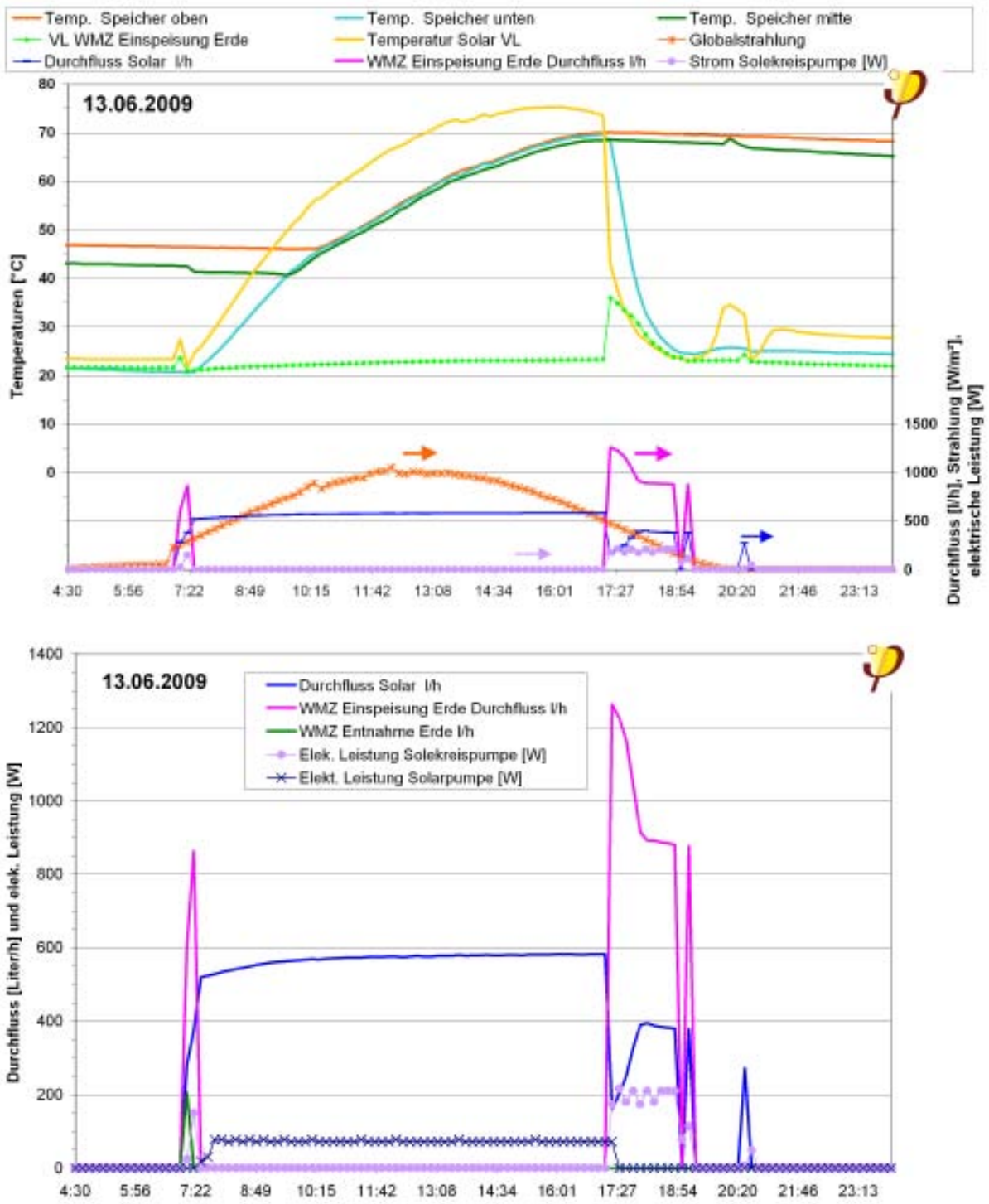


Abbildung 65: Messdaten (10-Minuten) der Temperaturen, Durchflüsse und elektr. Leistung eines Tages (13.06.2009) aus Abbildung 64.

An dem wohl fast wolkenlosen Sommertag (13.06.2009) in Abbildung 65 ist zu erkennen, dass am Morgen zunächst kurzzeitig die erste Solarwärme des Tages mit niedrigem Temperaturniveau wie geplant ins Erdreich eingespeichert wird. Die Solepumpe läuft einmal kurz an. Dann ist zu beobachten, wie bei Solarpumpenbetrieb die untere Speichertemperatur im Warmwasserspeicher durch die eingespeicherte Solarwärme im Laufe das Tages bis 17:10 Uhr von etwa 22 auf 70 °C angehoben wird. Mit dem Umschalten auf die solare Erdreichbeladung (17:10 Uhr) wird die

Solarpumpe abgeschaltet und die Solepumpe geht in Betrieb. Bei dieser Betriebsart wird aufgrund eines fehlenden bzw. nicht funktionierenden Magnetventils im Solar-Rücklaufstrang unbeabsichtigt auch der Solarwärmetauscher im Warmwasser-speicher durchströmt. Der WW-Speicher wird dadurch im unteren Bereich (ca. 200 bis 250 Liter) innerhalb von 2 Stunden auf 25 °C abgekühlt. Damit ist etwa das Temperaturniveau der Startbedingungen vom Morgen erreicht. Die beiden Speicher-temperaturen weiter oben sind von dem Vorgang nur indirekt betroffen, da der Speicher gut geschichtet ist. Die dem Speicher wieder entnommene Energie wird – verlustbehaftet - dem Erdreich zugeführt. Der Durchfluss im Speicherwärmetauscher selbst ist, da diese Betriebsweise nicht geplant war, nicht direkt gemessen worden (keine Darstellung im Diagramm möglich).

Die Durchflussmengen in Abbildung 65 zeigen auch den deutlichen Unterschied zwischen der Förderleistung der Solarpumpe (bis 580 l/h) gegenüber der viel leistungsstärkeren Solepumpe (Spitze über 1200 l/h). Analog dazu verhalten sich die elektrischen Leistungen der beiden Pumpen (70 zu 200 W). Es ist ebenfalls zu erkennen, dass der Solarkreislauf wie geplant auch beim Betrieb der Solepumpe (Erdreichladung) durchströmt wird. Allerdings dauert es ca. 50 Minuten bis sich nach der Pumpenumschaltung die Durchströmung des Solarkreislaufes mit knapp 400 l/h einstellt.

An bewölkten Sommertagen findet die beschriebene ungeplante Speicherentladung mehrfach statt: Immer, wenn eine Umschaltung auf die Solepumpe erfolgt und der Speicher bereits aufgewärmt war, wird der Speicher unten wieder abgekühlt und die Wärme ins Erdreich umgespeichert (siehe dazu beispielhaft 12.06.09 in Abbildung 64).

Energetische Auswirkungen

Durch die Positionierung der Wärmemengenzähler wird die Solarwärme insgesamt gemessen und der Anteil der umgespeicherten Wärmemenge aus dem Speicher wird ordnungsgemäß beim WMZ „Einspeisung Erdreich“ erfasst. Der umgespeicherte Anteil wird damit nicht gesondert als Einzelgröße gemessen. Um dessen Anteil an der solaren Erdreichbeladung zu erfahren, müssen in jedem Zeitschritt die WMZ betrachtet werden: Wird beim Betrieb der Solepumpe mehr Solarwärme ins Erdreich eingespeichert, als insgesamt durch die Solaranlage „geerntet“ wurde handelt es sich um einen Umspeichereffekt. Diese Untersuchung ist für das gesamte Bilanzjahr 2009/2010 durchgeführt worden. Dabei wurden auch einige Zeiträume in der Über-gangszeit von jeweils einige Tagen Dauer gefunden, bei denen die Solepumpe dauerhaft in Betrieb war. Dabei handelt es sich vermutlich um ein weiteres Rege-lungsproblem, welches nicht eindeutig geklärt werden konnte. Diese Betriebsweise führt zeitweise ebenfalls zur Umspeicherung aus dem WW-Speicher ins Erdreich und ist bei der energetischen Betrachtung enthalten.

Mit den Umspeichervorgängen werden täglich bis maximal 15 kWh umgeschichtet. Die Verteilung über das gesamte Bilanzjahr 2009/2010 ist in Abbildung 66 dargestellt. Als Jahressumme ergeben sich 1700 kWh, die dem Speicher wieder entnommen werden und ins Erdreich gespeichert werden. Das stellt mit entsprechend 11,2 kWh/(m²a) für die energetischen Betrachtungen des Gebäudes eine relevante Größe dar. Es werden damit 34 % des gesamten Solarertrags umgespeichert. Die 1700 kWh stellen 49 % der insgesamt in diesem Jahreszeitraum in das Erdreich eingespeicherten Energiemenge dar. Die Umspeichervorgänge finden zu etwa 75 % im Sommer statt.

Es soll noch einmal deutlich gemacht werden, dass diese Umspeicherung:

1. ungewollt erfolgt (Hydraulikfehler) und
2. die Energie nicht vollständig verloren ist, sondern in den schlechteren Speicher (Erdreich) verlagert wird. Ein Teil davon kann über die Wärmeentnahme mit der Wärmepumpe wieder genutzt werden.

Dieser energetisch nachteilige Effekt führt nebenbei dazu, dass die Solaranlage am Morgen immer wieder in ein optimal niedriges Temperaturniveau im Warmwasserspeicher einspeichern kann.

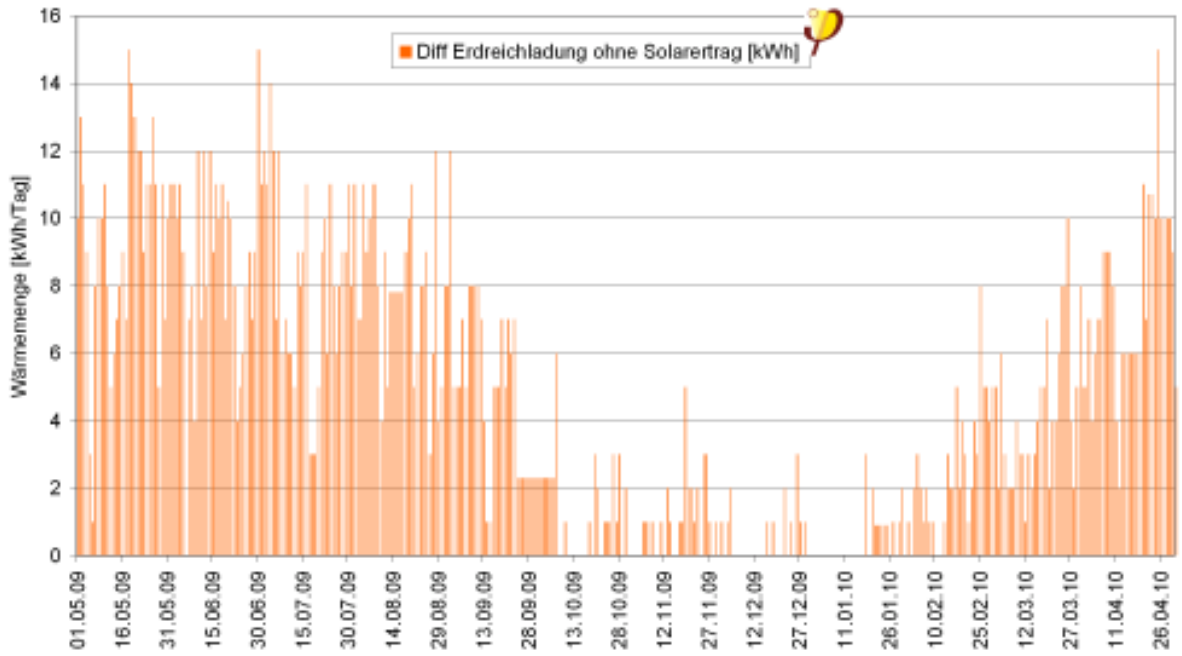


Abbildung 66: Jahresverlauf der Tagessummen der Energiemengen, welche aus dem Warmwasserspeicher ins Erdreich umgespeichert werden (01.05.2009 bis 30.04.2010).

Bei Betrachtung der Winterzeiten zeigen sich hier neben den beschriebenen Umspeichervorgängen noch weitere Störungen der Hydraulik beim Betrieb der Solepumpe. Diese haben aber keine großen energetischen Auswirkungen.

3.4.2 Absperrventil Solaranlage und Effizienz Solepumpe

Für die Untersuchungen zum Stromverbrauch der leistungsstarken **Solepumpe** wurden Druckverlustberechnungen des hydraulischen Systems durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass für den Betrieb des Solekreises bei Wärmeentnahme mittels der WP, unter Berücksichtigung der Druckverluste der WP sowie der deutlich erhöhten Viskosität der Soleflüssigkeit mit der vorhandenen Pumpe etwa 130 Watt Leistung notwendig sind. Dieser Winterfall stellt dabei den ungünstigsten – sprich energieaufwendigsten – Betriebszustand für die Pumpe dar. Aufgrund des sehr schlechten Betriebspunktes der Pumpe (für diese Pumpe sehr niedriger Volumenstromes von 0,25 Liter/Sekunde, entsprechend 900 Liter/h) ist der hydraulische Wirkungsgrad im Datenblatt mit nur 20 % angegeben. Der elektrische Wirkungsgrad ergibt sich zu schwachen 61 %, womit ein Gesamtwirkungsgrad beim vorliegenden Volumenstrom von nur 12 % (!) realisiert ist. Wenn eine größenoptimierte effizientere Pumpe mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 85 % und einem hydraulischen von 50 % eingesetzt würde, ergäbe sich ein Gesamtwirkungsgrad von 43 %. Damit würden dann zum Betrieb bei niedrigen Soletemperaturen statt etwa 130 Watt nur knapp 40 Watt elektrische Leistung benötigt. Daran wird klar, dass die Pumpe nach dem Austausch deutlich überdimensioniert wurde.

Als elektrische Leistung der Solepumpe werden allerdings noch höhere Leistungen von 200 bis 240 Watt gemessen. Daher und aufgrund des ermittelten hydraulischen Fehlers „Umspeicherung aus dem WW-Speicher ins Erdreich“ (vgl. vorhergehender Abschnitt 3.4.1) wurde das System im Zuge der Endauswertung rechnerisch und ergänzt durch einen Ortstermin im September 2010 überprüft und hinterfragt. Nach einigen Herstelleranfragen[3]) und Klärungen mit der ausführenden Firma stellte sich schlussendlich folgendes heraus: Das Absperrventil der Solar-Pumpengruppe verschließt, wenn die Solarpumpe nicht betrieben wird, nicht nur wie geplant die Solarkollektor-Vorlaufleitung, **sondern auch die Rücklaufleitung**. Diese Rohrleitung wird aber zwingend für den solaren Erdreichladebetrieb benötigt! Das eingesetzte Produkt soll bei normalen thermischen Solaranlagen dafür sorgen, dass die thermische Zirkulation z.B. im Winter effektiver unterbunden wird. Vom Planer war die Funktion natürlich so nicht vorgesehen.

Die Solepumpe hat damit bei der Betriebsweise „Solare Erdreichbeladung“ immer gegen das geschlossene Ventil gearbeitet. Da die Solepumpe sehr leistungsstark ist,

[3]) Der Hersteller der Pumpengruppe wollte auf Nachfrage keine Aussagen zur hydraulischen Funktion machen.

wurden im gesamten Untersuchungszeitraum auch bei geschlossenem Ventil Durchflüsse und Wärmemengen gemessen. Die Pumpe muss das Doppelventil aufgrund des hohen Drucks zum Teil geöffnet haben. Auf der einen Seite ist dieser Mangel dadurch nicht aufgefallen. Auf der anderen Seite erklären sich damit Messwerte von z.B. niedrigem Durchfluss am WMZ der Solaranlage bei Betrieb der Solepumpe (siehe Abbildung 65).

Durch eine Nachrüstung Anfang November 2010 wird das Ventil in der Pumpengruppe dauerhaft geöffnet und ein zusätzliches Magnetventil nur im Solar-VL montiert.

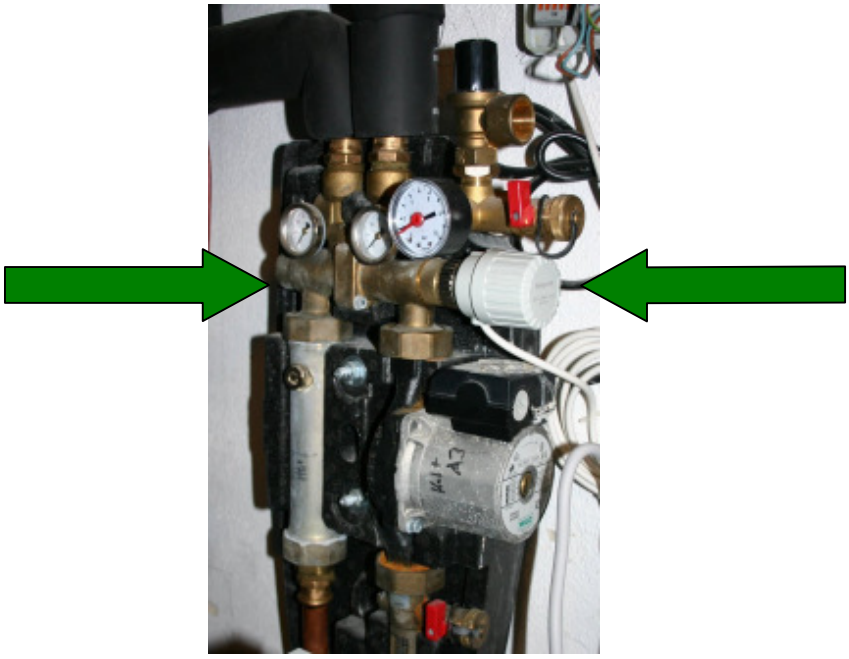


Abbildung 67: Solarpumpengruppe mit dem beidseitigen Absperrventil mit dem weißen elektrischem Stellmotor (Foto bei geöffneter Dämmabdeckung).

3.5 Energetische Auswertungen

Mit den fünf für die Messungen eingesetzten Wärmemengenzählern (WMZ) und den insgesamt acht Stromzählern werden alle für eine Bilanzierung des Systems notwendigen Energiemengen erfasst. Die genauen Positionen der WMZ in der Hydraulik können Abbildung 9 auf Seite 12 entnommen werden.

3.5.1 Hilfsstromverbrauch

Als Hilfsstromverbräuche werden die für die Haustechnik notwendigen Umwälzpumpen sowie die Lüftungsanlage untersucht. Der Verlauf der spezifischen Verbrauchswerte über 18 Monate ist in Abbildung 68 dargestellt.

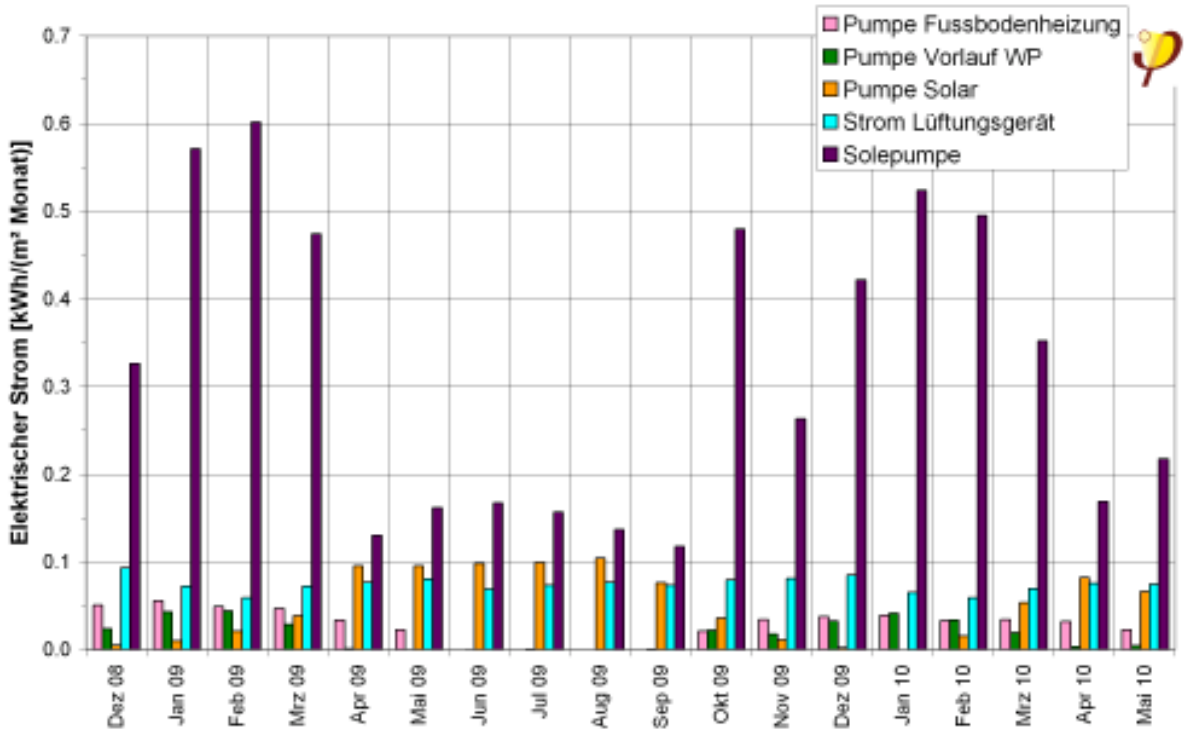


Abbildung 68: Monatliche spezifische Hilfsstromverbräuche vom Dezember 2008 bis zum Mai 2010.

Als markanter Hauptverbraucher ist deutlich die Solepumpe zu erkennen. Die leistungsstarke ungeregelte 180 Watt-Pumpe verbraucht bis zu 0,6 kWh/(m² Monat). Dabei sind die Winterwerte mit längeren Pumpenbetriebszeiten und der – aufgrund der niedrigeren Soletemperatur - stark angestiegenen Viskosität der Soleflüssigkeit deutlich höher. Im Sommer könnte auch eine deutlich leistungsschwächere Pumpe den Soletransport sicherstellen, da die höheren Temperaturen eine deutlich niedrigere Viskosität bedingen. Der Jahresverbrauch 2009/2010 der Solepumpe beträgt beachtliche 3,45 kWh/(m²a). Es wurden Störungen des hydraulischen Systems festgestellt, die einen nennenswerten Anteil der hohen Stromverbräuche der Solepumpe verursachen. Diese wurden weiter oben im Abschnitt 3.4 bereits

diskutiert. Fehler dieser Art treten insbesondere bei Anlagen mit komplexer Hydraulik, die an der Baustelle zusammengesetzt und in Betrieb genommen werden muss, erfahrungsgemäß häufig auf. Dies spricht sehr stark für die Integration von Systemen in vom Hersteller bereits aufeinander abgestimmte Gesamtanlagen (sog. Kompaktsysteme).

Die Stromverbrauchswerte der **Solarpumpe** zeigen den entgegengesetzten zeitlichen Verlauf auf niedrigerem Niveau: im Sommer werden aufgrund des hohen Solarangebotes die höheren Werte um 0,1 kWh/(m² Monat) gemessen. Der spezifische Jahresverbrauch 2009/2010 beträgt 0,68 kWh/(m²a).

Bei der **Vorlaufpumpe** der Wärmepumpe sowie der **Heizkreispumpe** der Fußbodenheizung ist im Sommer kein nennenswerter Verbrauch zu verzeichnen. Die Heizkreispumpe wird vollständig abgeschaltet. Die Jahresverbrauchswerte liegen mit 0,26 bzw. 0,17 kWh/(m²a) niedrig. Bei der Heizkreispumpe könnte allerdings durch z.B. eine Jahresschaltuhr bzw. die Schaltung über die freiprogrammierbare Regelung die Betriebszeit weiter eingeschränkt werden. Die Bewohner haben die Pumpe z.B. 2010 erst relativ spät am 23. Mai ausgeschaltet. Außerdem wird die Pumpe während der Heizzeit 24 Stunden dauerhaft betrieben. Das ist nicht optimal, da die Pumpe auch läuft, wenn z.B. die Wärmepumpe den Warmwasserspeicher lädt und der Heizkreis nicht mit Wärme versorgt wird. Ebenso ist zu Zeiten, zu denen keine Wärme abgenommen wird (Vor- gleich Rücklauftemperatur) der Betrieb nicht notwendig.

Die **Lüftungsanlage** mit Wärmerückgewinnung (WRG) kann mit Verbrauchswerten von jährlich knapp 0,9 kWh/(m²a) als sehr energieeffizient beurteilt werden. Üblich sind für energieeffiziente Lüftungsanlagen durchaus höhere Verbrauchswerte. In [Peper 2008] hatte sich als Mittelwert verschiedener Projekte ein Verbrauch von 3,3 kWh/(m²a) ergeben. Dabei liegen die Arbeitszahlen der Geräte im Winter bei Werten deutlich über 10. Das bedeutet, dass ein Vielfaches des eingesetzten Stroms als Wärmeenergie aus der Abluft zurückgewonnen wird. Es ist trotzdem zu überlegen, ob der durchgeführte Ganzjahresbetrieb des Gerätes notwendig ist. Da es kein innenliegendes WC oder Bad gibt, könnte die Anlage aus energetischer Sicht im Sommer auch abgeschaltet werden.

Tabelle 10: Spezifische Jahressummen der Hilfsstromverbräuche (Zeitraum 01.05.2009 bis 30.04.2010)

Jahres-verbrauch	Pumpe Fussboden-heizung	Pumpe Vorlauf WP	Solar-pumpe	Sole-pumpe	Strom Lüftungsgerät
[kWh/(m²a)]	**0.26**	**0.17**	**0.68**	**3.45**	**0.89**

Der Stromverbrauch der **Wärmepumpe** und der **elektrischen Warmwassernacherhitzung** wird in gesonderten Abschnitten weiter unten dokumentiert und untersucht.

3.5.2 Heizwärme und Heizlast

Die Auswertung des WMZ Heizung ergibt jährliche Heizwärmeverbrauchswerte zwischen 20,7 und 23,5 kWh/(m²a). Dabei muss berücksichtigt werden, dass die aktive Auskühlung des Erdreichs unter dem Gebäude trotz der erhöhten Dämmstärke zum Erdreich zu einer leichten Vergrößerung des Heizwärmeverbrauchs führt. Nach den Simulationsrechnungen ergibt sich ein Wert von knapp 2 kWh/(m²a) (siehe 4.1.2.2 auf Seite 98). Weiter muss berücksichtigt werden, dass die hörere Raumtemperaturden Heizwärmeverbrauch des Gebäudes erhöht: Nach dem PHPP des Gebäudes erhöht sich der Heizwärmebedarf um etwa 2,5 kWh/(m²a) je Kelvin Temperaturerhöhung (entspricht 16 %). Eine Raumlufttemperaturmessung im Gebäude wurde innerhalb des Messprojektes nicht durchgeführt. Bei anderen Messungen in Passivhäusern wurden überwiegend Raumlufttemperaturen zwischen 21,0 und 22,0 °C festgestellt; bei der Queranalyse [Peper 2008] von 244 Wohnungen lag der Mittelwert bei 21,7 °C. Gegenüber dem PHPP Berechnungsansatz mit 20 °C würde sich bei angenommenen Raumtemperaturen von 21 bis 22 °C so eine Erhöhung um 2,5 bis 5,0 kWh/(m²a) ergeben.

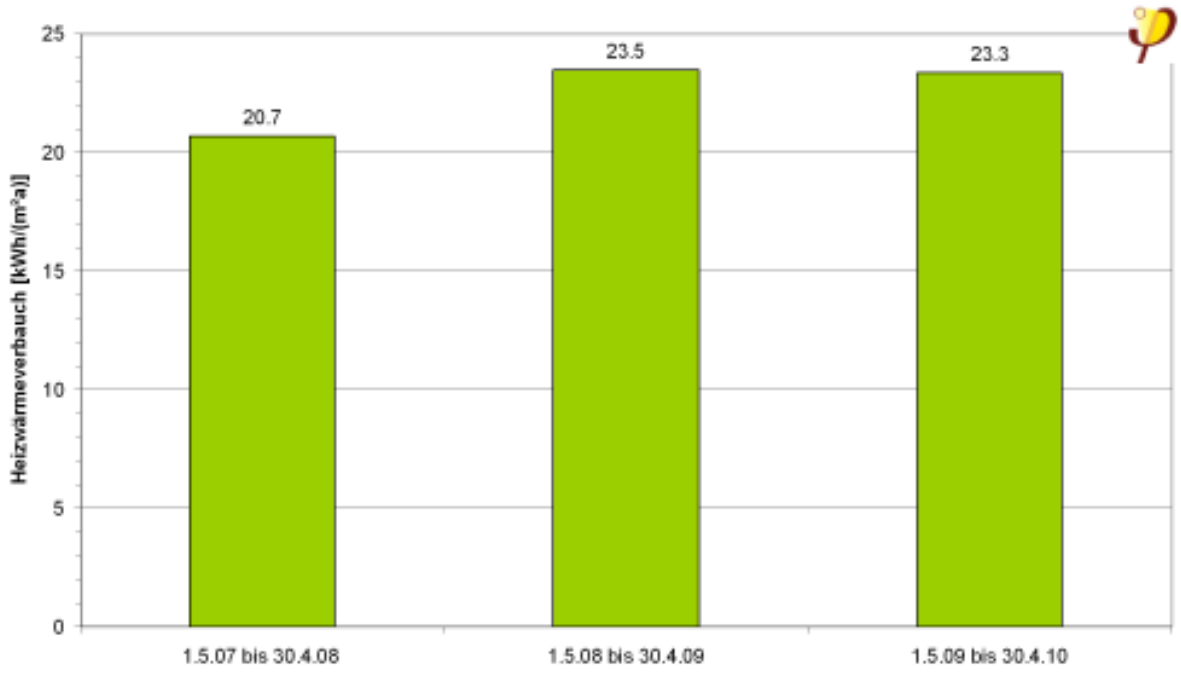


Abbildung 69: Heizwärmeverbrauch in den drei vollständigen Messjahren.

Der Heizwärmebedarf liegt um 3,7 bis 6,5 kWh/(m²a) höher als in der a-priori PHPP Monatsverfahren-Berechnung mit 17,0 kWh/(m²a) (Jahresverfahren ergibt 15,5 kWh/(m²a)). Die Ursachen dafür (Erdreich- und Raumlufttemperatur) sind in der Lage, die Abweichung zu erklären. Im übrigen befinden sich die Messwerte von 20,7 bis 23,5 kWh/(m²a) in der zu erwartenden Größenordnung für ein funktionierendes Passivhaus unter Berücksichtigung nutzerbedingter Streuungen.

Die zur Beheizung notwendige Heizkreispumpe wird – wie weiter oben beschrieben – durch die Bewohner von Hand zu Beginn der Heizzeit angeschaltet und zum Ende der Beheizung abgeschaltet. Über die Messdaten der Umwälzpumpe können so ab dem 13.11.2008 Beginn und Ende der Heizzeit bestimmt werden. In der folgenden Tabelle sind die Schaltzeiten angegeben:

Tabelle 11: Start und Ende des Betriebs der Heizungsumwälzpumpe ab November 2008.

	2008/2009	**2009/2010**
Start Beheizung	----	17.10.2009
Ende Beheizung	21.5.2009	24.05.2010

Heizlast

Bei der Betrachtung der tagesmittleren Heizlast (Abbildung 70) zeigen die Messwerte niedrige passivhaustypische Werte im Kernwinter von 6 bis 10 W/m² mit zwei etwas höheren Spitzenwerten. Betrachtet man die drei untersuchten Winterzeiträume, so werden im Winter 2009/2010 die höchsten Heizleistungen gemessen. Die maximale gemessene tagesmittlere Heizleistung beträgt moderate 13,0 W/m², sie wurde am 20.12.2009 gemessen (tagesmittlere Außentemperatur -11,2°C). Damit zeigen auch die gemessenen Heizlasten, dass es sich um ein funktionierendes Passivhaus handelt, welches den planerischen Erwartungen entspricht.

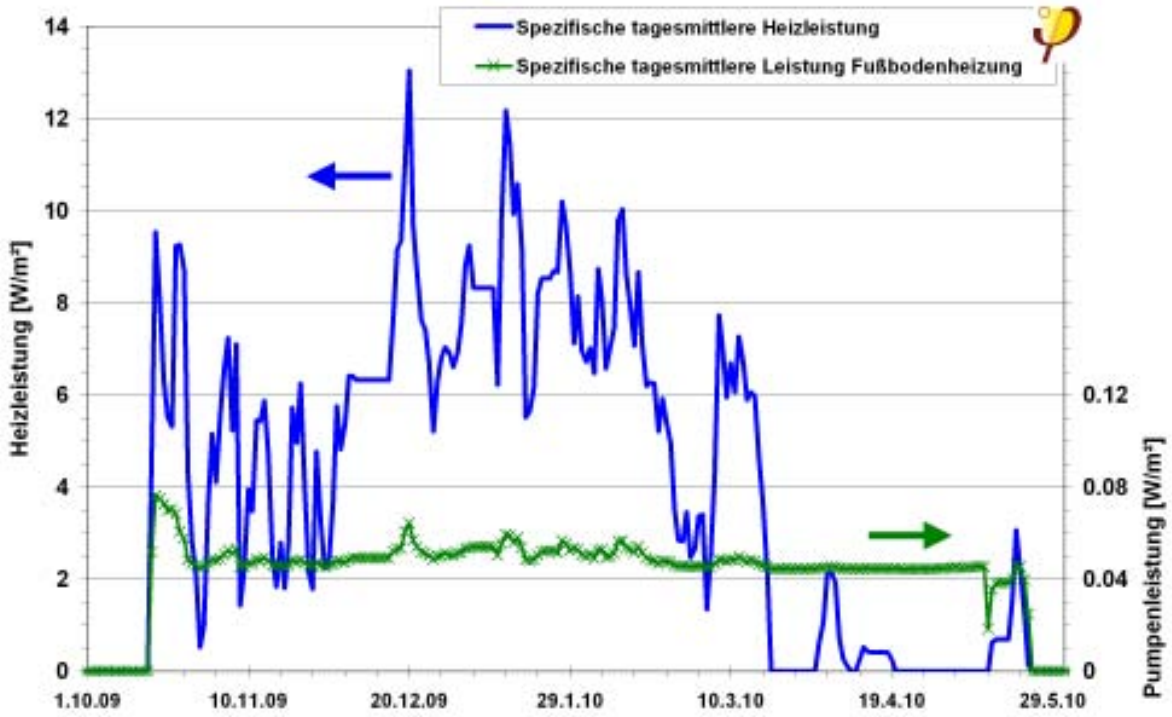


Abbildung 70: Spezifische tagesmittlere Heizleistung und Pumpenleistungen der Heizkreispumpe im Winter 2009/2010.

3.5.3 Erdreichbe- und -entladung

Zur Beurteilung des Erdreichwärmespeichers unter dem Gebäude sind die eingespeicherten und entnommenen Energiemengen von Interesse. Die monatlichen Einträge durch die Solaranlage, die Einspeisung in das Erdreich sowie die Entnahme aus dem Erdreich für die gesamte Untersuchungszeit sind in Abbildung 71 dargestellt. Es sind deutliche Jahresgänge zu erkennen, welche mit der jahreszeitlichen solaren Einstrahlung und dem Heizwärmeverbrauch korrespondieren. In der Übergangszeit und sogar im Winter gibt es immer sowohl eine Energieentnahme als auch eine (geringe) Einspeicherung in den Erdreichwärmespeicher. Auch im Winter gibt es strahlungsreiche Tage mit Energieerträgen, die dem Erdreichwärmespeicher zugeführt werden (vgl. dazu auch die Globalstrahlungssummen in Abbildung 39). In der Summe überwiegt im Winter erwartungsgemäß die Wärmeentnahme deutlich.

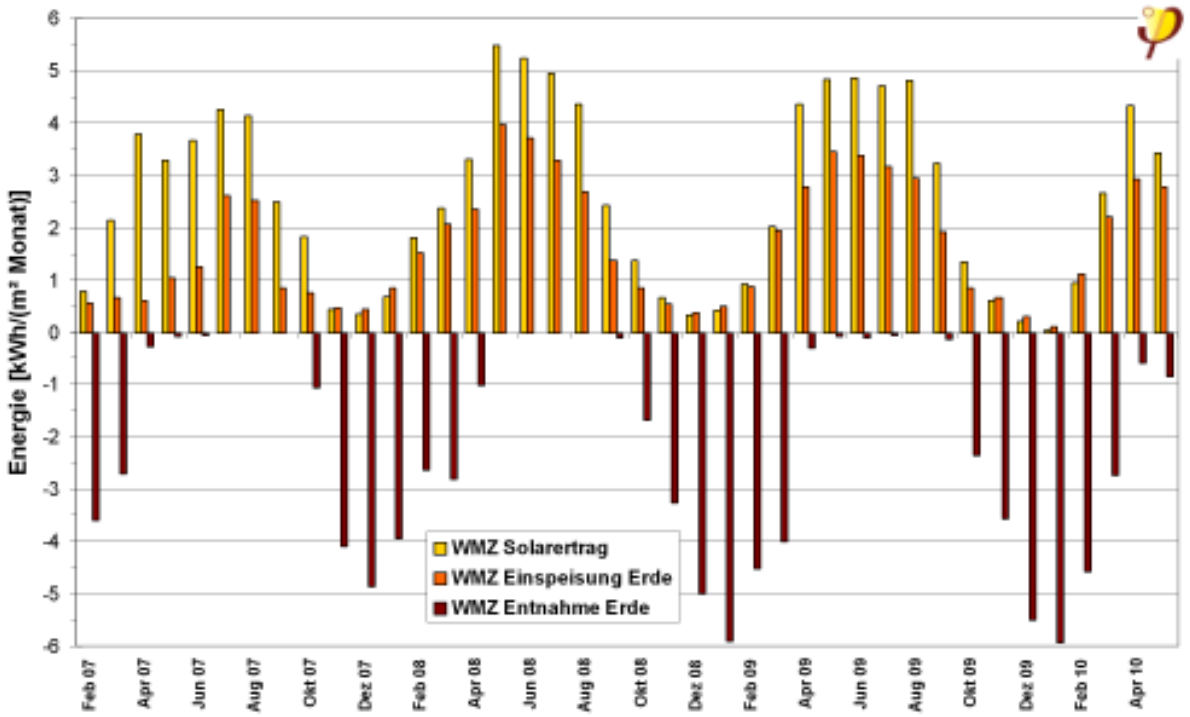


Abbildung 71: Monatliche Wärmemengen des Solarertrages, der Energieeinspeisung in das Erdreich und der Energieentnahme aus dem Erdreich.

Erst die Jahressummen der Erdreichbeladung und Erdreichentnahmen in Abbildung 72 zeigen, welche Größe in der Jahresbilanz überwiegt: Die Bilanz ist relativ ausgeglichen, es wird dem Erdreich aber in jedem Jahreszeitraum immer etwas mehr Wärme entzogen als eingespeichert wurde. Die jährlichen Differenzen betragen 1,9 bis 3,9 kWh/(m²a), was absolut 289 bis 595 kWh/a entspricht. Das Erdreich unter dem Gebäude zeigt bisher von Jahr zu Jahr um etwa 2 K niedrigere Minimaltemperaturen. Das Erdreich wird also jedes Jahr weiter ausgekühlt als im jeweiligen Vorjahr, was ebenfalls auf eine Nettowärmeentnahme hinweist. Ein Teil der entnommenen Energiemenge kann aus der Umgebung nachgeströmt sein. Dieser Zusammenhang und die zu erwartende weitere Temperaturentwicklung des Erdreichwärmespeichers werden im Abschnitt 4.1.2.1 ab Seite 97 per Simulation untersucht.

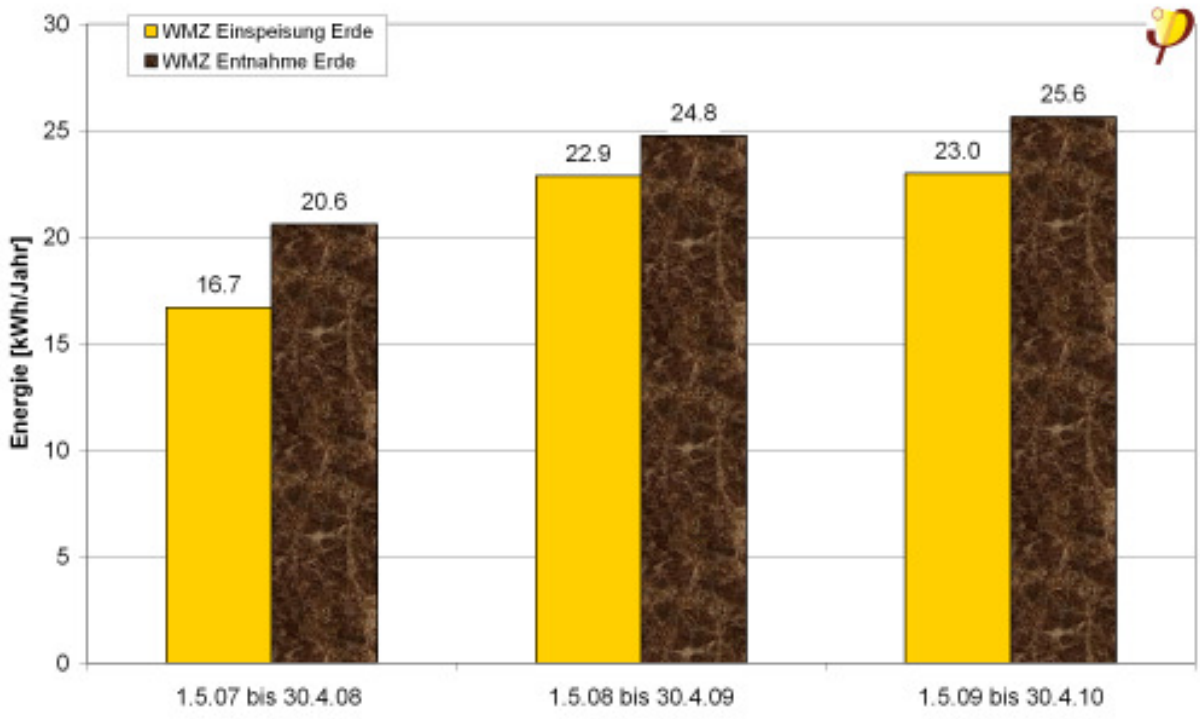


Abbildung 72: Spezifische Jahressummen der Energieeinspeisung in das Erdreich und der Energieentnahme aus dem Erdreich.

3.5.4 Wärmepumpe

Wird - wie in Abbildung 73 - die dem Erdreich entnommene Energiemenge der von der Wärmepumpe gelieferten Energiemenge gegenübergestellt, so ergibt sich erwartungsgemäß regelmäßig eine Differenz. Diese ist auf den Stromeinsatz durch die Wärmepumpe (WP) zurückzuführen. Die von der WP gelieferte Energie, welche die Temperaturen auf ein höheres Niveau hebt, wird in den Warmwasser-Kombispeicher eingespeichert und/oder direkt dem Heizungskreis zugeführt (je nach Ventilstellung).

Im Winter liegt der maximale gemessene monatliche Stromeinsatz für das Gerät bei 2,6 kWh/(m²mon), was einem maximalem Gesamtverbrauch von 395 kWh/mon im Januar 2010 entspricht. Damit wurden in dem Monat 7,96 kWh/(m²mon) Wärme erzeugt (entsprechend 1210 kWh/a). Das entspricht einer Monatsarbeitszahl nur des Gerätes (ohne Berücksichtigung der Pumpen) von 3,06 im Januar 2010.

Bei der weiteren Untersuchung der Wärmepumpe zeigt sich, dass der sommerliche Stromverbrauch des Gerätes fast ausschließlich aufgrund des Standby-Betriebs zustande kommt. Die Standby-Leistung beträgt 8,6 Watt, was einem Jahresverbrauch von 75 kWh entspricht. Hier ist noch Verbesserungspotential vorhanden. In den Sommermonaten sollte eine generelle Abschaltung des Gerätes realisiert werden. Würde das Gerät vom 01. Mai bis 30. September ausgeschaltet, würden keine

ineffizienten Kurzlaufzeiten entstehen und 31 kWh/a Standbystrom eingespart werden.

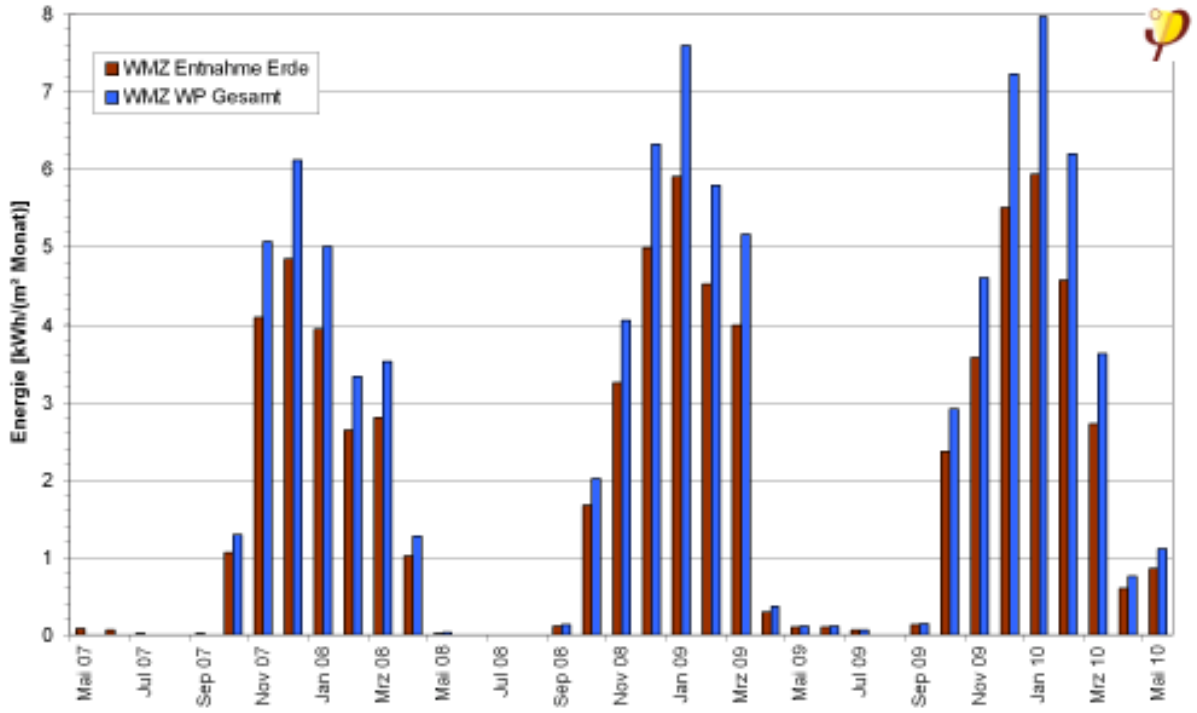


Abbildung 73: Monatliche Wärmemengen der Energieentnahme aus dem Erdreichwärmespeicher sowie die gelieferte Energiemenge durch die Wärmepumpe im bilanzierten Jahreszeitraum.

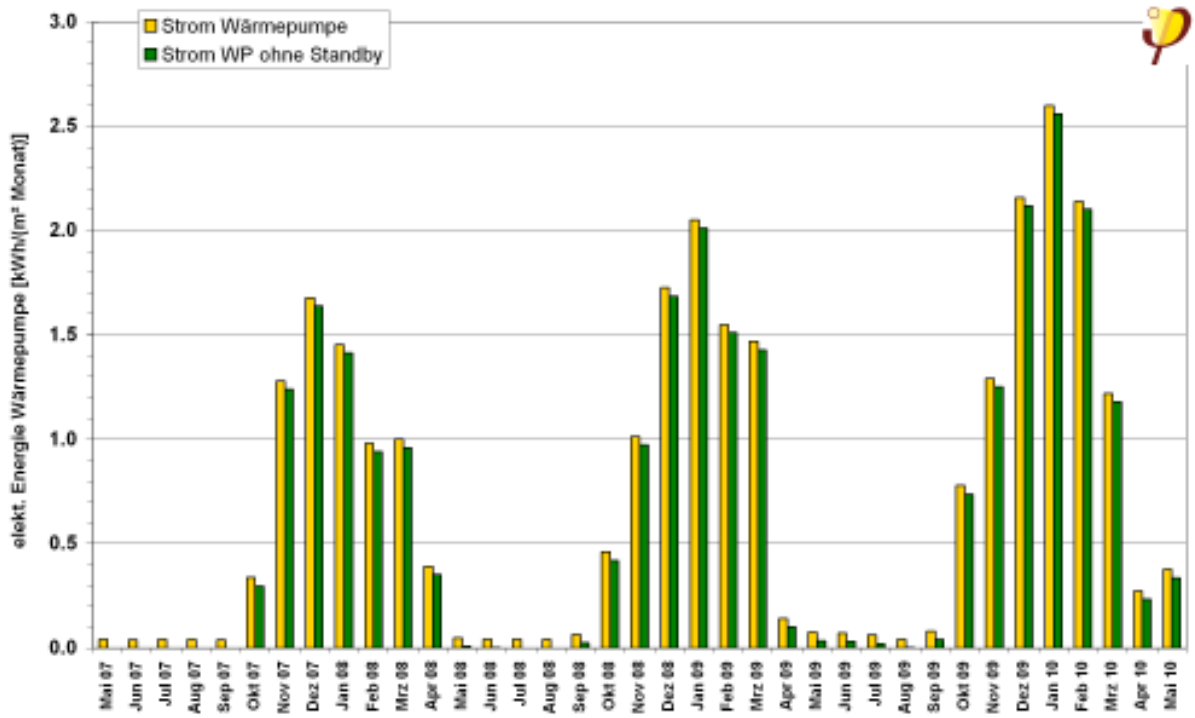


Abbildung 74: Monatliche Stromverbräuche der Wärmepumpe mit und ohne Standby-Verbrauch im Messzeitraum.

Die elektrischen Jahresverbräuche der Wärmepumpe sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 12: Elektrische Jahresverbräuche der Wärmepumpe in den drei Messjahren.

	Strom Wärmepumpe	
	kWh/a	kWh/(m²a)
01.05.2007 bis 30.04.2008	1112,7	7,32
01.05.2008 bis 30.04.2009	1313,1	8,64
01.05.2009 bis 30.04.2010	1639,3	10,78

3.5.4.1 Arbeitszahl Wärmepumpe

Die Arbeitszahl einer Wärmepumpe (WP) ist definiert als das folgende Verhältnis:

$$Arbeitszahl = \frac{Nutzen}{Aufwand} = \frac{Wärmelieferung}{Stromeinsatz}$$

Je höher also die Arbeitszahl, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe.

Die Monatsarbeitszahlen der hier vermessenen Wärmepumpe schwanken im Winter zwischen 2,2 und 4,4. Die Jahresarbeitszahlen (JAZ) betragen 3,1 bzw. 3,6 (siehe Abbildung 75). Darin sind die Standby-Stromverbräuche der Sommermonate ent-

halten, nicht aber die notwendigen Umwälzpumpen. Werden nur die Arbeitszahlen in der Winterperiode (Oktober bis April) berücksichtigt, liegen diese mit 3,6, 3,7 und 3,2 geringfügig besser als die JAZ.

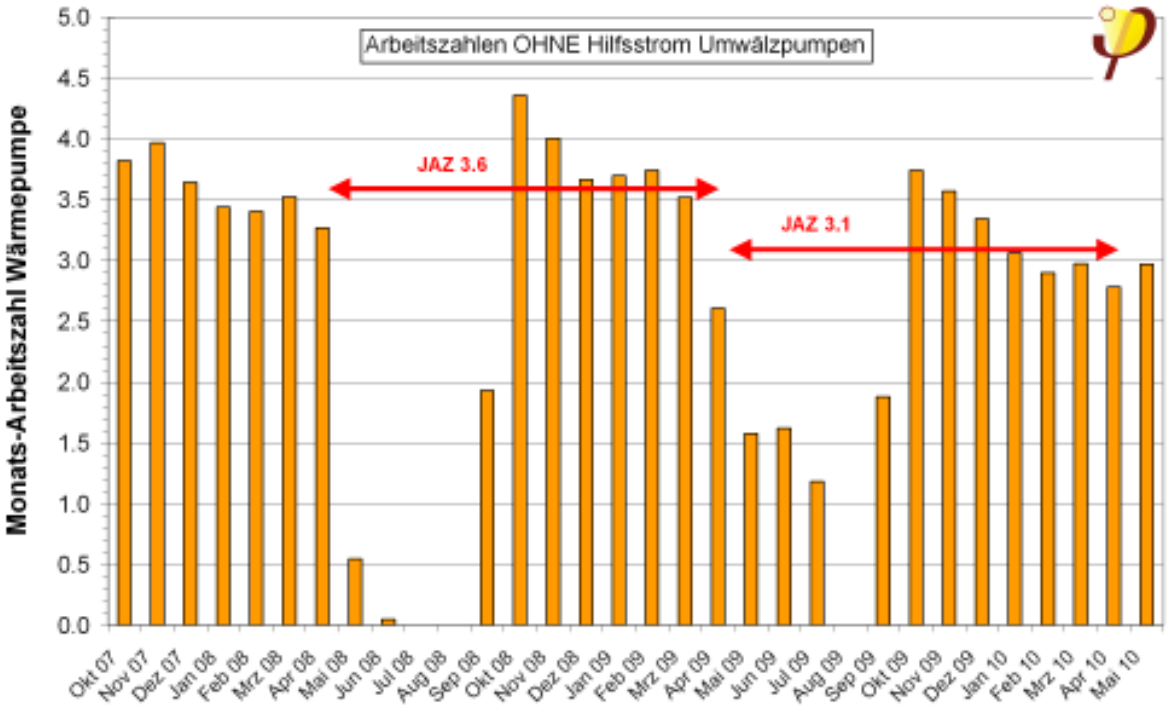


Abbildung 75: Monats- und Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe ohne Stromverbrauch der Umwälzpumpen. Arbeitszahlen deutlich unter 3 treten nur in Zeiträumen mit vernachlässigbarem Wärmeverbrauch auf; sie wirken sich daher in der Jahresbilanz kaum aus (vgl. Abbildung 74).

Durch das sich im Laufe eines Winters abkühlende Erdreich unter dem Gebäude verschlechtert sich die Wärmequelle der Wärmepumpe. Dies hat Auswirkungen auf die Arbeitszahl; sie sinkt deutlich merkbar ab dem Winterbetriebstart im Oktober ab. In Abbildung 76 sind die monatlichen Mittelwerte der Erdtemperaturen unter dem Gebäude dargestellt. Dafür wurden exemplarisch die mittlere Temperatur der beiden Sensoren in der Hausmitte „Sauberkeitsschicht“ und „tief“ gebildet. Im Winter 2009/ 2010 ist die Verschlechterung der Arbeitszahlen besonders deutlich abzulesen. Als gekoppelter Effekt steigt im Laufe des Winters zunächst auch der Heizwärme-verbrauch des Gebäudes aufgrund der sinkenden Außentemperaturen. Wie weiter oben im Abschnitt 3.3.1 bereits gezeigt wurde, stößt das System dann bei niedrigen Erdreichtemperaturen an seine Leistungsrenzen: Der Anteil, der dem System durch die Wärmepumpe direktelektrisch zugeführt wird, steigt damit an, womit die Arbeitszahl sinkt. Ab März erhöhen sich die Temperatur unter dem Haus aufgrund des, durch das gestiegene Solarangebot resultierenden geringeren Heizwärme-verbrauchs und damit gleichzeitig der größeren ins Erdreich eingespeicherten Energiemenge. Damit steigt dann auch die Arbeitszahl der Wärmepumpe wieder leicht an.

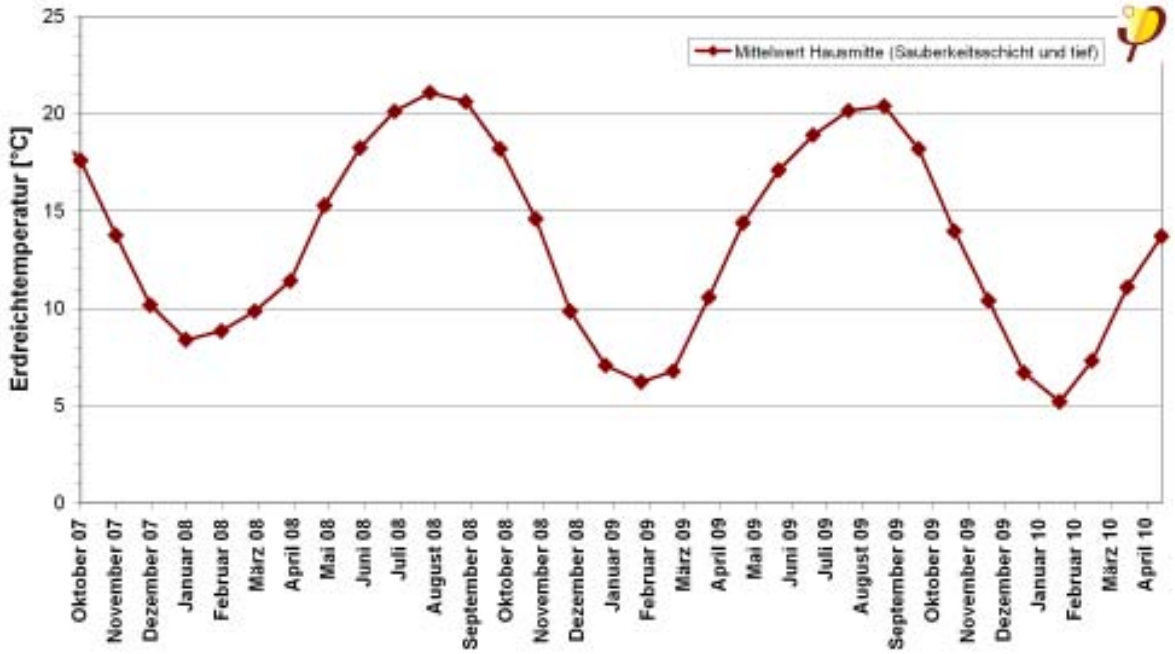


Abbildung 76: Monatsmitteltemperaturen im Erdreich unter dem Gebäude (Mittelwerte der Sensoren Haus Mitte „Sauberkeitsschicht“ und „tief“) während der gesamten Messzeit.

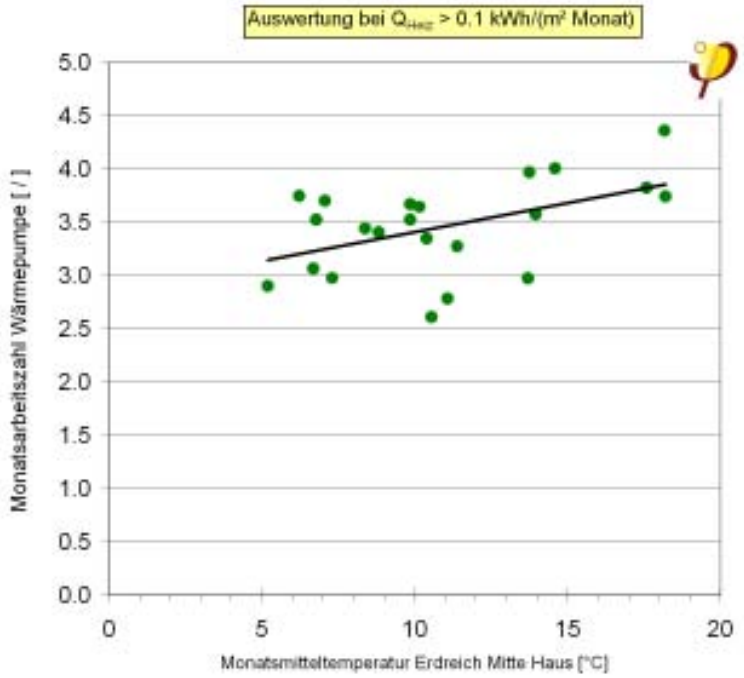


Abbildung 77: Korrelation der Monatsarbeitszahlen der Wärmepumpe mit der mittleren Temperatur des Erdreichs unter dem Gebäude. Dargestellt sind die Monatswerte alle drei Jahreszeiträume bei denen der Heizwärmeverbrauch größer als 0,1 kWh/(m² Monat) war.

Die **Korrelation** zwischen der monatlichen Arbeitszahl der Wärmepumpe und der mittleren Erdreichtemperatur unter dem Gebäude wird erkennbar, wenn die beiden

Größen gegeneinander aufgetragen werden. In Abbildung 77 ist dies für alle Monatswerte mit einem nennenswerten Heizwärmeverbrauch (> 0,1 kWh/(m² Monat) erfolgt. Die Korrelationsgrade verdeutlicht den Trend.

Betrachtet man den Primär- und den Sekundärkreislauf des Versorgungssystems „Wärmepumpe“, werden mindestens zwei weitere Umwälzpumpen benötigt. Werden die Stromverbräuche der Solepumpe und der Umwälzpumpe „Lieferung WP“ ebenfalls auf der Aufwandseite berücksichtigt, ergibt sich ein „**Systemnutzungsgrad**“. Da die Stromverbräuche der Umwälzpumpen erst ab Dezember 2008 vorliegen, können die Daten vollständig nur für das letzte Messjahr angegeben werden.

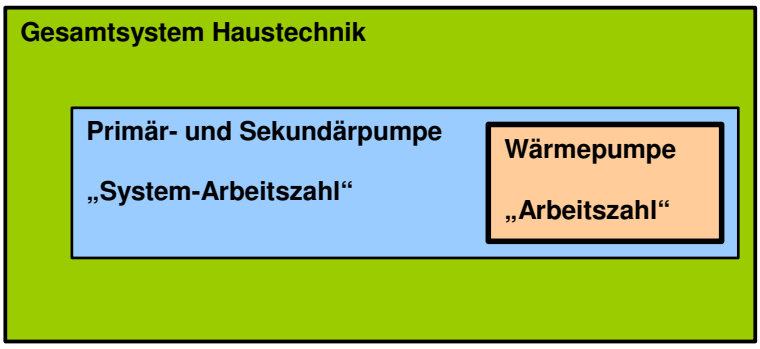


Abbildung 78: Kennwerte zur Bewertung der Wärmepumpe.

In Abbildung 79 sind die monatlichen und der Jahresvergleich der Arbeitszahlen ohne und mit Berücksichtigung der beiden Umwälzpumpen dargestellt. Erwartungsgemäß liegen die System-Arbeitszahlen niedriger als die Arbeitszahlen nur der Wärmepumpe allein. Der Unterschied fällt hier besonders gravierend aus, da die Solepumpe mit ihren ungeregelten 180 Watt einen hohen elektrischen Verbrauch aufweist. Die Jahresarbeitszahl des Systems sinkt um 0,8 auf nur noch schwache 2,3.

Wird berücksichtigt, dass eine deutlich effizientere Solepumpe eingesetzt wird und diese dann nicht gegen ein geschlossenes Ventil arbeitet (vgl. Abschnitt 3.4.2) ergibt sich eine System-Arbeitszahl von 2,9, was einer Reduzierung um dann nur noch 0,2 entspräche. Damit ist zu erkennen, wie stark der Stromverbrauch der sehr leistungsstarken Solepumpe in der Systembewertung zu Buche schlägt.

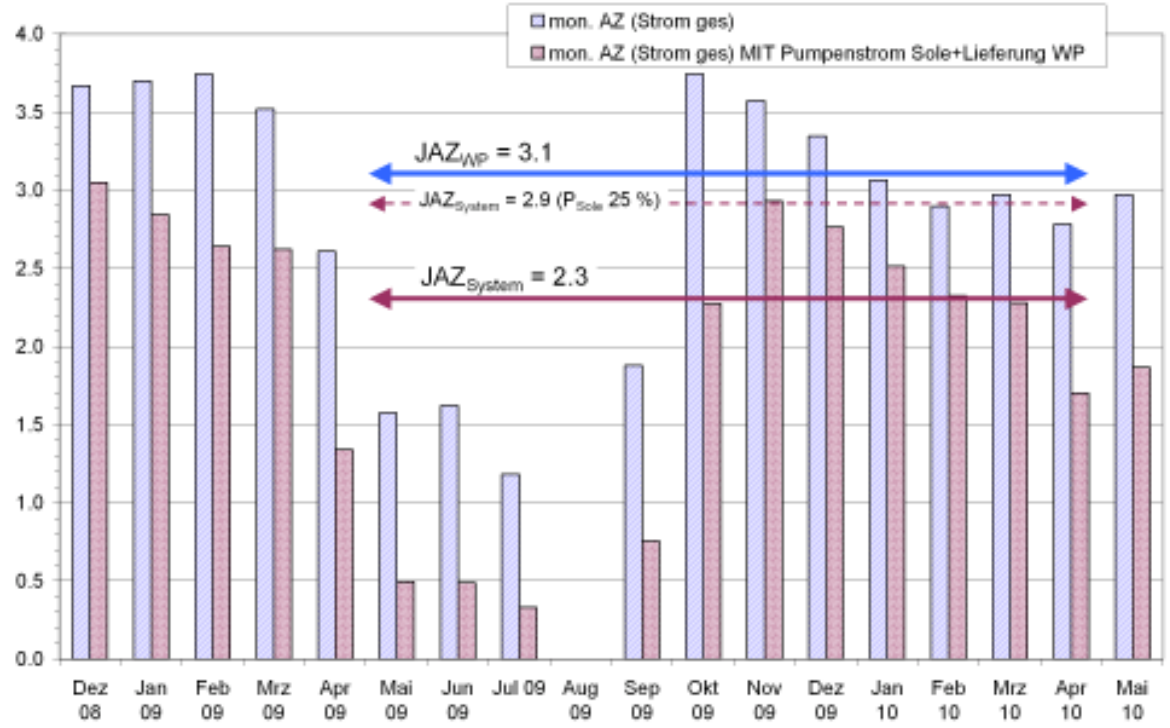


Abbildung 79: Monats- und Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe (ohne Stromverbrauch der Umwälzpumpen) und als System-Arbeitszahl inkl. der Stromverbräuche der Umwälzpumpen. Die System-Arbeitszahl ist als Jahresmittelwert zusätzlich auch noch dargestellt mit dem Ansatz des auf 25 % reduzierten Stromverbrauchs der Solepumpe.

Die mögliche Verbesserung durch eine in der Größe besser angepasste Wärmepumpe wird im Abschnitt 4.2 diskutiert.

Ein Maß für die Untergrenze einer WP-Arbeitszahl ergibt sich im Vergleich mit einer üblichen Gasversorgung eines Gebäudes: Der Primärenergiekennwert von Strom 2,6 muss dazu mit dem von Erdgas 1,1 ins Verhältnis gesetzt werden. Dann ergibt sich der **Wert von 2,4**. Diese Grenze sollte die System-JAZ einer Wärmepumpe mindestens erreichen um mit einem mit Erdgas versorgten Gebäude konkurrieren zu können. Wenn in dem Gebäude die oben genannten Verbesserungen realisiert werden, können akzeptable Werte erreicht werden (siehe Abbildung 79).

In anderen Untersuchungen ergeben sich ähnliche Ergebnisse für die JAZ. In [Auer/Schote 2007] wird als Mittelwert von 131 ausgewerteten Erdwärmepumpen die Jahresarbeitszahl von 3,5 angegeben (Werte von 2,9 bis 3,6). Für Luftwärmepumpen ergeben sich in der Studie mit der mittleren JAZ 2,65 deutlich schlechtere Werte.

3.5.5 Solare Beladung des Warmwasserkombispeichers

Bei dem vorliegenden Messkonzept kann die solare Speicherbeladung des Kombispeichers aus der Differenz des Solarertrags und der Erdreicheinspeicherung berechnet werden. Aus dem Warmwasserkombispeicher wird Wärme zur Beheizung

wie auch zur Warmwassererwärmung entnommen. Bei dieser Berechnung ergeben sich im Winter kleinere negative Werte (siehe Abbildung 80). Dabei handelt es sich um Umspeicherungen aus dem Warmwasserspeicher ins Erdreich zu Zeiten mit weniger Solarertrag als umgespeichert wurde. Damit sind dies also Wärmemengen aus dem Speicher z.B. des Vortages, welche vermutlich auch durch den weiter oben beschriebenen Hydraulikfehler entstehen.

Die Daten zeigen üblicherweise – bis auf die Anfangssituation 2007 – monatliche Werte im Sommer zwischen 1,3 und knapp 1,9 kWh/(m² Monat). Als Jahressummen ergeben sich **9,7 bzw. 9,6 kWh/(m²a)** (Angabe für 2008/2009 bzw. 2009/2010).

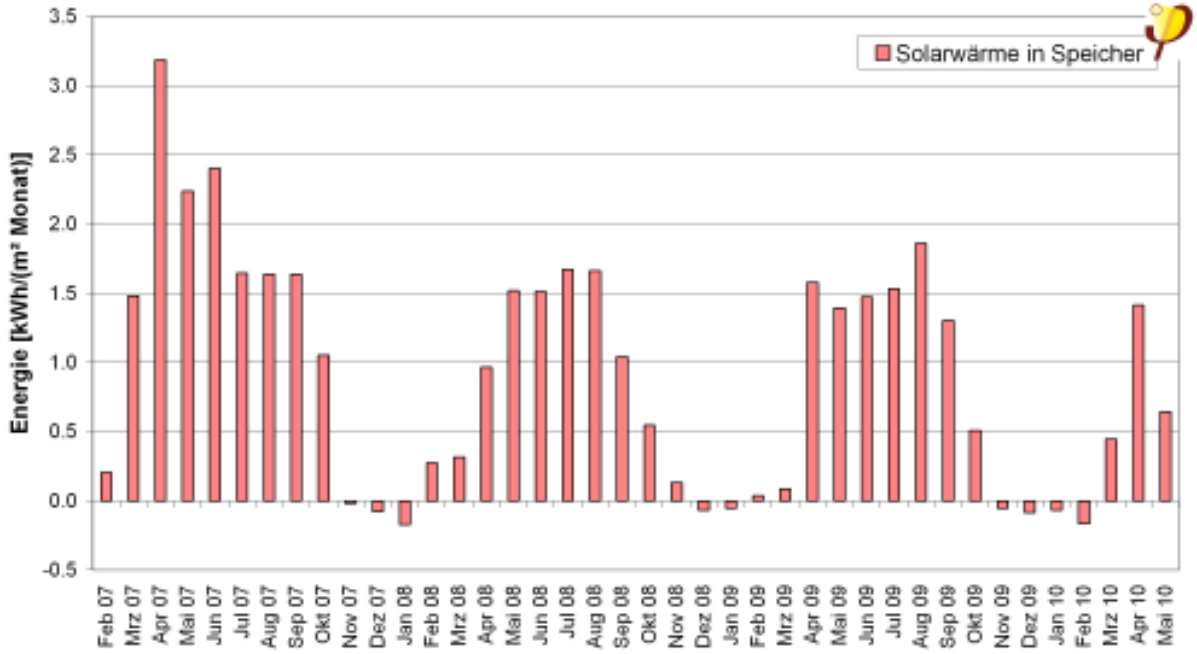


Abbildung 80: Berechnete spezifische Monatssummen der solaren Beladung des Warmwasserspeichers während der gesamten Messzeit.

3.5.6 Warmwasser

Die Warmwasserbereitung erfolgt entweder direkt über die thermische Solaranlage in den Kombispeicher oder es wird mittels der Wärmepumpe der Speicher beladen. Wenn das Temperaturniveau im oberen Speicherbereich nicht ausreicht, wird über die beiden elektrischen Durchlauferhitzer nur das gezapfte Warmwasser nachgeheizt. Damit wird vermieden, dass der obere Teil des Warmwasserspeichers immer direktelektrisch auf Temperatur gehalten wird.

Thermische Warmwasserbereitung

Ein gesonderter Wärmezähler für den Warmwasserverbrauch wurde bei dem Messkonzept aufgrund der begrenzten finanziellen Mittel nicht vorgesehen. Aus einer Speicherbilanzberechnung kann der Nutzenergieverbrauch für die Warmwasserbereitung inklusive der gesamten Verluste des Speichers mit allen Rohrleitungen bis zur Bilanzgrenze (Position der Wärmemengenzähler) bestimmt werden. Dabei stehen auf der Inputseite der Speicherbilanz der energetische Eintrag der Wärmepumpe und der Solaranlage ohne den Anteil der Erdreichbeladung. Abgezogen wird die entnommene Heizungswärme. Um die in einem gegebenen Zeitschritt aus dem Bilanzgebiet entnommene Wärmemenge ermitteln zu können, wird weiterhin die Änderung der inneren Energie des Speichers berücksichtigt. Dazu wird für jeden bilanzierten Zeitschritt aus der Temperaturänderung der mittleren Speichertemperatur die damit verbundene Änderung des Energieinhaltes vorzeichenrichtig bestimmt und abgezogen. Als Ergebnis erhält man dann den Energieaufwand der Warmwasserbereitung inkl. der gesamten Systemverluste bis zur Bilanzgrenze im betrachteten Zeitraum. Diese Verluste werden bei diesem Ansatz vollständig der Warmwasserbereitung zugeschlagen, obwohl die Verluste zum Teil den Heizwärmeverbrauch reduzieren und andererseits der Warmwasserspeicher auch durch das Heizungssystem genutzt wird.

Aufgrund von einigen Datenausfällen erfolgt die Berechnung des Energieaufwandes zur Warmwassererwärmung über die Mittelwerte aus den berechneten Tageswerten. Insgesamt ergibt sich für das Messjahr 01.05.2009 bis 30.04.2010 ein Jahresaufwand von 3020,4 kWh/a, entsprechend **19,9 kWh/(m²a)**. Der Verlauf der Monatsdaten über ein Jahr ist in Abbildung 81 dargestellt. Die Monatssummen schwanken zwischen 1,45 und 1,96 kWh/(m² Monat), ohne dass die übliche Sommersenke im Warmwasserverbrauch zu erkennen ist.

Tabelle 13: Mittelwerte der täglichen Aufwendungen zur Warmwasserbereitung inkl. der Verluste im Sommer- und Winterzeitraum 2009/2010 und im Gesamtjahr ohne die elektrische Warmwassernacherwärmung.

Mittelwerte	[kWh/Tag]	[kWh/(m² Tag]
Sommer (Mai 09 bis Sep. 09)	7,95	0,052
Winter (Okt. 09 bis April 10)	8,51	0,056
Gesamtjahr	8,28	0,054

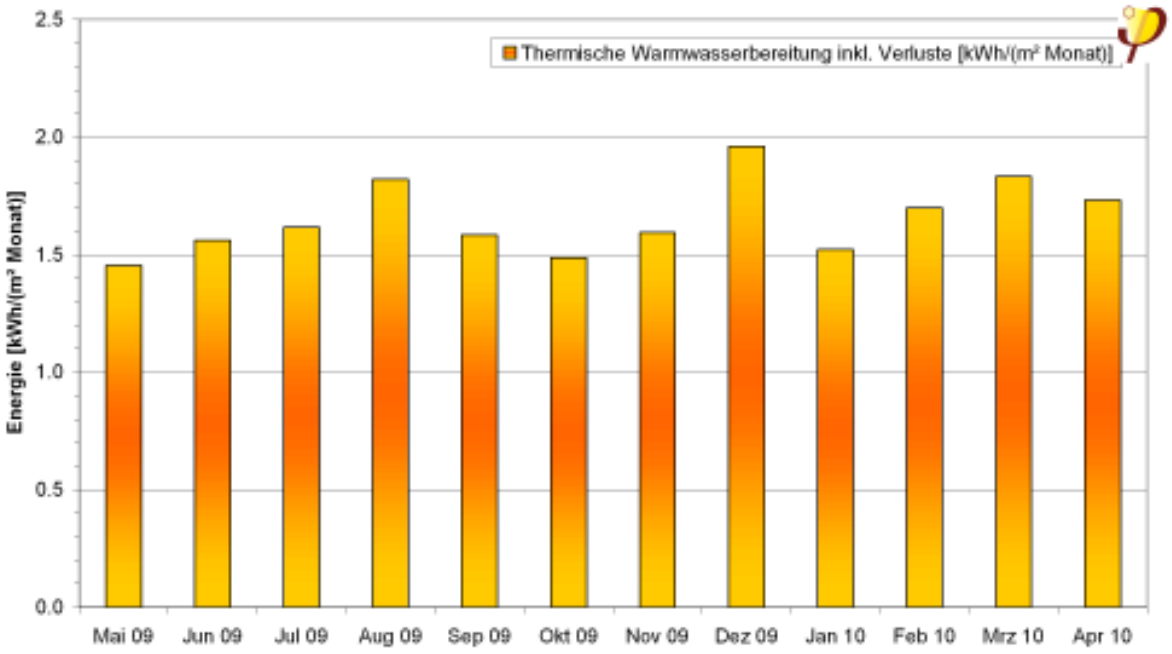


Abbildung 81: Monatliche spezifische Energieaufwendungen zur thermischen Warmwasserbereitung inkl. der Speicher- und Rohrleitungsverluste im Messzeitraum 2009/2010.

Elektrische Warmwasser-Nacherhitzung

Die direktelektrischen Energieaufwendungen für die Warmwassernachheizung durch die beiden Durchlauferhitzer für die Badezimmer (EG und OG) sind in Abbildung 82 (Monatswerte) und Tabelle 14 (Jahressummen) dargestellt. Die Bewohner nutzen das Badezimmer im EG hauptsächlich, wodurch der Verbrauch der beiden Geräte deutlich unterschiedlich ist. Im Bilanzjahr 2009/2010 beträgt die elektrische Nachheizung in Summe nur noch 0,52 kWh/(m²a).

In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass während der ersten 15 Monate deutlich mehr elektrische Energie benötigt wurde als in der Zeit danach. Durch die Messbegleitung des PHI war aufgefallen, dass diese Verbrauchswerte sehr hoch lagen. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde bei der Wartung der Anlage am 24. Juni 2008 festgestellt, dass die Kaltwasserbeimischung (Verbrühschutz) nach dem Wasserspeicher (vor den Durchlauferhitzern) zu niedrig eingestellt war. Diese Einstellung bestand noch aus der Zeit der Inbetriebnahme und war nicht verändert worden. Die Durchlauferhitzer haben in den Sommermonaten das solarerwärmte Trinkwarmwasser, welches durch die Beimischung wieder heruntergekühlt wurde, auf 55 °C nacherwärmt. An dem Wartungstermin wurde die Beimischung auf höhere Temperaturen eingestellt und die Warmwassertemperaturen an den beiden Durchlauferhitzern auf 45 °C reduziert. Die Auswirkungen sind deutlich sichtbar. Durch die neue Einstellung konnten im Vergleich vom ersten zum dritten Jahr insgesamt 7,3 kWh/(m²a) Stromverbrauch eingespart werden (entspricht über 1100 kWh/a). Auch diese Abläufe unterstreichen, wie wichtig ein gesamtsystemarer Ab-

gleich bei komplexen Anlagen ist – bei Integration aller Komponenten in ein Kompaktsystem kann dies durch den Hersteller realisiert werden.

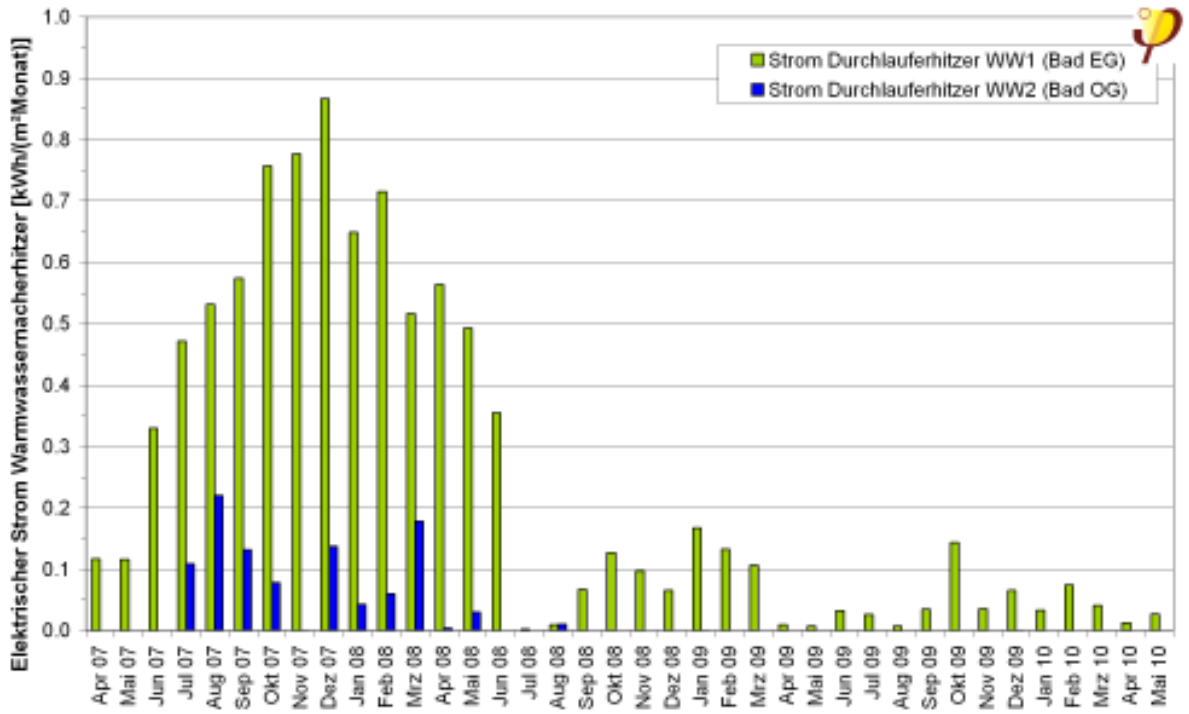


Abbildung 82: Elektrischer Strom zur Warmwassernacherhitzung im Messzeitraum (spezifische Messwerte).

Tabelle 14: Jahressummen der spezifischen Stromverbräuche zur Warmwassernacherhitzung.

Strom Durchlauferhitzer [kWh/(m²a)]	Bad EG	Bad OG
01.05.2007 bis 30.04.2008	6.87	0.96
01.05.2008 bis 30.04.2009	1.64	0.04
01.05.2009 bis 30.04.2010	0.52	0.00

Summe Warmwassererwärmung inkl. Verluste

Die Summe aus der thermischen und der elektrischen Warmwassererwärmung inkl. der Verluste im Messjahr 2009/2010 (Bilanzzeitraum: 01.05.2009 bis 30.04.2010) ergibt sich zu 19,9 + 0,5 = **20,4 kWh/(m²a)**. Damit liegt der Aufwand in der gleichen Größenordnung wie der Heizwärmeverbrauch; ein für Passivhäuser typisches Ergebnis. Unter solchen Bedingungen muss die Wärmeerzeugung vor allem auf die Warmwasserbereitung hin optimiert werden.

3.6 Energiebilanzen

Für die Energiebilanzierung werden die in den letzten Abschnitten dargestellten Größen zusammengestellt. Dabei wird unterschieden in eine end- und in eine primärenergetische Bilanz. Betrachtet wird hier die gesamte für die Versorgung und Haustechnik notwendige Energie, nur der Haushaltsstrom (Beleuchtung, Kühlung, Waschen, Unterhaltungselektronik, etc.) bleibt dabei unberücksichtigt.

3.6.1 Nutz- und Endenergie

Zur Darstellung der Energieströme sind in Abbildung 83 für die drei vollständig untersuchten Bilanzjahre die direkt gemessenen spezifischen Wärmemengen und Stromverbrauchswerte nebeneinander dargestellt. Die technischen Hilfsströme sind dabei nicht aufgeführt. Im direkten Vergleich lassen sich die unterschiedlichen Größen gut erkennen. Das erste Bilanzjahr ist dabei aufgrund der unterschiedlichen notwendigen Einregulierungen nicht repräsentativ. Insbesondere das deutliche Absinken der direktelektrischen Warmwassernacherwärmung ist nochmals gut zu erkennen.

Der Heizwärmeverbrauch ist in der gleichen Größenordnung wie die in das Erdreich eingelagerten bzw. entzogenen Energiemengen. Der Eintrag der Solaranlage ist etwa so groß wie die durch die Wärmepumpe erzeugten Energieerträge.

Für das Gebäude kann eine thermische Input-Output Bilanz der Nutzenergie dargestellt werden. Dafür wird in Abbildung 84 der Solareintrag in den Warmwasserspeicher und die von der Wärmepumpe gelieferte Energie als Input bilanziert. Als „Output“ sind die Energieanwendungen im Gebäude aufgetragen: Warmwasser inkl. der Verluste, Heizwärmeverbrauch und die Warmwassernachheizung. Diese erfolgt direktelektrisch und wird mit einem angenommenen Nutzungsgrad der Durchlauferhitzer von 95 % angesetzt. Da die Energiemenge zur Warmwasserbereitung nicht direkt gemessen wurde und die restlichen Messungen die üblichen Messfehler aufweisen, ergibt sich in der Bilanz ein kleiner Differenzbetrag von 0,43 kWh/(m²a) zwischen der In- und Outputseite. Dieser liegt in einer zu erwartenden und tolerierbaren Größenordnung. An der Bilanz ist zu erkennen, dass etwa die Hälfte des Energieaufwandes für die Warmwasserbereitung (inkl. der dabei erfassten Verluste) von der Solaranlage gedeckt werden kann (48 %). Dabei ist zu berücksichtigen, das real aus dem Warmwasserspeicher zumindest im Winter auch noch Heizungswärme entnommen wird. Die eindeutige Zuordnung der Solarwärme nur zur Warmwasserbereitung ist so strenggenommen nicht möglich.

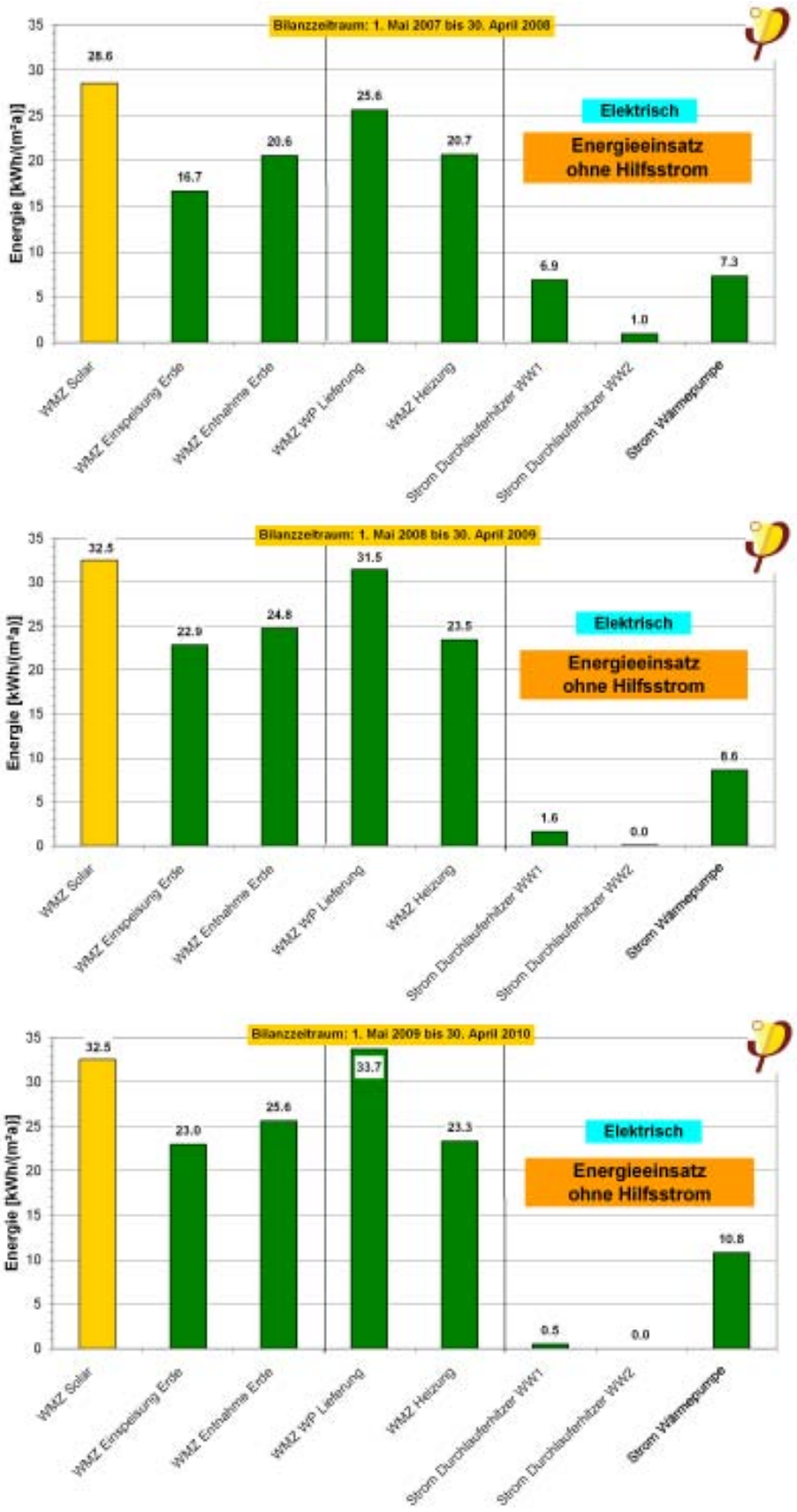


Abbildung 83: Gemessene Jahresverbräuche bzw. Einträge der unterschiedlichen Bereiche in den drei vollständigen Bilanzjahren ohne den Haushaltsstromverbrauch. Die Messung des Hilfsstroms für die drei Umwälzpumpen und die Lüftungsanlage wurde erst später begonnen. Daher kann sie nicht für alle Jahre dargestellt werden. Im Bilanzjahr 2009/2010 betrug der Verbrauch insgesamt 5,4 kWh/(m²a).

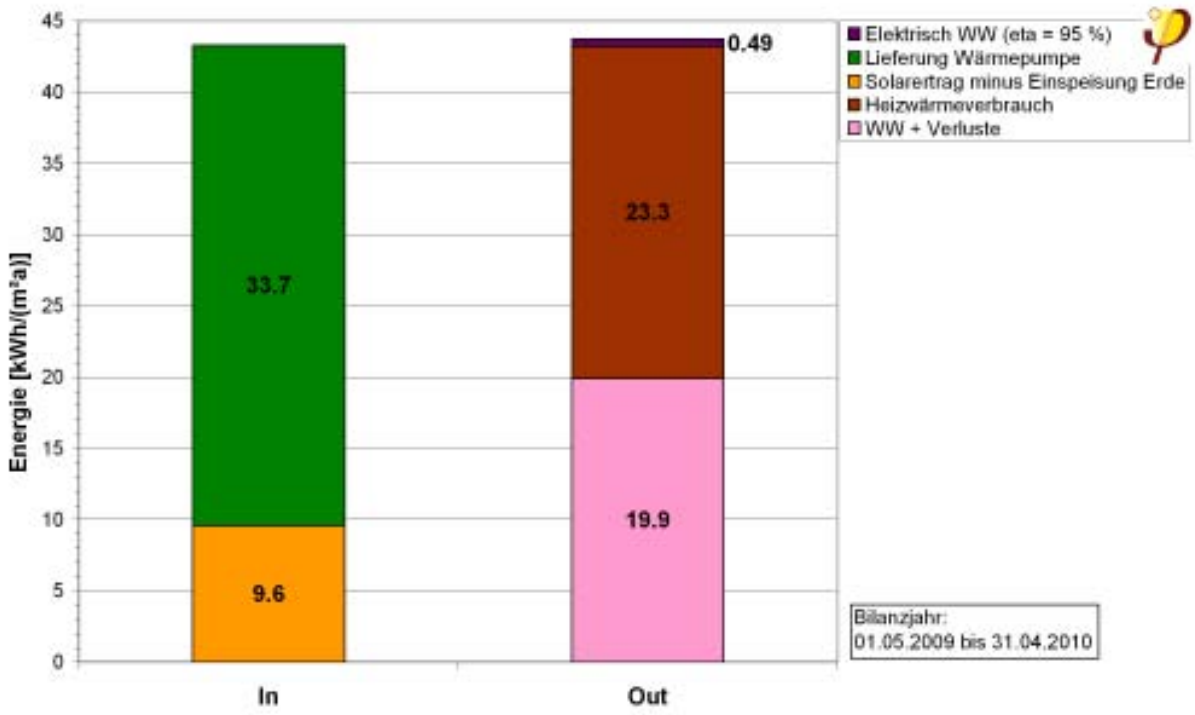


Abbildung 84: Nutzenergiebilanz vom dritten vollständigen Messjahr 2009/2010 ohne den Haushaltsstromverbrauch.

Für den Betrieb des Gebäudes wird bei dem gewählten Anlagenkonzept ein großer Teil der Energie über Solar- bzw. Umweltwärme gedeckt. Zur Veranschaulichung sind in der folgenden Abbildung die Energieströme dargestellt, welche die Gebäudegrenze überschreiten. Ein großer Teil der Solarenergie wird, wie weiter oben bereits ausgeführt, ins Erdreich eingespeist.

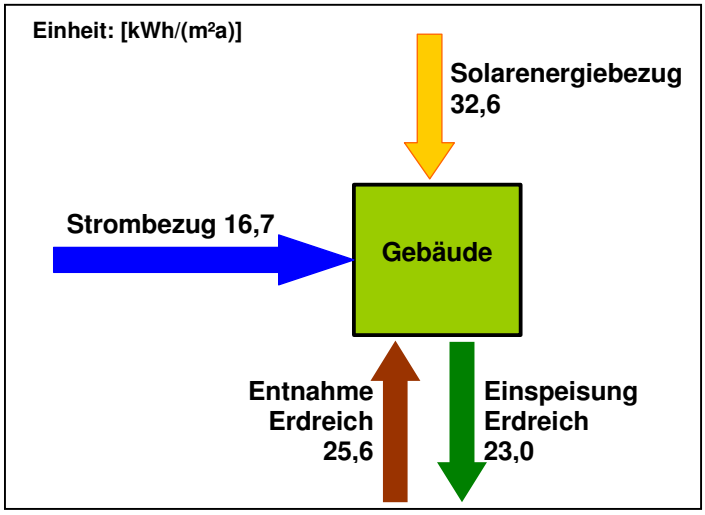


Abbildung 85: Energieströme über die Gebäudehülle im dritten Messjahr (2009/2010) ohne den Haushaltsstromverbrauch.

3.6.2 Primärenergie

Endscheidend für die ökologische Bewertung eines Gebäudes ist die primärenergetische Belastung der Umwelt. Mit diesem Maß wird die Umweltbelastung durch den Betrieb des Gebäudes festgestellt und ein Vergleich mit anderen Gebäuden möglich.

Zur Beurteilung der primärenergetischen Aufwendungen zur gesamten Versorgung des Gebäudes mit Wärme, Warmwasser und ausreichender Luftmenge müssen zunächst die eingesetzten nicht regenerativen Endenergieverbrauchswerte addiert werden. Dies sind bei der realisierten Anlagentechnik ausschließlich Strom (Wärmepumpe, Warmwassernacherwärmung, Lüftungsanlage sowie Umwälzpumpen). Insgesamt beträgt der Endenergieverbrauch im dritten Messjahr wie bereits dargestellt 16,7 kWh/(m²a).

Für die primärenergetische Beurteilung des Endenergieverbrauchs wird die vorgelagerte Prozesskette der Energieerzeugung und Umwandlung berücksichtigt. Der Primärenergiefaktor nach [Gemis] für elektrischen Strom beträgt 2,6 kWh_{Pri}/kWh_{End}. Damit ergibt sich für die Anwendungen der Primärenergiekennwert von 16,7 kWh/(m²a) x 2,6 = **43,5 kWh/(m²a)(Wohnfläche)**. Damit ist der gesamte Bereich der nicht regenerativen Versorgung des Gebäudes abgedeckt (Heizung, Warmwasser und Technikstrom inkl. Lüftungsgerät).

Bei der gesamten Untersuchung sind alle Verbrauchswerte zum besseren Vergleich mit anderen Gebäuden immer auf die tatsächlich beheizte Fläche bezogen („EBF“ = Energiebezugsfläche). Diese Energiebezugsfläche ist nicht zu verwechseln mit der deutlich größeren fiktiven Bezugsflächen „A_N“ („Gebäudenutzfläche“), die z.B. für die Berechnungen nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) verwendet wird. Diese, für den Energiebezug falsche, weil pauschal aus dem Gebäudeaußenvolumen berechnete Fläche, führt auf noch deutlich niedrigere Kenngrößen. Um auch diese Vergleichbarkeit zu ermöglichen, sind in Abbildung 86 alle Verbräuche zusätzlich auf die um 42 % größere Gebäudenutzfläche A_N bezogen (216,3 m²). Die Primärenergieverbräuche des Gebäudes für alle haustechnischen Anwendungen „reduzieren“ sich damit auf **30,6 kWh/(m²a).**

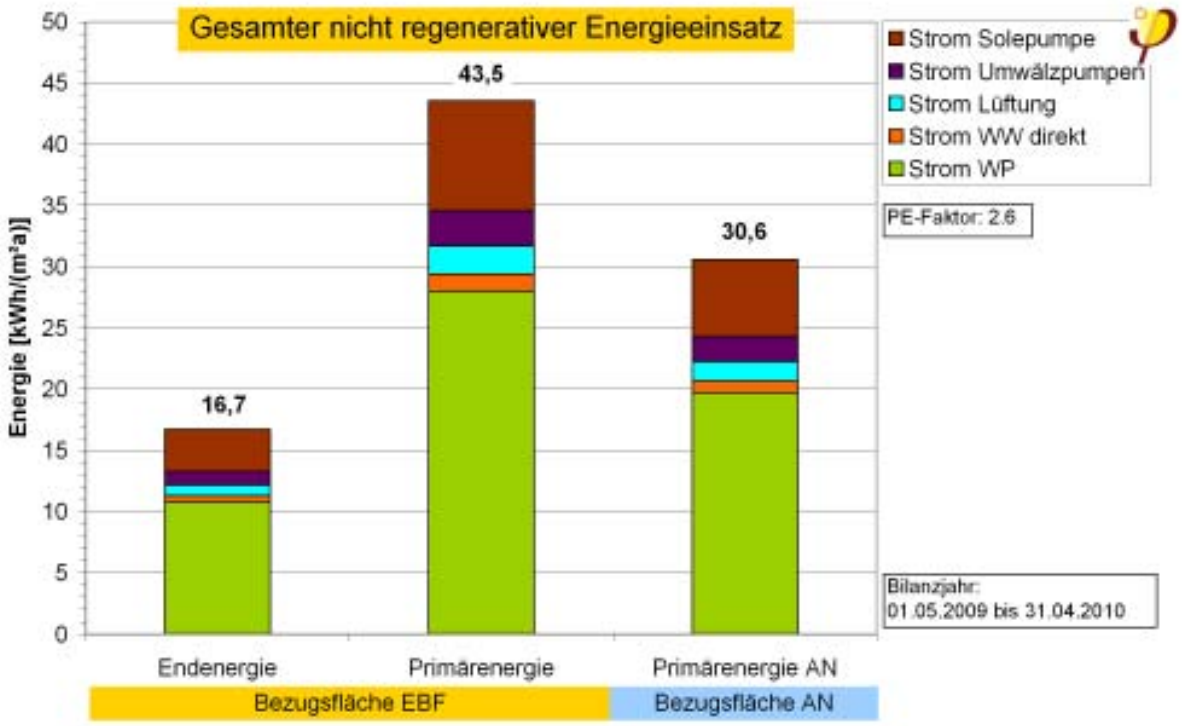


Abbildung 86: Gemessene nicht regenerative Endenergie für die gesamte Haustechnik (ohne Haushaltsstrom) mit ihrer primärenergetischen Bewertung (alles Elektroenergie) in Bezug auf die Energiebezugsfläche (EBF). Zum Vergleich ist zusätzlich der Primärenergiekennwert in Bezug auf die Fläche A_N nach EnEV dargestellt.

Die größeren Störungen der Anlage sollten bei der Bewertung des Systems als solches nicht berücksichtigt werden. Die in Abschnitt 3.4.2 diskutierten Verbesserungen der Stromverbrauchswerte der Solepumpe (um 75 %) sowie die Reduzierung der Laufzeit der Heizkreispumpe (Reduktion Stromverbrauch um 18 %) werden daher in einer erneuten Berechnung entsprechend der in Abbildung 86 berücksichtigt. Insbesondere durch die Reduktion des Aufwandes für die Solepumpe sinkt der Endenergiekennwert auf 14,2 und der Primärenergiekennwert auf 36,8 kWh/(m²a) (siehe Abbildung 87).

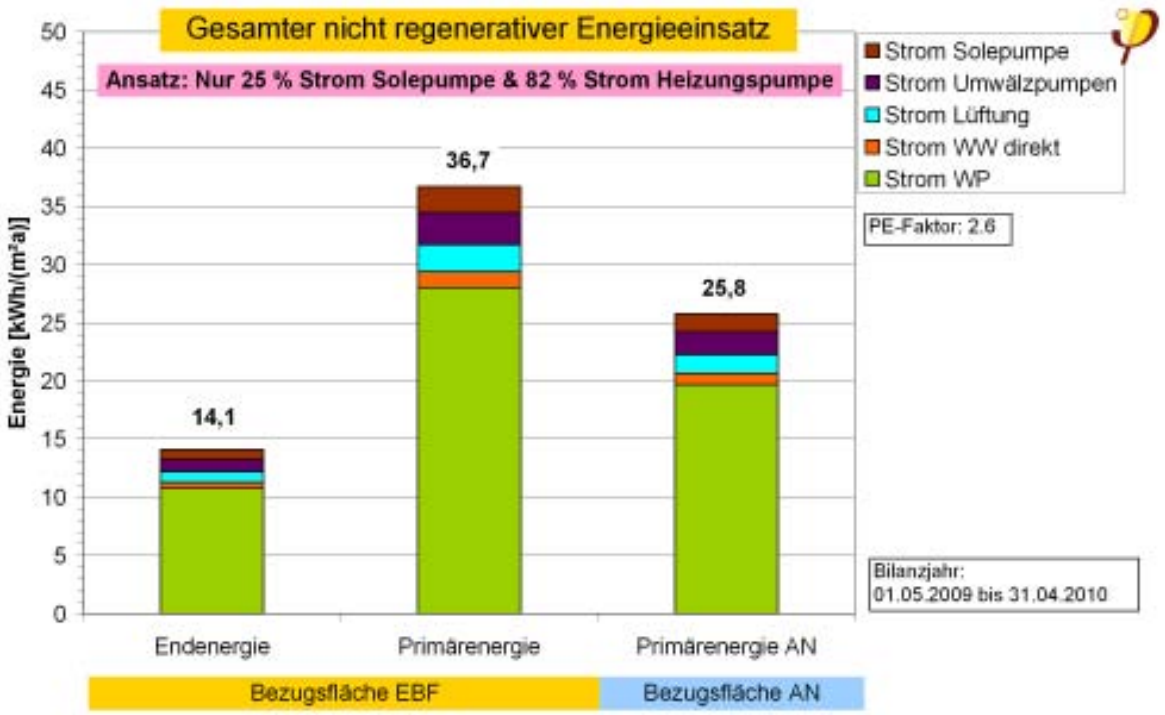


Abbildung 87: Darstellung wie in Abbildung 86 mit auf 25 % reduziertem Stromverbrauch der Solepumpe und 82 % Strom der Heizungspumpe.

Bei der Darstellung des „fehlerbereinigten“ Systems wurden **NICHT** die möglichen folgenden, etwas geringer ausfallenden Verbesserungen berücksichtigt:

- Abstellen des Umschichtens der Energiemenge aus dem Wasserspeicher ins Erdreich.

- Stromverbrauchsreduktion Solepumpe durch die **Verringerung des Volumenstroms** zum Betrieb des Solarkollektors (Erläuterung: Während der Erdreichbeladungszeiten ist eine Stromverbrauchsreduktion durch die reduzierten Druckverluste bei geringerem Volumenstrom um weitere 65 % möglich. Unter Berücksichtigung der Laufzeitenanteile Beladung/Entladung Erdreich führt das zu einer Einsparung von 34 % des Gesamtverbrauchs. Die Anpassung des Volumenstroms je nach Betriebsweise „Erdreichbeladung mit Solarkreis“ und „Erdreichentnahme“ erfordert aber eine weitere kleinere Pumpe, im Parallelbetrieb oder eine Pumpe bei der sich die Volumenströme durch die Steuerung anpassen lassen. Für den Betrieb des Kollektors reichen 500 l/h aus. Die Wärmepumpe benötigt quellenseitig mit mindestens 1150 l/h einen deutlich höheren Volumenstrom).

- angepasste Leistungsgröße der Wärmepumpe um Taktbetrieb zu vermeiden (siehe dazu auch Abschnitt 4.2).

- Vermeiden des ineffizienten Kurzbetriebs der WP von wenigen Minuten während der Übergangszeiten.

4 Simulationsrechnungen und Analysen

Die Untersuchung des Gesamtsystems Gebäude mit Versorgungstechnik wird neben der dargestellten Messdatenauswertung und -analyse durch unterschiedliche Simulationsuntersuchungen fortgeführt.

4.1 Analyse der Speichereffekte im Erdreich

Ein genaueres Verständnis der Vorgänge im Erdreich unter der Bodenplatte und in der Nähe des Gebäudes wird möglich, wenn die thermischen Ein- und Ausspeichervorgänge rechnerisch nachvollzogen werden. Die gemessenen Temperaturen und Wärmeströme wurden zu diesem Zweck mit dem zweidimensionalen Wärmestromprogramm HEAT2 abgebildet.

HEAT2 wurde Anfang der 90er-Jahre an der Universität Lund entwickelt. Es handelt sich um ein Finite-Differenzen-Programm, mit dem sowohl stationäre als auch zeitabhängige Wärmestromberechnungen durchgeführt werden können. Die Geometrieeingabe ermöglicht es, zum Rand des Modells hin exponentiell größer werdende Zellen einzugeben, was bei der Berechnung von Wärmeströmen im Erdreich besonders vorteilhaft ist. Das Programm wurde anhand analytisch lösbarer Testfälle validiert. Eingesetzt wurde die Version 7.1.

4.1.1 Simulationsmodell

HEAT2 erlaubt die zeitabhängige Berechnung der Temperaturen und Wärmeströme unter Berücksichtigung von bis zu drei zeitlich beliebig variierenden Randbedingungen. Dadurch war es möglich, typische Temperaturverläufe an der Erdreichoberfläche und der Innenoberfläche der Bodenplatte sowie die zugehörigen Wärmeströme, die der Sauberkeitsschicht aufgeprägt werden, in der Simulation abzubilden. Hierzu wurden die gemessenen Werte aus der Periode 1.5.09 bis 1.5.10 verwendet. Um ausreichend lange Zeiträume betrachten zu können, wurden die Zeitverläufe über 10 Jahre periodisch aneinander gereiht.

Eine dreidimensionale Berechnung war nicht erforderlich. Stattdessen reicht es aus, die Breite des zweidimensionalen Schnitts durch das Gebäude so zu wählen, dass sie gerade dem „charakteristischen Bodenplattenmaß“ B’ = A / (P/2) entspricht. Darin ist A die Grundfläche, P die Perimeterlänge. B’ ist also gerade die Tiefe einer unendlich langen Reihenhauszeile; für einen nahezu quadratischen Grundriss wie im vorliegenden Fall die halbe Kantenlänge des Quadrats. Bei diesem Ansatz werden sowohl die Wärmeverluste nach außen als auch die gesamte Wärmekapazität im Bereich unter der Bodenplatte durch die zweidimensionale Berechnung in sehr guter Näherung wiedergegeben. Die Tatsache, dass die Temperaturverteilung unter der extrem gut gedämmten Bodenplatte mit ihren Frostschürzen vergleichsweise homo-

gen ist, verbessert die Genauigkeit der zweidimensionalen Näherung weiter (vgl. [Schnieders 2004]).

Das verwendete Gebäudemodell ist in Abbildung 88 grafisch dargestellt. Aus Gründen der Rechenzeit wurde die Diskretisierung relativ grob gewählt. Es wurde nur eine Hälfte des Gebäudes abgebildet, das Erdreich hat insgesamt eine Ausdehnung von 30 m Breite und 20 m Höhe, sodass Rückwirkungen des unten und seitlich als adiabat angenommenen Randes keine bedeutende Rolle mehr spielen.

Das Simulationsmodell wurde jeweils mit der Jahresmitteltemperatur der Erdoberfläche initialisiert. Längere Einschwingperioden erwiesen sich für die hier zu untersuchenden Fragestellungen als unnötig. Eine detaillierte Abbildung der Geometrie der Rohrleitungen in der Sauberkeitsschicht, der Wärmeübergänge in den Leitungen etc. war ebenfalls nicht erforderlich, da die gemessenen eingespeisten bzw. entzogenen Wärmeströme dem Modell unmittelbar aufgeprägt wurden.

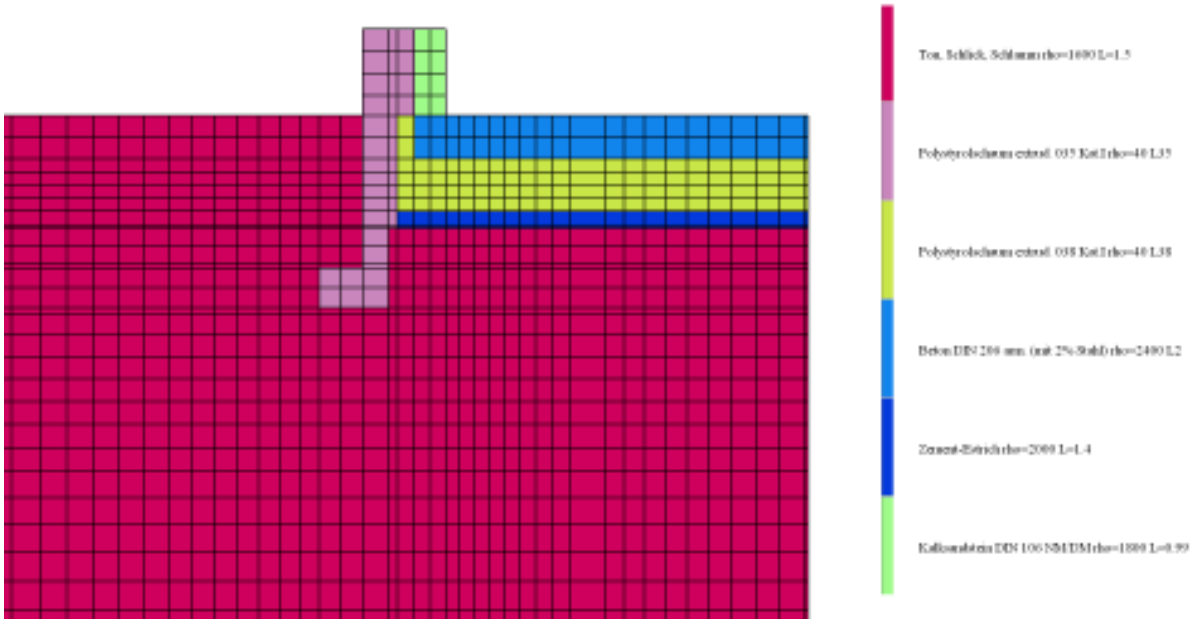


Abbildung 88: Ausschnitt aus dem zweidimensionalen Modell der Bodenplatte.

Die Erdreicheigenschaften wurden grob so angepasst, dass bei Aufprägen der gemessenen Wärmeströme und Außentemperaturen die gemessenen Erdreichtemperaturen durch die Simulation getroffen werden (Abbildung 89). Hierfür mussten etwas höhere Wärmeleitfähigkeiten (λ=1,5 W/(mK)) und Kapazitäten (C = 3,2 MJ/(m³K)) verwendet werden als sie an der BTU Cottbus gemessen wurden (λ = 1,17 W/(mK), C = 1,5 MJ/(m³K), s.a. Anhang). Solche Werte könnten vorliegen, wenn das Erdreich im Mittel eine höhere Feuchte aufweist als die gemessenen Proben. Das ist hier denkbar, denn die Bewohner berichten über ein Ansteigen des Grundwassers bei seltenen, extremen Starkregenereignissen bis auf eine Höhe von über 1 m unter Oberkante Gelände.

Aufgrund des grundsätzlichen Charakters der hier durchgeführten Untersuchungen erschien eine detaillierte Untersuchung der verbleibenden Abweichungen von Simulation und Messung – die z.B. auch durch Einschwingvorgänge zu Stande kommen können – nicht vordringlich.

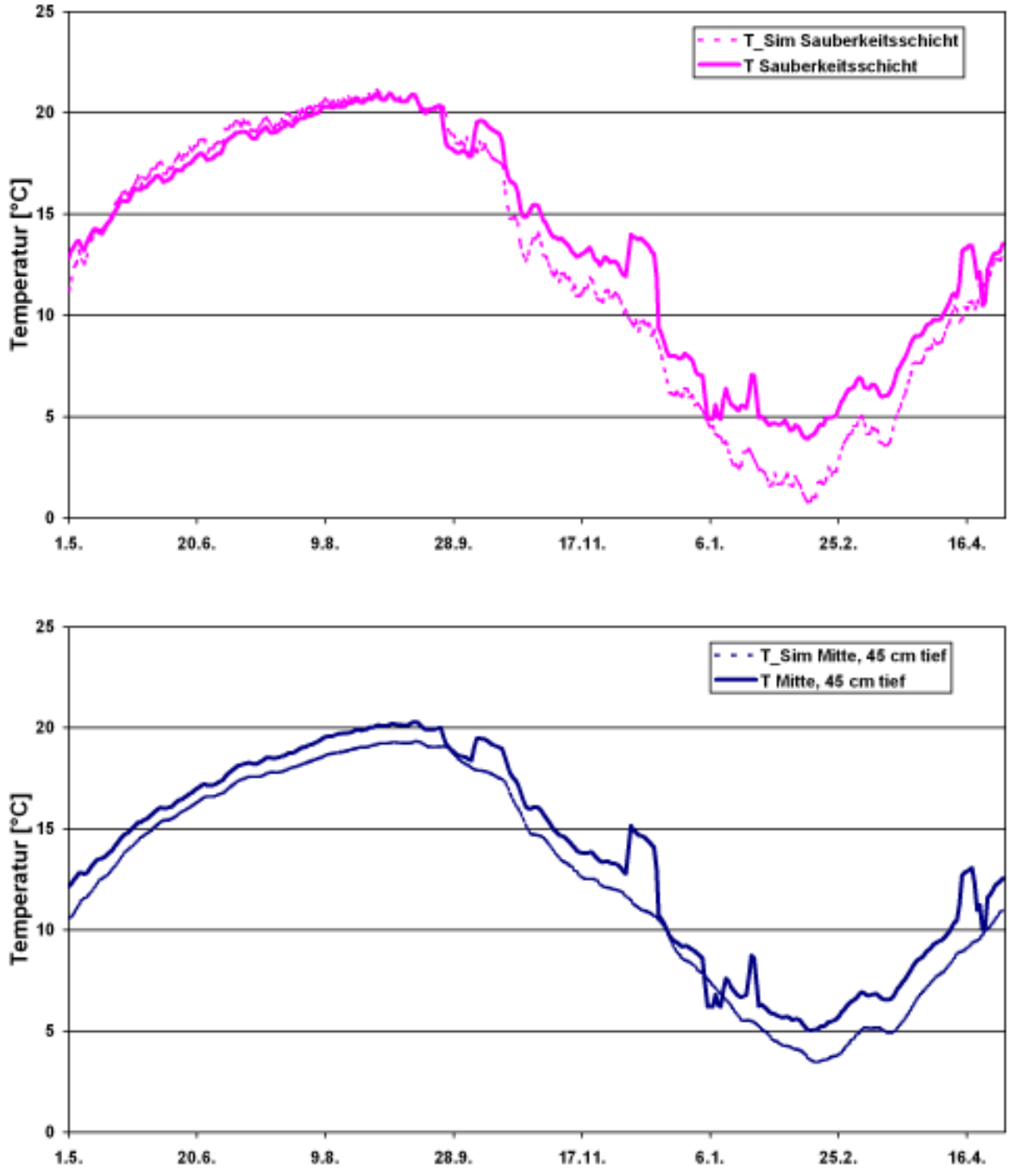


Abbildung 89: Gemessene und simulierte Temperaturen unter der Bodenplatte. Die gemessenen Temperaturen stellen jeweils Mittelwerte aller Sensoren unter der Bodenplatte in der entsprechenden Tiefe dar, die simulierten Werte wurden am rechten Rand des Modells, also in der Mitte der Bodenplatte, ermittelt.

4.1.2 Ergebnisse

4.1.2.1 Keine Gefahr langfristiger Erschöpfung des Erdreichs

Im verwendeten Datensatz werden im Jahr 3500 kWh Wärme in die Sauberkeitsschicht eingespeist und 3930 kWh entnommen. Von Interesse war daher zunächst, ob aufgrund des Netto-Wärmeentzugs aus dem Erdreich langfristig mit einer Erschöpfung der Wärmequelle Erdreich und damit mit funktionalen Problemen bei der Beheizung des Gebäudes gerechnet werden muss.

Es zeigt sich, dass diesbezüglich keine Schwierigkeiten zu erwarten sind. Die Wärmeströme in der Nähe des Hauses scheinen optisch bereits nach weniger als einem Jahr einen quasi-stationären Zustand erreicht zu haben (d.h. von einem Jahr zum nächsten ändert sich nichts mehr), wie Abbildung 90 illustriert. In der Tat ist nach 3 Jahren die relative Abweichung der Wärmeströme zwischen identischen Zeitpunkten aufeinander folgender Jahre kleiner als 1%, und zwar für alle untersuchten Wärmeströme im Bereich unter der Bodenplatte. Somit wird sehr rasch ein quasi-stationärer Zustand erreicht. Der beobachtete Netto-Wärmeentzug (vgl. die magentafarbene Kurve in Abbildung 90) stellt folglich kein Problem für die Funktionsfähigkeit des Gebäudes dar. Die fehlende Wärmemenge strömt aus der Umgebung nach.

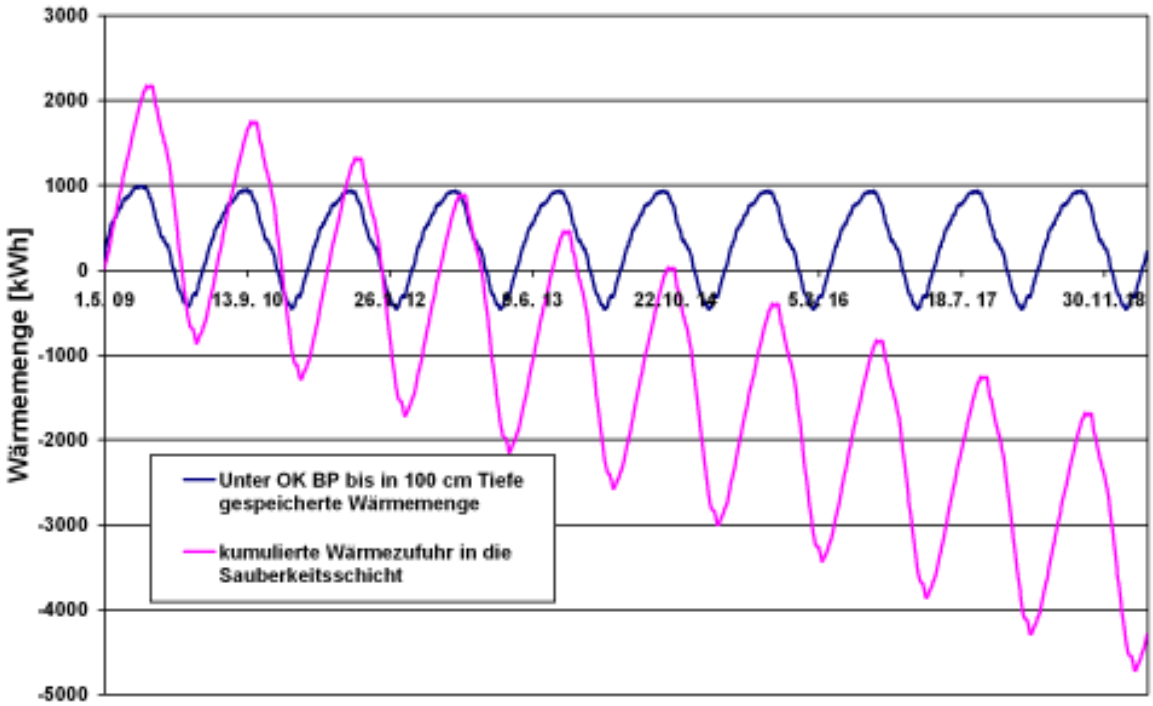


Abbildung 90: Die bis in 1 m Tiefe unter dem Gebäude gespeicherte Wärmemenge (bezogen auf den Anfangszustand der Simulation mit konstant 10,6 °C) ändert sich langfristig kaum, obwohl der Sauberkeitsschicht jedes Jahr Wärme entzogen wird.

4.1.2.2 Wechselwirkung mit dem Gebäude

Damit die in der Jahresbilanz unter der Bodenplatte entzogene Wärme von außen nachströmen kann, muss die jahresmittlere Temperaturen in diesem Bereich entsprechend niedriger liegen als die entsprechende Temperatur der Erdoberfläche. Da ferner der wesentliche Wärmeentzug während der Heizperiode stattfindet, ist insbesondere am Ende der Heizperiode die Erdreichtemperatur erheblich niedriger, als sie es ohne Einspeisung und Entnahme durch das Haustechniksystem wäre (Abbildung 91). Die niedrigeren Temperaturen führen zu einem entsprechend erhöhten Wärmestrom durch die Bodenplatte.

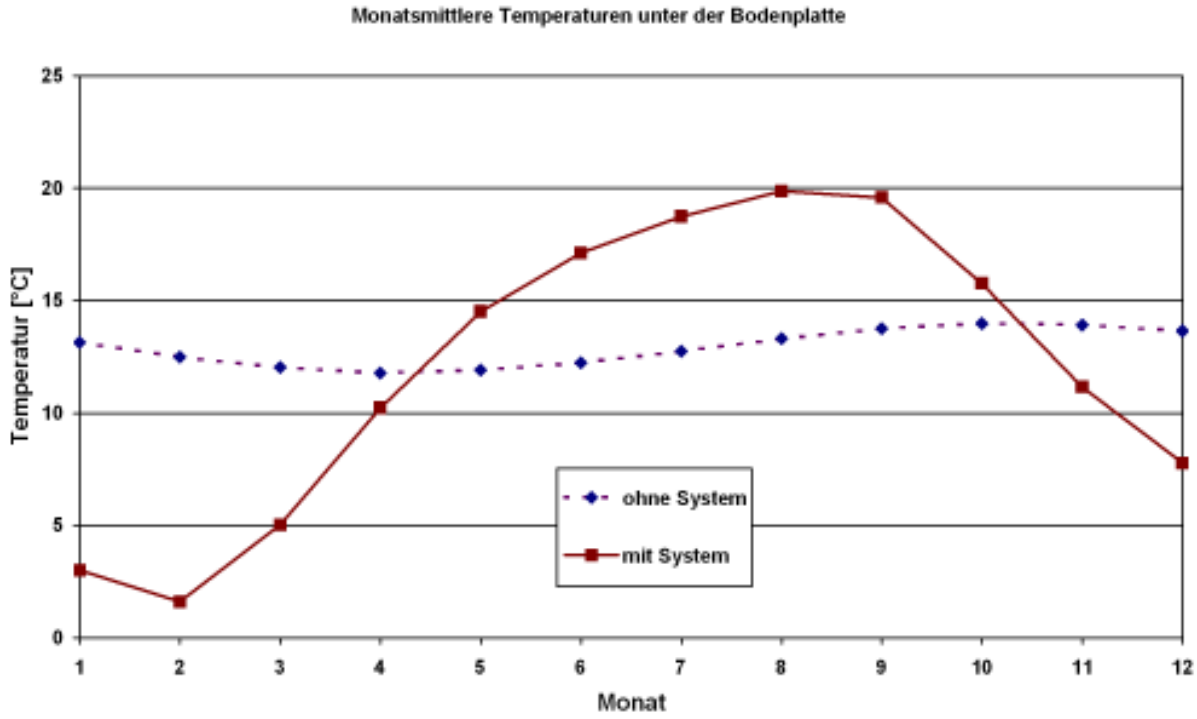


Abbildung 91: Monatsmittlere Temperaturen in der Mitte der Sauberkeitsschicht mit und ohne Wärmeeinspeisung und -entnahme durch das haustechnische System

Der Einfluss auf den Heizwärmebedarf lässt sich auf dem Weg über einen Vergleich der Wärmeströme durch die Innenoberflächen des Gebäudes für die Fälle mit und ohne das haustechnische System abschätzen. Setzt man die Heizperiode vom 15.10. bis zum 31.3. an, so ergibt sich eine Zunahme des in der jährlichen Heizwärmebilanz wirksamen Wärmeverlustes um 1,9 kWh pro Quadratmeter Wohnfläche – trotz des ausgezeichneten Wärmeschutzes der Bodenplatte.

4.1.2.3 Das Erdreich als saisonaler Wärmespeicher

Im Rahmen der Simulation sollte geklärt werden, inwieweit die Einspeisung der Solarwärme ins Erdreich als Speicherung betrachtet werden kann: Fließt die im Sommer eingespeiste Wärme womöglich zu einem großen Teil durch das Erdreich

an die Außenluft ab, bevor sie in der Heizperiode genutzt werden könnte? Selbst wenn die Wärme weitgehend im Erdreich bleiben sollte, ist sie dort noch von Nutzen? Würde sich die eingespeiste Wärme beispielsweise komplett und gleichmäßig in einem Umkreis von 100 m im Erdreich verteilen, könnte man zwar von einer vollständigen Speicherung sprechen, aufgrund des niedrigen resultierenden Temperaturniveaus der gespeicherten Wärme wäre ihre Exergie jedoch so gering und die Entfernung der gespeicherten Wärme von der Entnahmestelle so groß, dass kein relevanter praktischer Nutzen aus dieser Speicherung gezogen werden könnte.

Zur Illustration der Speicherwirkung im Erdreich wurden zwei Fälle berechnet, mit und ohne Speicherung im Erdreich. Die Simulationen starten jeweils mit identischer Temperaturverteilung zu Beginn einer Einspeiseperiode. Ausgewählt wurde ein weitgehend eingeschwungener Zustand am Ende des oben beschriebenen 10-Jahres-Zeitraums. Die Differenz der sich für beide Fälle ergebenden Temperaturfelder am Ende der Einspeiseperiode zeigt dann, wo sich welcher Anteil der in dieser Periode eingespeisten Wärme zu diesem Zeitpunkt befindet.

In Abbildung 92 sind diese Temperaturdifferenzen dargestellt. Oben erkennt man analog zu Abbildung 91 eine deutliche Temperaturerhöhung unter der Bodenplatte am Ende der Einspeiseperiode, hier ist die eingespeiste Wärmemenge also offensichtlich wenigstens zu einem Teil noch verfügbar. Die entsprechende untere Grafik zeigt dagegen, dass die Temperaturen am Ende der Entnahmeperiode deutlich unter denen im ungestörten Fall liegen. Die Unterkühlung ist von vergleichbarer Größe wie zuvor die Überhitzung. Da die entnommene Wärmemenge nur wenig größer ist als die eingespeiste Wärmemenge, deutet dieses Ergebnis bereits auf eine schlechte Speicherwirkung des Erdreichs hin – bei einem perfekten Speicher müsste am Ende der Entnahmeperiode die Temperatur wieder ähnliche Werte wie im ungestörten Fall annehmen.

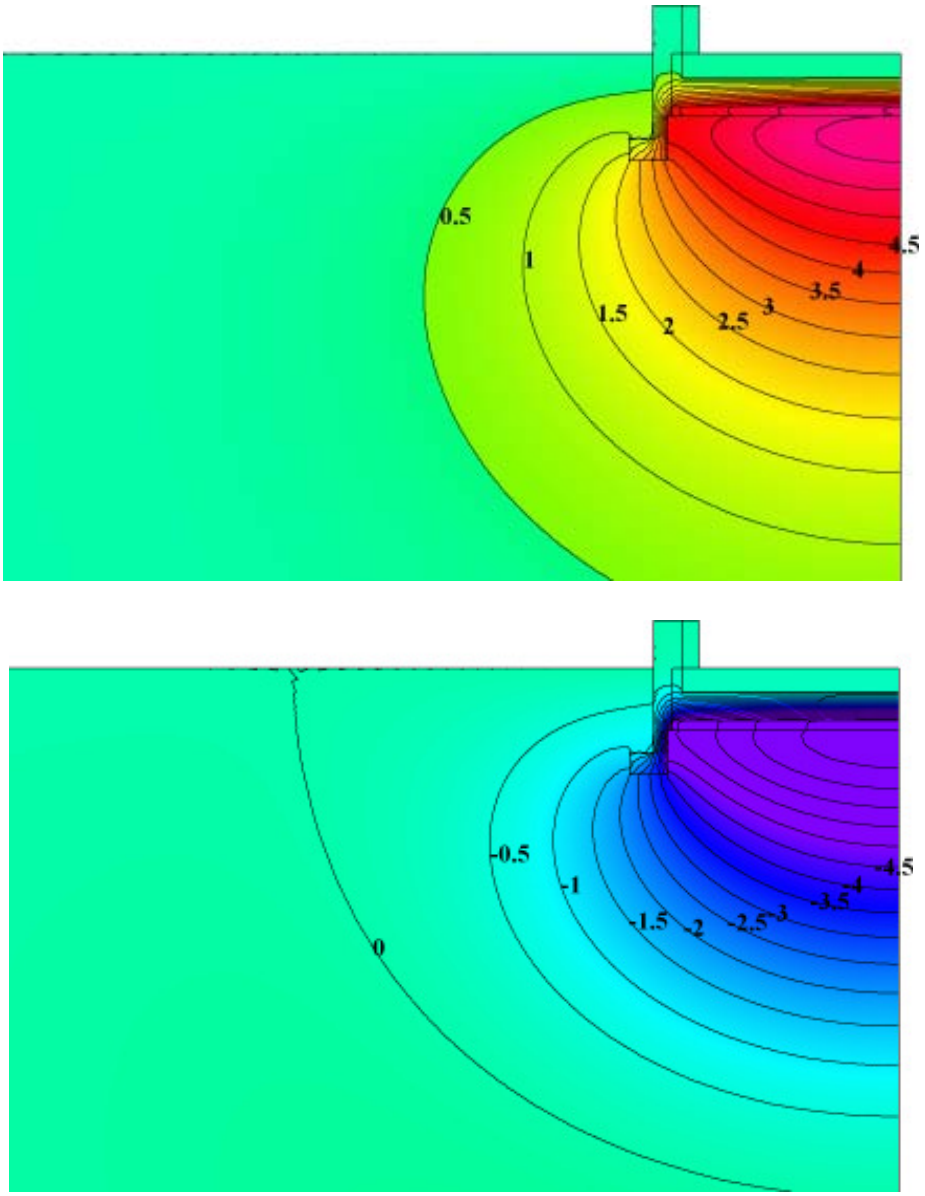


Abbildung 92: Temperatur*änderung* im Erdreich durch das haustechnische System am Ende der Einspeiseperiode (oben) und am Ende der Entnahmeperiode (unten). Die dargestellten Temperaturdifferenzen zeigen die Differenz zwischen Berechnungen mit und ohne Wärmeeinspeisung bzw. -entnahme aus dem Erdreich.

Besser quantifizierbar wird die Speicherwirkung, wenn man die im Erdreich gespeicherte Wärmemenge in Relation zur zuvor eingespeisten Wärmemenge betrachtet. In Abbildung 93 ist die Verteilung dieser Größe am Ende der Einspeiseperiode dargestellt. Man sieht, dass nur noch ca. 70% der ursprünglich eingespeisten Wärmemenge im Erdreich gespeichert sind, der Rest ist bereits an die Außenluft verloren gegangen. Im Bereich unterhalb der Bodenplatte verbleibt etwa ein Drittel der ursprünglich eingespeisten Wärmemenge.

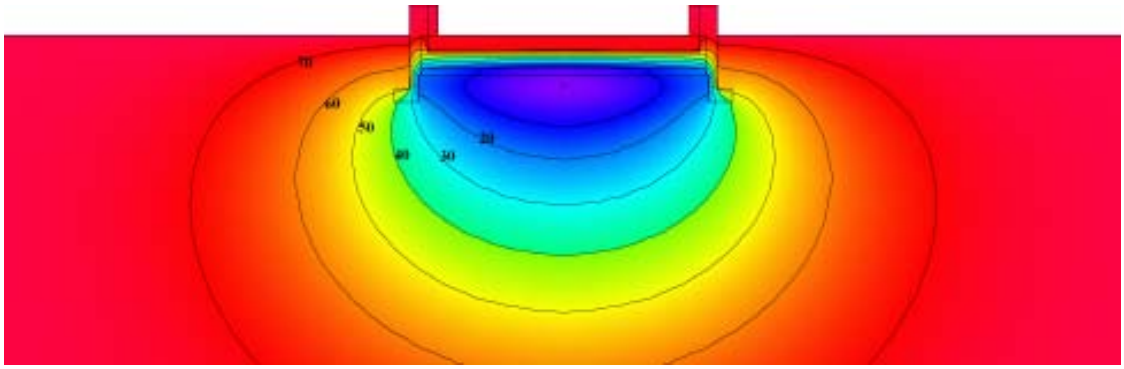


Abbildung 93: Wärmespeicherung im Erdreich am Ende der Einspeiseperiode. Die Zahlen an den Isolinien geben an, welcher Prozentsatz der eingespeisten Wärme innerhalb der jeweiligen Linie gespeichert ist. Die Höhe des Erdreichblocks im dargestellten Modellausschnitt beträgt ca. 5 m.

Noch deutlicher wird die geringe Güte des Speichers Erdreichs, wenn man während der üblichen Entladeperiode keine Wärme entnimmt und die Verhältnisse am Ende der Entladeperiode betrachtet. Zu diesem Zeitpunkt muss das Heizsystem noch immer Wärme aus dem Erdreich entnehmen; es wäre also wünschenswert, wenn ein relevanter Anteil der eingespeisten Wärme noch verfügbar wäre.

Tatsächlich hat die eingespeiste Wärme sich zu diesem Zeitpunkt räumlich bereits weit verteilt. Unterhalb des Gebäudes sind nur noch etwa 20% der ursprünglich eingespeisten Wärmemenge vorhanden, in einer für die Entnahme erreichbar erscheinenden Tiefe bis zu etwa 2 m nur etwa 10%.

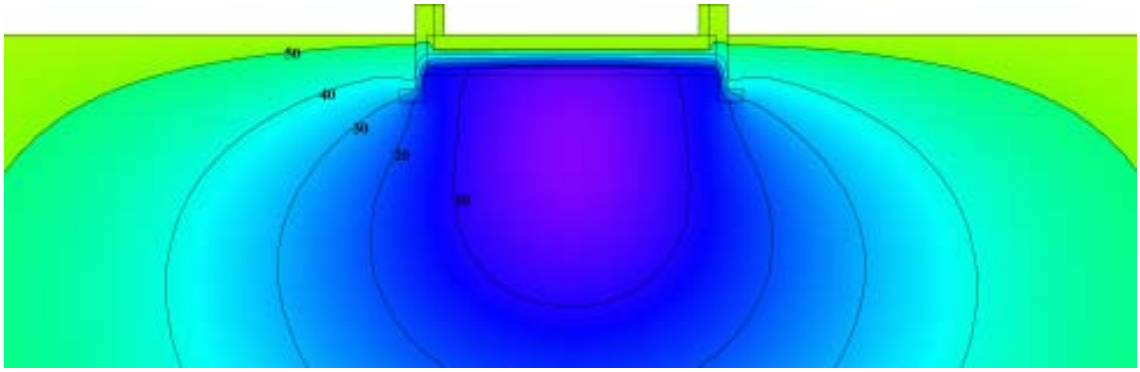


Abbildung 94: Wie Abbildung 93, jedoch ein Jahr nach Beginn der Einspeiseperiode, betrachtet ohne jegliche Wärmeentnahme. In Gebäudenähe befinden sich nur noch wenige Prozent der anfangs eingespeisten Wärmemenge.

Damit wird deutlich, dass eine saisonale Speicherung von solarer Überschusswärme unter der Bodenplatte bei den gegebenen Dimensionen eines Einfamilienhauses nur sehr eingeschränkt möglich ist. Auch eine weiter vergrößerte Kollektoranlage würde, aufgrund der vergleichsweise raschen Verteilung der Wärme im Erdreich, während der Entnahmeperiode im Winter nur zu geringfügig höheren Temperaturen unter dem Haus führen.

4.2 Simulationen zur Optimierung der Versorgungstechnik

Im Rahmen dieses Projekts wurde das Wärmeversorgungsystems des Passivhauses mit den Komponenten Gebäudehülle, solarthermische Anlage, Wärmepumpe, Wasserspeicher und Erdreich-Wärmeübertrager unter Berücksichtigung der eingestellten Regelparameter mittels eines Simulationsmodells untersucht. Mit den Software Werkzeugen Matlab/Simulink [Matlab 10] unter Verwendung der Modellbibliothek CARNOT [Carnot 09] wurde dafür ein Simulationsmodell aufgebaut und an Hand der Messdaten validiert. Damit wurden die Analysen und Bewertungen sowie diverse Prognoseberechnungen durchgeführt. Mit dem validierten Modell werden folgende Hauptfragestellungen beantwortet:

1. Thermischen Verhalten des Erdreichwärmespeichers im Zusammenspiel mit der Solaranlage und dem Abnahmeprofil der Nutzer (Heizung/Warmwasser). Untersuchung des Potentials des Erdreichspeichers im Zusammenhang mit der thermischen Solaranlage (z.B. Größe der Anlage).

2. Prüfung der Arbeitsweise/dem Verhalten der WP in Hinsicht auf Regelung und Baugröße (insbesondere Takten).

3. Ermittlung des Primärenergieverbrauchs und Abweichung zur Prognose.

4. Auswirkung/Grenzen des Systems bei Gebäude mit höherem Heizwärmebedarf.

5. Feststellung möglicher Verbesserungspotentiale.

Für die Validierung wurden verschiedene Messperioden ausgewählt in denen die Messdaten möglichst lückenlos vorliegen (Sommer – Winter – Herbst – Frühling, vgl. Tabelle 15). Das Pufferspeichermodel kann nur an kürzeren Messperioden validiert/ kalibriert werden bei denen keine Trinkwarmwasserzapfung zu erwarten ist (Urlaubszeiten). Das Pufferspeichermodell wurde bereits in vorangegangenen Arbeiten mit anderen Modellen verglichen und liefert vergleichbare Ergebnisse.

Tabelle 15: Validierungsperioden für die Simulation

	Anfang	Ende	Dauer [h]
Sommer	03.06.2009	12.08.2009	1703.8
Winter	18.12.2008	16.01.2009	671.8
Herbst	07.10.2009	05.12.2009	1439.8
Frühling	26.01.2010	12.04.2010	1847.8

Nach der erfolgten Validierung wird das Gesamtsystem mit synthetischen Daten für Trinkwarmwasser-Zapfprofil und Heizwärmebedarf untersucht und optimiert. Die

Simulation erfolgt mit dynamischer Zeitschrittweite abhängig von der zeitlichen Änderung der Zustandsgrößen. Die Speicherung der Rechenergebnisse erfolgt als Stundenmittelwerte bzw. Stundensummen.

Bei der Validierung der Modelle für Wärmepumpen und Erdreich-Wärmeübertrager musste festgestellt werden, dass die Ergebnisse teilweise sehr stark von den Messdaten abweichen. Folglich wurden neue Modelle entwickelt und diese mit den vorhandenen Messdaten validiert. Insbesondere wurden Detailuntersuchungen mit dem Erdreich-Wärmeübertrager-Modell durchgeführt.

Da die Darstellung des Gesamtsystems im Modell aufgrund der hohen Komplexität zu numerischen Problemen führt, wurden vereinfachte Systeme bzw. Systemkomponenten und Teilsysteme sowie alternative Systemvarianten untersucht. Damit kann das Optimierungspotential des bestehenden Systems hinreichend genau abgeschätzt werden.

Für die Simulation wurde ein geringfügig modifiziertes Hydraulikschema verwendet (siehe unten). In der Legende der Abbildung sind die verwendeten Abkürzungen erklärt.

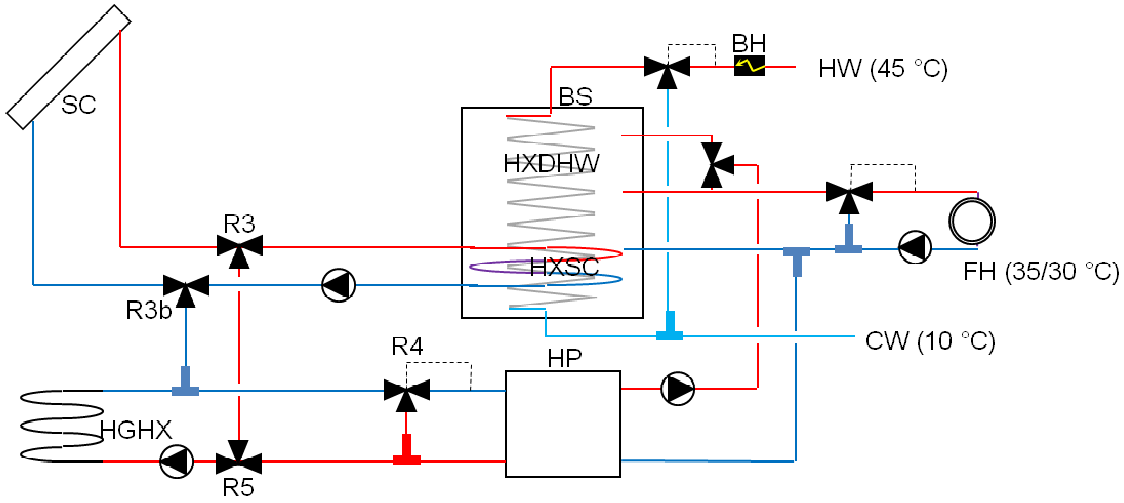


Abbildung 95: Hydraulikschema mit thermischer Solaranlage (SC) Erdreich-Wärmeübertager (HGHX), Wärmepumpe (HP) Pufferspeicher (BS) mit Solar (HXSC)- und Trinkwarmwasser-Wärmeübertrager (HXDHW), direktelektrischer Nachheizung (BH) sowie Kaltwasser (CW), Trinkwarmwasser (HW) und Fußbodenheizung (FH); (weicht geringfügig ab von System Houwen)[4]).

[4]) Anmerkung: Die Rücklaufbeimischung (R4) für die Wärmepumpe (Übertemperaturschutz) ist deaktiviert. Die Verwendung ist nicht notwendig, da das Temperaturniveau des Erdkollektors (HGHX) ausreichend weit unter der kritischen Temperatur (25 °C) lag. Drei-Wege-Ventil R3b ist in der realisierten Hydraulik nicht vorhanden.

Einige prägnante beispielhafte Auszüge aus den umfangreichen Simulationen werden hier im Folgenden dargestellt. Die gesamte Simulationsstudie zu dem Gebäude liegt mit [Ochs 2010] vor.

4.2.1 Beschreibung des 1D Erdreich-Wärmeübertrager-Modells

In diesem Abschnitt wird das 1D Erdreich-Wärmeübertrager-Modell beschrieben und es werden Verbesserung des Erdreich-Wärmeübertrager-Modells gegenüber dem Modell aus der Prognoseberechnung [Pfluger 2004] herausgearbeitet.

Für die Prognoseberechnungen von 2004 wurde ein zweidimensionales FDM Modell (Heat2) verwendet. Dies ermöglicht die detaillierte Abbildung der tatsächlichen Geometrie wie Schichtaufbau der Bodenplatte mit Wärmedämmung und Sauberkeitsschicht und auch die Untersuchung des Einflusses einer Perimeterdämmung. Die exakte Abbildung der Lage und Anzahl der Rohrleitungen (im Schnitt) ist bei einem 2D-FEM Modell möglich. Der Mehrgewinn an Information bei einem 3D Modell rechtfertigt in aller Regel nicht den wesentlichen Modellierungs-, Rechen- und Auswertungsaufwand.

Es ist möglich die Wärmetransportvorgänge in den Rohrleitungen durch Strömungssimulationen realitätsnah abzubilden (CFD), jedoch ist dies numerisch aufwändig. Alternativ kann die Wärmeleistung (Beladung oder Entladung) entweder als Quelle/Senke in den Elementen/Zellen, welche das Volumen der Rohrleitungen repräsentieren eingebracht werden (die Rohrleitungen werden diskretisiert) oder als Randbedingung (die Rohrleitungen bilden den Rand des Simulationsgebiets). Im Gegensatz zu FEM müssen bei einem FDM-Modell runde Rohrleitungen durch Rechtecke mit einem der Rohrleitung entsprechendem Umfang angenähert werden.

Aufgrund der im Vergleich zum gesamten Speichergebiet (einige bis zu 100 m) sehr kleinen Dimensionen der Rohrleitungen führt diese Vorgehensweise zu Modellen mit sehr vielen Elementen/Zellen was wiederum auch bei heutiger Rechenleistung zu langen Rechenzeiten führt. Das Problem lässt dich umgehen bzw. vereinfachen, wenn angenommen wird, dass in der Ebene der Rohrleitungen eine Quelle/Senke vorhanden ist, welche Wärme über die ganze Schicht ein- bzw. ausspeichert. Bei ausreichend kleinem Rohrabstand ist diese Annahme durchaus zutreffend.

In beiden Fällen (Wärmequelle in Rohren, Wärmequelle in Ebene) wirkt die Quelle homogen über den Speicherquerschnitt. Bei bifilarer Verlegung der Rohrleitungen trifft diese Annahme relativ gut zu, bei mäanderförmiger oder harfenförmiger Verlegung sowie bei Kapillarrohrmatten nur mit gewissen Einschränkungen. Durch numerische Fehler hängt das Ergebnis bei solchen Modellen vom Diskretisierungsgrad ab.

Unter der Annahme im Erdreich parallel verlaufender Isothermen kann auf ein einfacheres 1D-Modell zurückgriffen werden. Insbesondere im Falle einer Perimeter-

dämmung, wie im hier vorliegenden Fall zutreffend, ist diese Annahme zulässig (vgl. Abbildung 96).

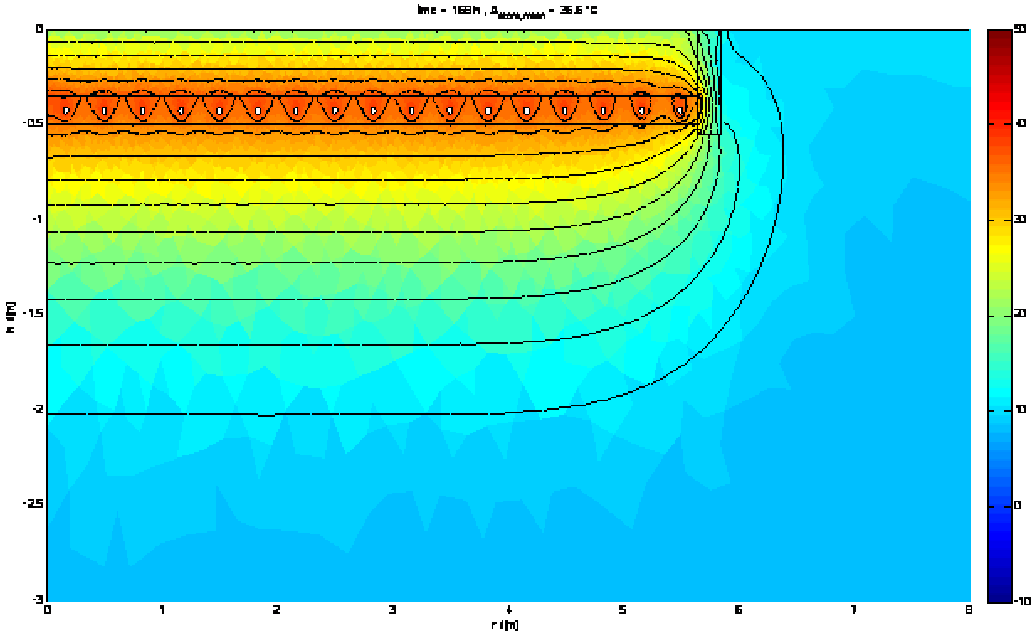


Abbildung 96: Isothermenkarte aus der FEM Simulation (Randbedingungen: Beladung mit 50 °C, 0,25 kg/s für 168 h, Anfangstemperatur homogen 10 °C).

In guter Näherung kann der Erdreichwärmeübertrager als einseitig isothermer Wärmeübertrager (vgl. Abbildung 97) betrachtet und entsprechend modelliert werden.

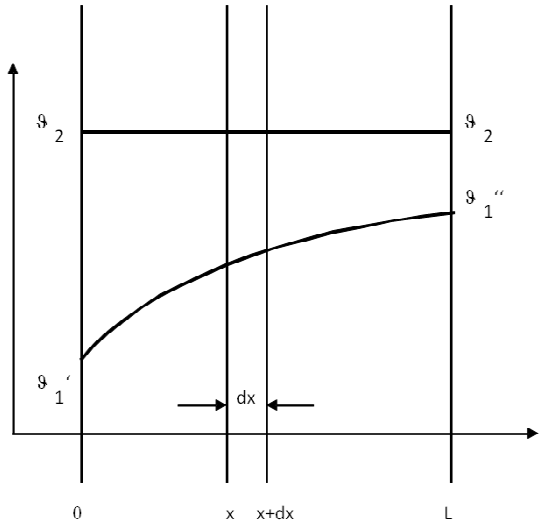


Abbildung 97: Temperaturverlauf im Gegenstrom-Wärmeübertrager, einseitig isothermer Wärmeübertrager mit der Länge 0 bis L, der Eintrittstemperatur ϑ_1' der Austrittstemperatur ϑ_1'' und der konstanten Erdreichtemperatur ϑ_2.

Die Differenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur ($\Delta\vartheta_1 = \vartheta_1'' - \vartheta_1'$) steigt mit zunehmender Wärmeübertragungsfähigkeit (UA) des Wärmeübertragers und mit abnehmendem Wärmekapazitätsstrom ($\dot{C} = \dot{m} \cdot c$) nach Gleichung (1) ($\dot{m}$: Massenstrom [kg/s] ;c: spezfischer Wärmekapazität [J/(kgK]).

$$\vartheta_1'' = \vartheta_1' + (\vartheta_1' - \vartheta_2) \cdot \left(1 - e^{\frac{UA}{\dot{C}}}\right) \qquad (1)$$

Unter dieser Annahme hängt die Wärmeübertragungsleistung von der Temperaturdifferenz zwischen Erdreich (ϑ_2) und mittlerer Fluidtemperatur zwischen Eintritt (ϑ_1') und Austritt (ϑ_1'') und von der Wärmeübertragungsfähigkeit (UA) ab.

$$\dot{Q} = UA \cdot \Delta\vartheta_{fluid,\log} \qquad (2)$$

Mit:

$\vartheta_{fluid,\log}$: mittlerer, logarithmischer Fluidtemperatur

Die Wärmeübertragungsleistung hängt somit nicht nur von den Stoffwerten des Erdreichs und von der Strömungsform (laminar, turbulent) ab sondern auch vom Beladezustand des Wärmespeichers. Je höher die Temperaturleitfähigkeit $a = \lambda / (\rho \cdot c)$ (λ: Wärmeleitfähigkeit und ρ: Dichte) des Erdreichs, desto schneller wird die übertragene Wärme an umgebende Schichten weitergeleitet und desto geringer ist die Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Fluidtemperatur und Temperatur des Erdreichs am Rand der Rohrleitungen. Mit zunehmender Beladung des Erdreichs mit Wärme/Kälte sinkt unabhängig von den Stoffwerten die Wärmeübertragungsleistung.

Bei gleicher Energie hat die Art der Beladung (kontinuierlich oder getaktet) nur einen Einfluss 2. Ordnung: Mit zunehmendem Volumenstrom nimmt der Wärmeübergangswiderstand ab. Der Übergangswiderstand wird maximal bei ruhendem Fluid. Dann bestimmt die Wärmeleitung im Fluid die Transportgeschwindigkeit.

Bei den bisherigen Prognoseberechnungen [Pfluger 2004] wurde die Wärmeübertragungsleistung als konstant (nur abhängig von den Stoffwerten des Erdreichs) betrachtet. Eine vorgegebene Leistung (oder ein Leistungsverlauf) führt entsprechend zu einer Zu- bzw. Abnahme der Speichertemperatur. Dies führt jedoch zu einer deutlichen Überschätzung der Speicherkapazität im Vergleich zur Realität abnehmenden Wärmeübertragungsleistung mit zunehmendem Beladezustand. Somit wurde die maximale Speichertemperatur deutlich überschätzt. Die Abhängigkeit der Wärmeübertragungsleistung vom Beladezustand wird im hier vorgestellten Modell berücksichtigt.

4.2.2 Dimensionierung und Abstimmung der Komponenten – Taktung

Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit von Wärmepumpen kleiner Leistung, wurde auf eine Wärmepumpe mit einer für das vorliegende Gebäude und v.a. für den vorliegenden Erdreich-Wärmeübertrager überdimensionierte Wärmepumpe zurückgegriffen. Durch die zu große Entzugsleistung der Wärmepumpe (4 KW), fällt beim Betrieb der Wärmepumpe das Temperaturniveau der Sole schnell auf den Minimalwert (von etwa -1.5 °C) ab und muss abschalten. Dieses Takten hat Rückwirkung auf die weiteren Komponenten und führt zu einer suboptimalen Betriebsweise des Gesamtsystems.

Eine abgestimmte Dimensionierung der Komponenten würde zu einer Vermeidung bzw. zumindest Reduzierung der Taktung führen. Dadurch kommt es zu einer Reduzierung der Aufwärm- bzw. Abkühlverluste sowie der Leistungsfähigkeit des Erdreichwärmeübertragers. Insbesondere die Abstimmung von Wärmepumpenentzugsleistung (Verdampfer) und Quellenleistung wird für zukünftige Projekte empfohlen.

Die Quantifizierung der Abkühl- und Aufwärmverluste kann nur durch eine detaillierte Systemsimulation erfolgen. Diese sollten jedoch eine unbedeutende Größenordnung aufweisen gegenüber der reduzierten Wärmeübertragungsfähigkeit des Horizontal-Erdreichwärmeübertragers.

Es werden vier Fälle mit unterschiedlicher Taktung untersucht wobei die Beladetemperatur jeweils konstant auf 50 °C bzw. 5 °C gehalten wird und das Integral des Beladem assenstroms über den Simulationszeitraum von 4 Wochen für alle Fälle gleich ist (immer täglich konstante 5400 kg/Tag):

0) Getaktete Beladung jeweils 1 h mit 1 h Pause zwischen 8:00 h und 19:00 h mit 0,25 kg/s.
1) Getaktete Beladung jeweils 2 h mit 2 h Pause zwischen 8:00 h und 18:00 h mit 0;25 kg/s.
2) Konstante Beladung zwischen 7:00 h und 19:00 h mit 0,125 kg/s.
3) Konstante Beladung zwischen 0:00 h und 24:00 h mit 0,0625 kg/s.

Der Einfluss der Taktung auf das Wärmeübertragungsvermögen des Erdreich-Wärmeübertragers ist in Abbildung 98 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die mit zunehmender Beladung abnehmende Beladeleistung.

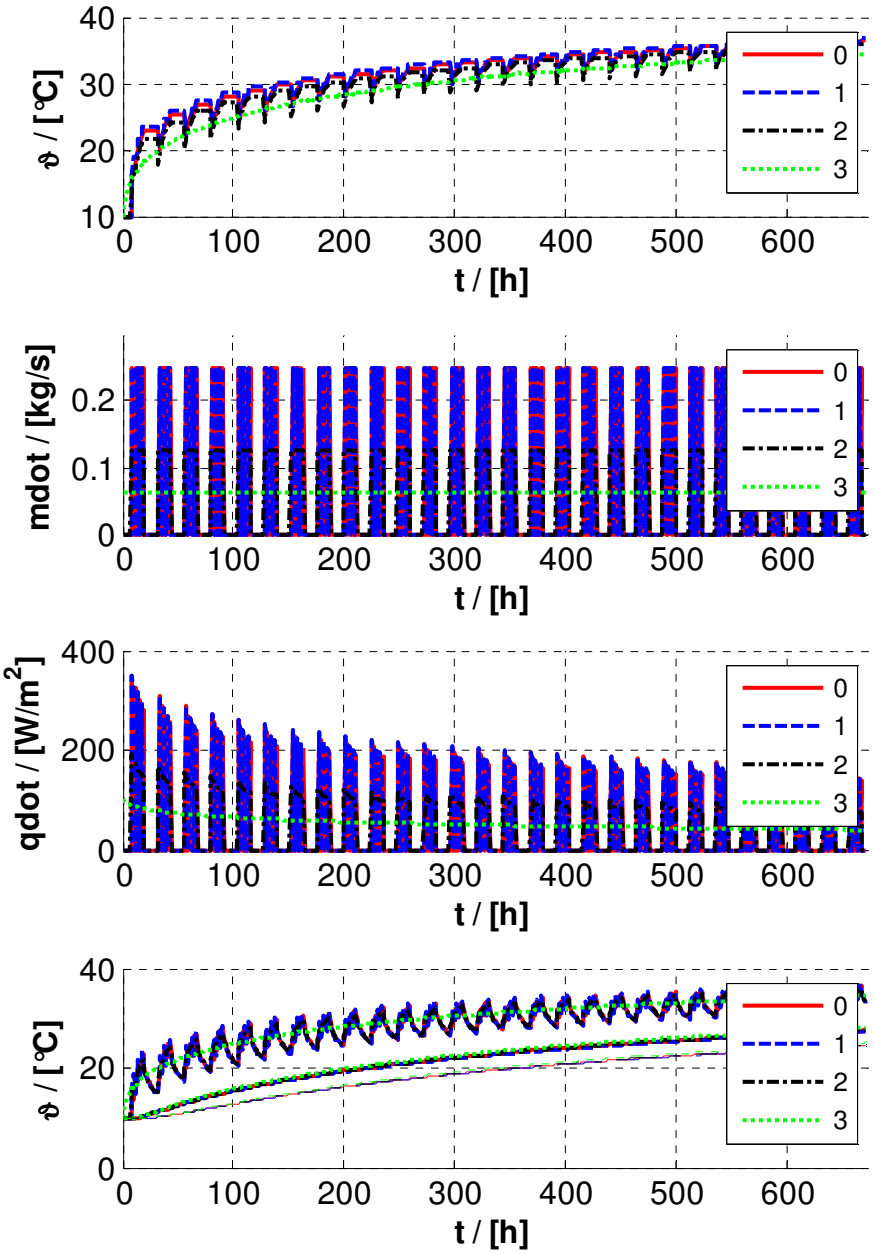


Abbildung 98: Einfluss der Taktung auf das Wärmeübertragungsvermögen des Erdreich-Wärmeübertragers (für die oben beschriebenen Fälle 0 bis 3). Bilder von oben nach unten: Rücklauftemperaturen, Belademassenstrom (m_{dot}) und Beladeleistung (q_{dot}) sowie Erdreichtemperaturen in der Sauberkeitsschicht sowie 100 und 110 cm im Erdreich unterhalb der Sauberkeitsschicht (vgl. Abbildung 24).

Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Spezifische Wärmemenge in [KWh/m²] (Anfangsbedingung der Simulation: 1 Jahr Beladung mit konstant 10 °C).

Fall	0	1	2	3
Beladung 50 °C				
HGHX	32.54	32.5	34.16	35.49
TOP	-0.17	-0.17	-0.18	-0.21
BOTTOM	0.29	0.35	0.33	0.31
Entladung 5 °C				
HGHX	-3.88	-3.88	-4.43	-4.69
TOP	0.97	0.97	0.99	0.99
BOTTOM	0.5	0.51	0.54	0.31

HGHX: Be- bzw. Entlade-Wärmemenge
TOP: Wärmeverluste/-gewinne nach oben
BOTTOM: Wärmeverluste/-gewinne nach unten

Trotz geringerem Wärmeübergangskoeffizienten aufgrund des geringeren Massenstroms sind bei konstanter Beladung die Be- bzw. Entlademengen am größten. Für den Fall Beladung (50 °C) ist eine Steigerung um 8,4 % und für die Entladung (5 °C) um 17,3 % erreichbar. Die Unterschiede zwischen den Varianten mit 1 h Taktung und der 2 h Taktung sind vernachlässigbar.

4.2.3 Untersuchung von Systemteilen bzw. alternativen Systemen

4.2.3.1 Einfache erdgekoppelte Wärmepumpenheizung

Aus dem PHPP, das für das untersuchte Gebäude vorliegt wird mit einem einfachen Gebäudemodel die Heizlast generiert. Der damit prognostizierte Heizwärmebedarf stimmt für entsprechend angepasste Raumtemperaturen von 22 °C relativ gut mit den gemessenen Werten überein.

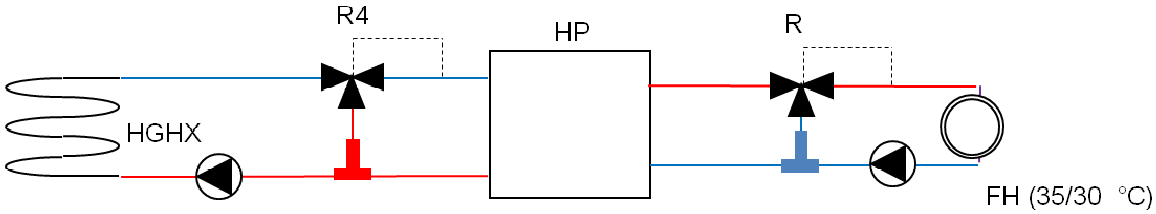


Abbildung 99: Hydraulikschema erdgekoppelte Wärmepumpenheizung.

Für die Simulation wird ein einfaches gemischtquadratisches Wärmepumpenmodell verwendet mit Kenndaten entsprechend Datenblatt (d.h. ohne Korrektur); Als Anfangsbedingung für das Erdreich wir ein linearisierter Verlauf zwischen 22 °C Raumtemperatur, 9,5 °C in Rohrleitungsebene und 8,0 °C am unteren Rand des Simulationsgebiets gewählt. Dabei wird die Kopplung der Erdreichtemperatur an das Gebäude sowie die Kopplung der Gebäudetemperatur ans Erdreich berücksichtigt.

Die Simulation erfolgt aus numerischen Gründen ohne Rücklaufbeimischung. Der Vergleich mit der Variante mit Rücklaufbeimischung zeigt, dass dies für die energetische Betrachtung ohne Einschränkung zulässig ist, jedoch steigen die Vorlauftemperaturen auf bis zu 60 °C.

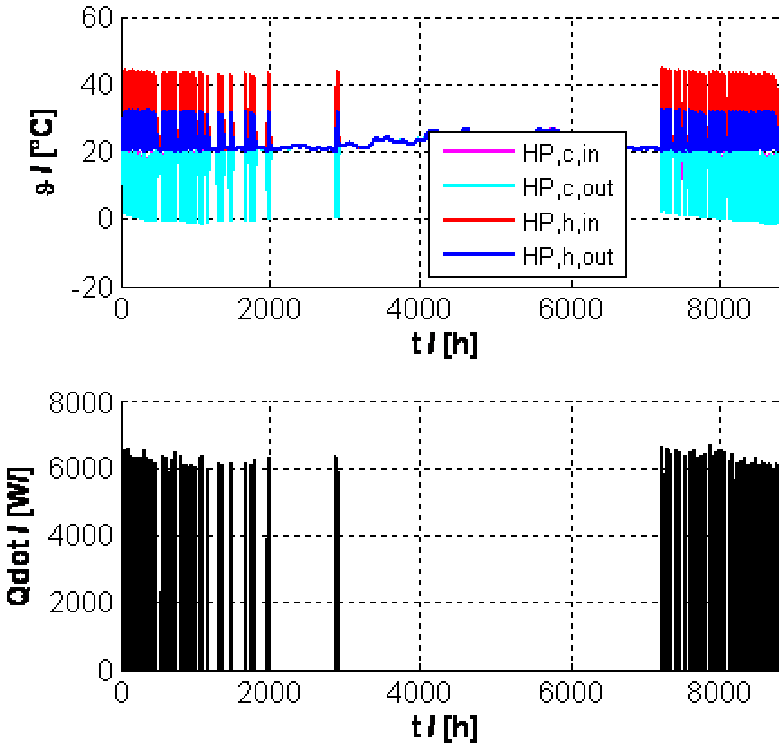


Abbildung 100: Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmepumpe primärseitig (HP,c) und sekundärseitig (HP,h) sowie Heizleistung ohne Rücklaufbeimischung (Auswertung für das erste Jahr). Wetterdaten von der Wetterstation „Wiesengiech“.

Tabelle 17: Kenndaten der Fußbodenheizung ohne Rücklaufbeimischung (Zusammenfassung der Ergebnisse der Simulation aus Abbildung 100)

	Größe	ohne Rücklaufbeimischung
Laufzeit	t [h]	448.5
Wärmemenge primär HP	Q_{hpI} [KWh]	2160.9
Wärmemenge sekundär HP	Q_{hpII} [KWh]	2564.0
Arbeit HP	W_{el} [KWh]	403.1
Jahresarbeitszahl	JAZ [-]	6.4
Jahresarbeitszahl unter Berücksichtigung der Pumpenenergie	JAZ_{sys} [-]	4.8
Heizwärmebedarf (bei 20°C)	q [KWh/(m²a)]	16.6
Heizleistung	q_{dot} [W/m²]	12.7
minimale Bodentemperatur (Sauberkeitsschicht)	$\vartheta_{s,min}$ [°C]	3.9
minimale logarithmische Fluidtemperatur	$\vartheta_{f,log,min}$ [°C]	0.2

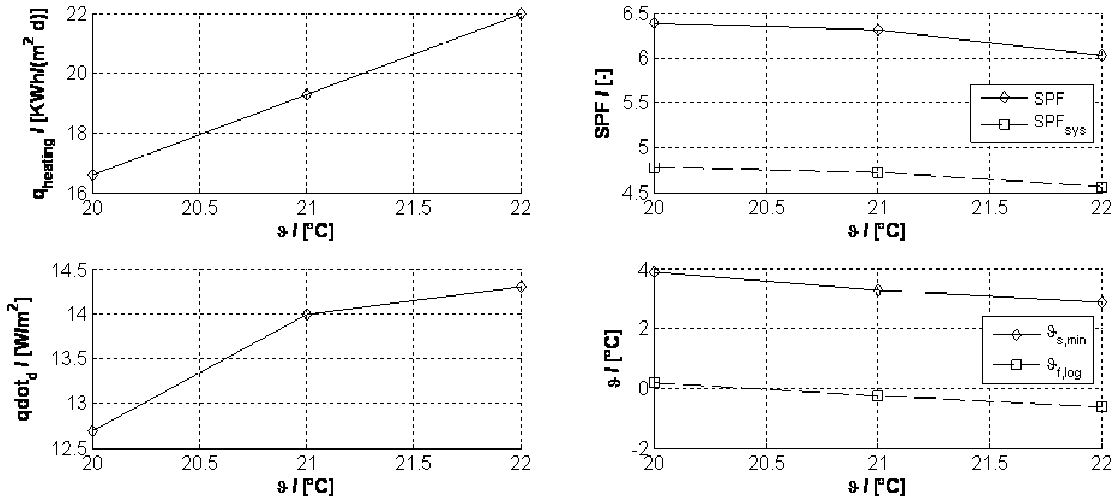
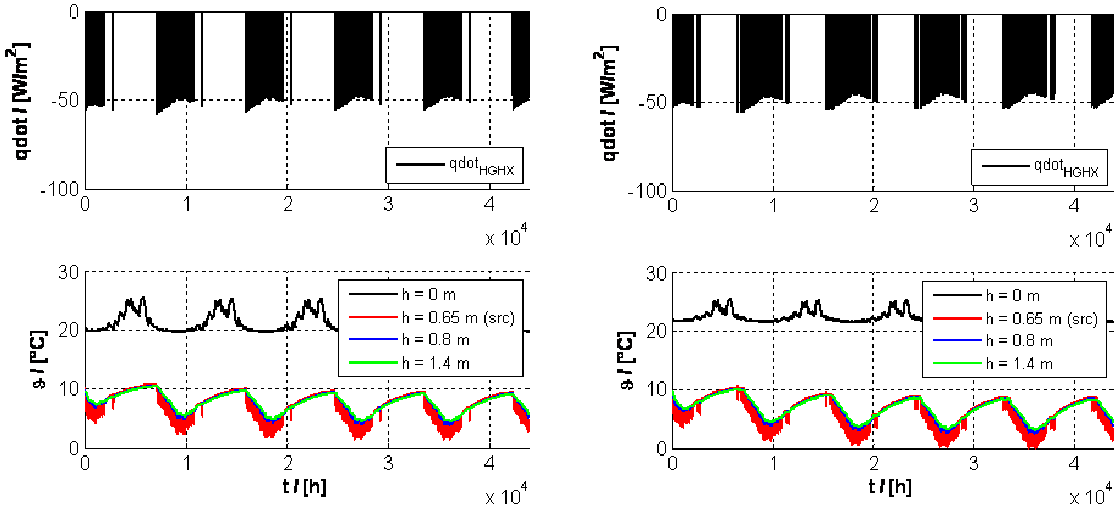


Abbildung 101: Einfluss der Raumtemperatur auf Heizenergiebedarf ($q_{heating}$), max. Heizlast ($qdot_d$), Jahresarbeitszahl ohne und mit Umwälzpumpen (SPF bzw. SPF_{sys}) sowie minimale Boden ($\vartheta_{s,min}$) bzw. Fluidtemperatur ($\vartheta_{f,log}$); Wetterdaten von der Station „Wiesengiech" (Auswertung für das erste Jahr).

In allen untersuchten Fällen sinkt die Bodentemperatur im Laufe der Simulationsperiode von 5 Jahren ab (Abbildung 102). Für den Fall einer Raumtemperatur von 22 °C fällt die Bodentemperatur im vierten Jahr gegen die Nullgradgrenze (Frostfreiheit der Bodenplatte!). Das bedeutet, dass dieses sehr einfache erdgekop-

pelte Wärmepumpenheizsystem ohne solare Erdreichbeladung beim Erreichen der Frostgrenze unter dem Gebäude an seine Funktionsfähigkeit stößt und so allein nicht betrieben werden könnte.

Die Jahresarbeitszahlen (JAZ) liegen aufgrund der vergleichsweise niedrigen Kondensatortemperaturen von etwa 30 bis 35 °C mit 4,6 bzw. 4,4 deutlich über den gemessenen Werten (Abbildung 102). Die Direktanbindung der Wärmepumpe an die Fußbodenheizung wirkt sich, auch da es keine Pufferspeicherverluste gibt, trotz nicht abgestimmter Dimensionierung und damit hoher Taktung positiv aus.



20 °C
JAZ (ohne Pumpen) = 6,19
JAZ_{sys} (mit Pumpen) = 4,61

22 °C
JAZ (ohne Pumpen) = 5,80
JAZ_{sys} (mit Pumpen) = 4,37

Abbildung 102: 5 Jahres-Prognose; Entwicklung der Heizleistung und der Bodentemperatur. Wetterdaten von der Station „Wiesengiech“. Simulation jeweils mit Rücklaufbeimischung; src = „source“ Lage der Energieeinspeisung.

4.2.3.1 Einfache Solare Trinkwarmwassererwärmung

Eine von der Heizung bzw. Wärmepumpe getrennte Betrachtung der Trinkwarmwassererwärmung ermöglicht eine relative einfache Abschätzung des solaren Deckungsgrades und damit die Bestimmung des für die Trinkwarmwasserbereitung erforderlichen Primärenergieaufwandes. Die Simulation erfolgt unter Variation der Zapfprofile bzw. –mengen.

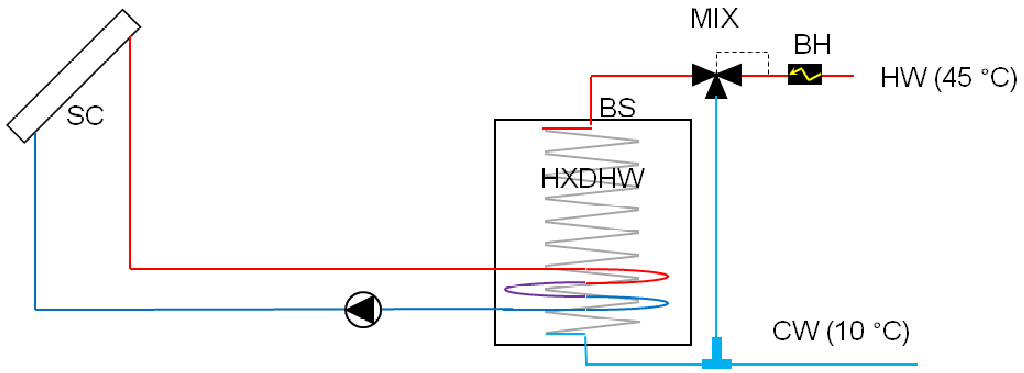


Abbildung 103: Hydraulikschema (einfache solare Trinkwarmwassererwärmung)

Die Simulation erfolgt unter Verwendung der Komponenten, wie sie im vorliegenden System eingesetzt sind mit synthetischen Klimadaten für den Standort „Wiesengiech“. Dabei werden sensitive Parameter, wie Kollektorfläche, Pufferspeichervolumen sowie Trinkwarmwassertemperatur und -zapfprofile variiert. In Abbildung 104 ist beispielhaft der Verlauf eines Simulationsjahren dargestellt.

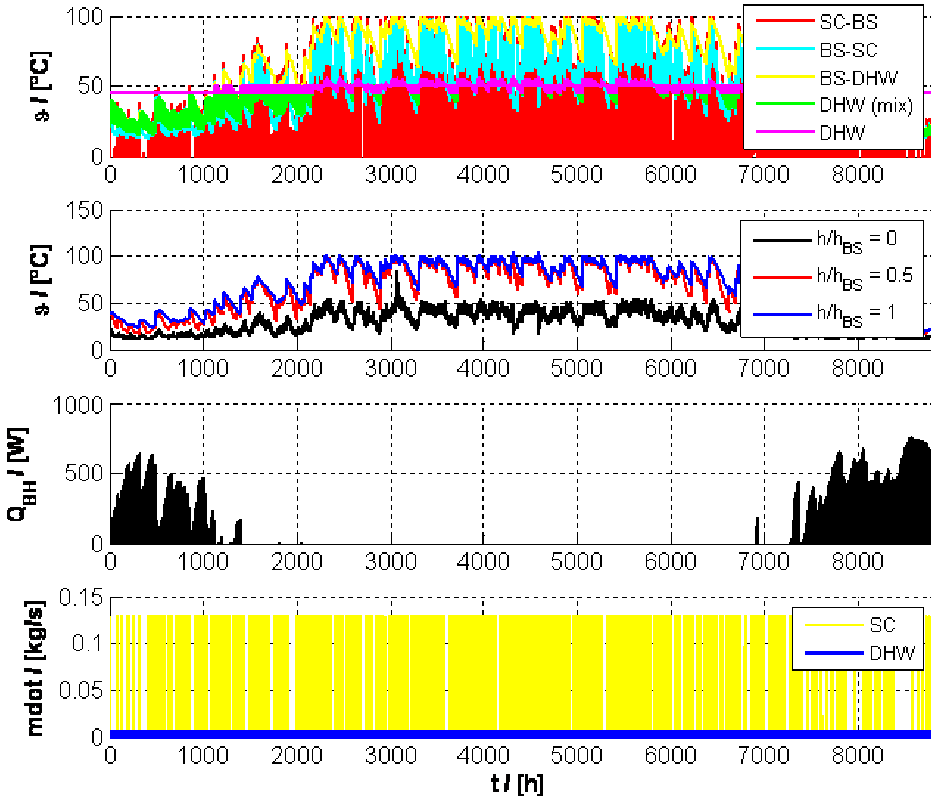


Abbildung 104: Verlauf der Vor- und Rücklauftemperaturen der Solaranlage, des Frisch- und Trinkwarmwassers sowie der Pufferspeichertemperaturen (für unterschiedliche relative Speicherhöhen h/h_{BS}), Leistung der Nachheizung bei der einfachen solaren Trinkwarmwassererwärmung, sowie Massenstrom Solar und Trinkwarmwasser, 3 Zapfungen, 71 l/d, Wetterdaten von der Station „Wiesengiech“.

Tabelle 18 fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen.

Tabelle 18: Zusammenfassung solare Trinkwarmwassererwärmung mit Rücklaufbeimischung

Kollektorneigungswinkel β	16°
Bemerkung	mit Beimischung
$Q_{DHW,ref}$ [KWh/a]	1037,82
q_{SC} [KWh/(m² a)]	162,8
I_{glob} [KWh/(m² a)]	1075,4
Q_{SC} [KWh/a]	1660,8
$Q_{DHW(BS)}$ [KWh/a]	1641,9
Q_{BH} [KWh/a]	126,6
Solarer Deckungsgrad f_{sol} [-]	0,93

Für verschiedenen Trinkwarmwasserprofile und Größen der Kollektorfläche wird der solaren Deckungsgrad bestimmt. Zudem wird das Pufferspeichervolumen variiert und der Einfluss auf den solaren Deckungsgrad untersucht. Dabei wird das h/d-Verhältnis (Höhe zu Durchmesser des WW-Speichers) konstant gehalten. Alle übrigen Parameter (wie Wärmeübertragungsfähigkeit der Solar- und Trinkwarmwasser-wärmeübertrager) bleiben unverändert.

Der Einfluss des Pufferspeichervolumens auf die solare Deckung (f_{sol}) ist gering (siehe Abbildung 105), jedoch werden die Stagnationszeiten durch größere Speicher-volumen reduziert (allerdings nicht in ausschlaggebenden Maße). Die in der Abbildung angegebenen Speichergröße von 0,87 m³ entspricht dem im Gebäude eingebauten Warmwasserkombispeicher (Bruttovolumen aus dem Datenblatt).

Für den hier vorliegenden Fall von rund 10 m² Kollektorfläche liegt die solare Deckung bezogen auf den Trinkwarmwasserverbrauch etwas über 90 %. Bei doppel-tem Trinkwarmwasserverbrauch reduziert sich der Anteil auf etwa 85 %.

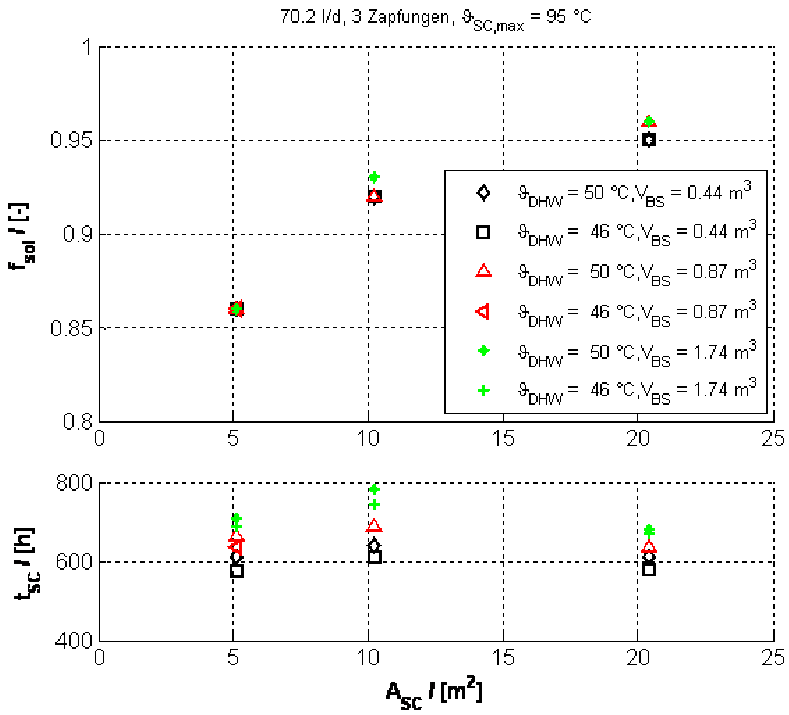


Abbildung 105: Solare Deckung und Pumpenlaufzeiten der einfachen solaren Trinkwarmwassererwärmung für einen Warmwasserverbrauch von 70 l/d (mit Rücklaufbeimischung) bei Variation der Kollektorgröße sowie der Warmwassertemperatur und der Speichergröße (ϑ_{DHW} = Warmwassertemperatur, V_{BS} = Volumen Pufferspeicher).

Für noch höhere solare Deckungen werden deutlich größere Speichervolumina (Größenordnung 5 bis 10 m³) benötigt. Entsprechend ist für diese Anlage ein Pufferspeichervolumen von mehr als 500 l nicht zu empfehlen.

Insbesondere um Stagnation zu vermeiden bzw. zumindest zu reduzieren ist eine Kollektorneigung von 60 ° und höher anzustreben (z.B. Fassadenkollektoren). Durch gute Dimensionierung von Kollektorfläche und Speichervolumen kann bei gleicher solarer Deckung die Pumpenlaufzeit reduziert werden. Bei kleinerer Kollektorfläche wirkt sich zudem der geringere Druckverlust und – gute Dimensionierung der Komponenten vorausgesetzt – der geringere Stromverbrauch der Umwälzpumpe positiv aus.

4.2.4 Erkenntnisse

Der vermutete saisonale Charakter des Erdreich-Wärmespeichers konnte nicht bestätigt werden, wie sich auch bereits oben bei der gesonderten Analyse der Speichereffekte im Erdreich ergeben hat (Abschnitt 4.1.2.3). Es muss entsprechend festgehalten werden, dass es sich bei der hier untersuchten Anlage nicht um ein System mit saisonaler Wärmespeicherung handelt, sondern um ein System mit solarer Regeneration des Erdreich-Wärmeübertragers.

Die Vermeidung von Taktung durch eine abgestimmte Dimensionierung von Wärmepumpe und Wärmeübertragungsfähigkeit des Erdreich-Wärmeübertragers bietet das größte Verbesserungspotential in der Größenordnung von 5 bis 15 %. Insbesondere durch die hohe Entzugsleistung der Wärmepumpe im Verhältnis zur Wärmeübertragungsfähigkeit des Erdreich-Wärmeübertragers werden die Sole und das Erdreich in naher Umgebung der Rohrleitungen stark unterkühlt. Das Erdreich kann die benötigte Wärmeleistung nicht bereitstellen. Um ein Einfrieren des Bodens zu vermeiden wird bei etwa –1,5 °C von der Regelung abgeschaltet.

Weiter wichtige Erkenntnisse aus der Simulation sind in den folgenden Abschnitt der Gesamtbewertung eingeflossen.

5 Gesamtbewertung

Die Untersuchung des Gebäudes hat ergeben, dass es sich um ein funktionierendes Passivhaus mit leicht erhöhtem Heizwärmeverbrauch von gut 23 kWh/(m²a) und einem Energieverbrauch für die Warmwasserversorgung (inkl. Verluste) in ähnlicher Größenordnung handelt. Der leicht erhöhte Heizwärmeverbrauch hat seine Ursache zum Teil darin, dass das Erdreich unter der Bodenplatte im Winter überwiegend kühler ist als ohne aktiven Wärmeentzug. Das führt trotz 30 cm Bodenplattendämmung zu einem erhöhten Wärmeabfluss ins Erdreich (knapp 2 kWh/(m²a)). Außerdem ist vermutlich die winterliche Raumtemperatur höher als die in der Bilanz angesetzten 20 °C (Einfluss: 2,5 kWh/(m²a) je K Temperaturerhöhung. Üblich sind Werte um 21,5 °C.). Zusätzlich führt der Umstand, dass das als Zweifamilienhaus geplante Gebäude mit 152 m² Energiebezugsfläche z.Z. von nur zwei Personen bewohnt wird, zu spezifisch niedrigeren inneren Wärmequellen als in der PHPP-Bilanz angesetzt wurden. Dies erhöht den Heizwärmeverbrauch ebenfalls.

Die monovalente Anlagentechnik benötigt zum Betrieb der Wärmepumpe, Umwälzpumpen, Warmwassernachheizung sowie der Lüftungsanlage ausschließlich elektrischen Strom. Im dritten Bilanzjahr 2009/2010 wurden für alle haustechnischen Aufwendungen (sämtliche Energieaufwendungen im Gebäude mit Ausnahme des Haushaltsstroms) 16,7 kWh/(m²a) Strom verbraucht. Der spezifische Wert entspricht einem absoluten Jahresverbrauch von 2546 kWh/a; bei dem niedrigen Preis für Wärmepumpenstrom von 0,14 €/kWh (Bewohnerangabe von Sep. 2009) entsprechend nur knapp 30,- € im Monat für Heizung, Warmwasser und Lüftung.

In dem nach unten offenen „Erdreichwärmespeicher“ unter dem Gebäude werden trotz hoher solarer Einspeisung nur moderate Erdreichtemperaturen von maximal ca. 22 °C erreicht. Auch eine weiter vergrößerte Kollektoranlage würde, aufgrund der vergleichsweise raschen Verteilung der Wärme im Erdreich, während der Entnahmeperiode im Winter nur zu geringfügig höheren Temperaturen unter dem Haus führen. Es wird deutlich, dass eine saisonale Speicherung von solarer Überschusswärme unter der Bodenplatte bei den gegebenen Dimensionen eines Einfamilienhauses nur sehr eingeschränkt möglich ist. Es kann daher nicht von einem System mit saisonaler Speicherung gesprochen werden, sondern eher von einem System mit solarer Regeneration des Erdreichs als Quelle für die Wärmepumpe. Bei einer erneuten Umsetzung dieses Versorgungskonzeptes wäre es aus diesem Grund sinnvoller im Sommer keine Wärme im Erdreich zu speichern und so die elektrische Energie für den Pumpenbetrieb zu vermeiden. Wenn in einem solchem Fall ein sehr kleiner Neigungswinkel für die Kollektorfläche realisiert würde (z.B. fassadenintegrierte Kollektoren; Optimierung für Übergangszeit und Winter), könnte nur in den Übergangszeiten Energie in das Erdreich eingespeichert werden um es zu regenerieren. Zum Schutz des thermischen Kollektors vor hohen Stagna-

tionstemperaturen im Sommer ist es allerdings bei dem untersuchten Gebäude nicht sinnvoll die sommerliche Einspeicherung zu deaktivieren.

Beim untersuchten Konzept erreicht die Wärmepumpe (ohne Hilfsaggregate) Jahresarbeitszahlen im Bereich von 3,1. Die Ursache für die nur durchschnittlichen Werte begründen sich insbesondere durch:

- die zu groß dimensionierte Wärmepumpe (Takten, starke Unterkühlung des Erdreichs in Rohrnähe),
- die moderate winterliche Erdreichtemperatur (Quellentemperatur der WP),
- das Erreichen der Grenze der Funktionsfähigkeit am Ende des Winters und
- den festgestellten hydraulischen Störungen.

Die Wärmepumpe verlangt quellenseitig einen deutlich größeren Mindestvolumenstrom als für den Solarkollektor notwendig ist. Da beide Systeme mit nur einer Pumpe bedient werden, kann die Pumpe nur für eine der Komponenten optimiert werden. Die Vermeidung von Taktung durch eine abgestimmte Dimensionierung von Wärmepumpe und Wärmeübertragungsfähigkeit des Erdreich-Wärmeübertragers bietet das größte Verbesserungspotential in der Größenordnung von 5 bis 15 %. Insbesondere durch die hohe Entzugsleistung der Wärmepumpe im Verhältnis zur Wärmeübertragungsfähigkeit des Erdreich-Wärmeübertragers werden die Sole und das Erdreich in naher Umgebung der Rohrleitungen stark unterkühlt. Das Erdreich kann dann die benötigte Wärmeleistung nur auf niedrigerem Temperaturniveau bereitstellen, zeitweise wird die Wärmepumpe sogar abgeschaltet, um das Fundament nicht aufzufrieren.

Unter Berücksichtigung der elektrischen Energie für Sole- und Sekundärpumpe (Lieferung Wärmepumpe) kommt die **System-Jahresarbeitszahl** auf niedrige Werte von nur 2,3. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich mit der Solepumpe (elektrische Leistung 180 W) um ein ungeregeltes Gerät mit sehr niedrigem Wirkungsgrad (12 %) handelt, welches zusätzlich durch einen hydraulischen Fehler gegen ein geschlossenes Ventil gearbeitet hat. Wird dieser Zustand optimiert, sind System-Jahresarbeitszahlen von „immerhin“ 2,9 realistisch.

Bei der Untersuchung wurde festgestellt, dass das Versorgungssystem am Ende des Winters an die Grenzen der Leistungsfähigkeit stößt bzw. kurz davor ist (je nach der Höhe der Abschalttemperatur zur Verhinderung von Frost unter dem Gebäude). Generell wird festgestellt, dass mit sinkender Erdreichtemperatur die Arbeitszahl der Wärmepumpe erwartungsgemäß immer geringer wird. Die erforderliche Temperatur des Kombi-Warmwasserspeichers von 40 °C (Heizung) bzw. 45 °C (TWW)[5]) konnte am Ende des Winters 2008/2009 durch die Wärmepumpe nicht mehr bereitgestellt

[5]) 2009/2010 lagen mit 45 und 55 °C veränderte Sollwerte vor.

werden. Das Temperaturniveau von etwa 30 °C reicht als Vorlauftemperatur für die Flächenheizung allerdings aus. Auch zeitweise Unterschreitungen wurden von den Bewohnern aufgrund der hohen Gebäudeträgheit nicht bemerkt. Die Nachheizung des Trinkwarmwassers erfolgte in dieser Zeit verstärkt direktelektrisch. Obwohl für die Heizung kein Backup-System vorhanden ist, bestand für die Bewohner nie ein Engpass in Form zu niedriger Raumtemperaturen. Das Flächenheizsystem (Fußbodenheizung) ist hier durch die niedrigen Vorlauftemperaturen in Kombination mit der elektrischen Warmwassernachheizung optimal geeignet.

Die spezifischen solaren Erträge sind für diese Anlagengröße (10,2 $m^2_{Kollektor}$) mit etwa 485 kWh/($m^2_{Kollektor}$a) gut bis sehr gut (typischerweise 400 bis 450 kWh/($m^2_{Kollektor}$a) bei guten solarthermischen Anlagen).

Primärenergetisch erreicht das System mit fast **44 kWh/(m²a)** ein ähnliches Ergebnis wie Passivhäuser mit herkömmlichen Wärmeversorgungssystemen. Dies ist zunächst enttäuschend angesichts des erhöhten technischen und finanziellen Aufwands im Vergleich zu üblicherweise im Passivhaus eingesetzten Versorgungssystemen. Mit Verbesserungen im Bereich des Stromverbrauchs der Heizungs- und insbesondere der Solepumpe kann der Primärenergiekennwert auf etwa **37 kWh/(m²a)** gesenkt werden. Wird nach den Erkenntnissen der Simulation das weitere Optimierungspotential von 5 bis 15 % ausgeschöpft (insbesondere durch die Reduktion des Taktverhaltens der WP), sind Primärenergiewerte von bis minimal etwa **32 kWh/(m^2a)** erreichbar. Damit könnte ein sehr guter Primärenergiekennwert erreicht werden.

Messungen von fernwärmeversorgten Passivhausprojekten wie der Passivhaus-Siedlung in Hannover-Kronsberg [Peper/Feist/Kah 2001], dem klassisch mit Erdgas versorgten Mehrfamilienhaus (MFH) in Frankfurt [Peper/Feist/Pfluger 2004] oder dem fernwärmeversorgten MFH in Kassel Marbachshöhe [Pfluger/Feist 2001] zeigen ähnliche oder sogar niedrigere Primärenergiekennwerte. Ergebnisse der genannten und noch weiterer messtechnisch untersuchter Gebäude im Passivhausstandard sind in [Peper 2008] zusammengestellt. In Abbildung 106 ist ein Überblick der Primärenergiekennwerte für die Versorgungstechnik aus dieser Queranalyse dargestellt. Dabei handelt es sich bei den Projekten „Neuenburg“ und „Feuerbach“ um Reihenhausprojekte mit „Kompaktgeräten“. Dies bezeichnet eine Haustechnikeinheit welche die gesamte Versorgung für Wärme, Lüftung und Warmwasser monovalent mit Hilfe einer kleinen Luft/Wasser- oder Luft/Luft-Wärmepumpe gewährleistet.

Der Mittelwert für den Primärenergieverbrauch aller untersuchten Gebäude in [Peper 2008] beträgt 42,4 kWh/(m²a). Dabei geht der erhöhte Wert des relativ großen Projektes „Pinnasberg“ (19 Wohneinheiten) stark mit in den Mittelwert ein[6]). Es ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass bei den Untersuchungen als Primärenergiefaktor

[6]) Ursache für den stark erhöhten Wert bei diesem Projekt ist insbesondere ein behebbarer Fehler im zentralen Lüftungssystem.

für Strom nach [Gemis] noch der etwas ungünstigere Wert von 2,7 $kWh_{End}/kWh_{Primär}$ verwendet wurde (aktuell 2,6). Der Mittelwert der Queranalyse ist damit fast genau so hoch wie beim hier untersuchten Gebäude.

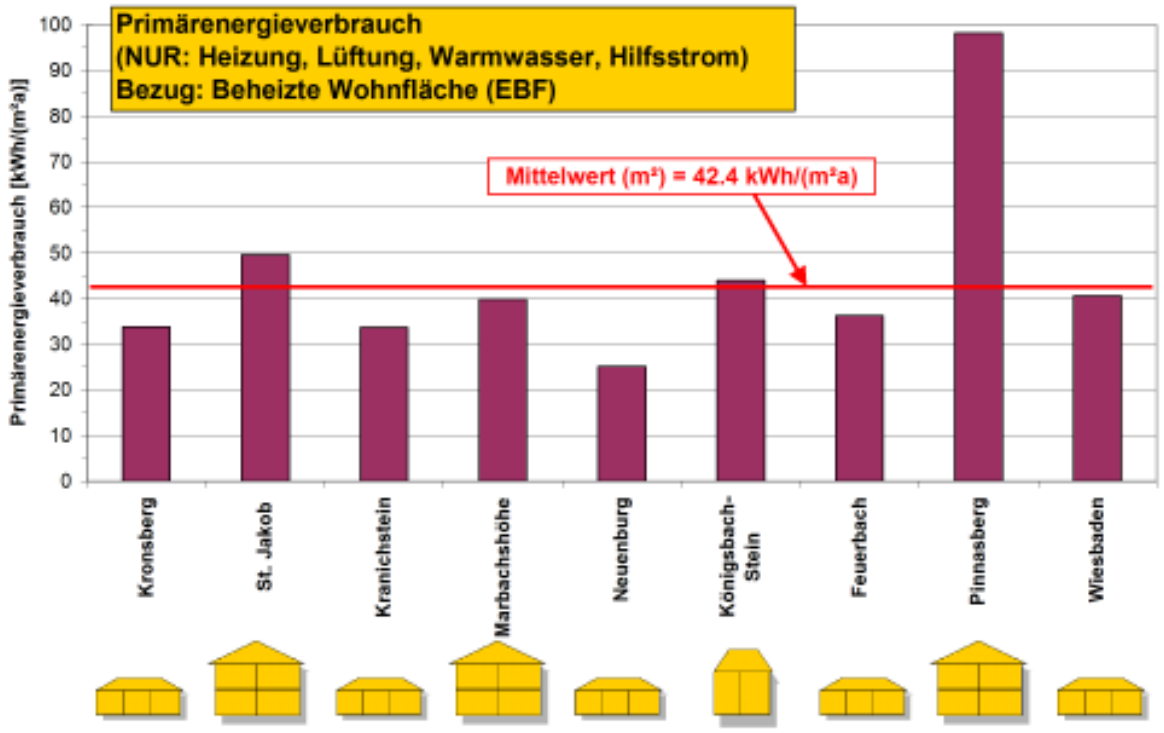


Abbildung 106: Primärenergieverbrauch für die gesamten haustechnischen Versorgungen ohne den Haushaltsstrom von anderen messtechnisch begleiteten Passivhausprojekten aus [Peper 2008]. Die Symbole unter der Grafik zeigen an, um welchen Haustyp es sich handelt. Der Primärenergiefaktor Strom beträgt hier noch 2,7.

Tabelle 19: Legende der verwendeten Haussymbole in Abbildung 106 (aus [Peper 2008]).

Symbol	Haustyp
	Doppelhaus
	Reihenhaus
	Mehrfamilienhaus

In der vorausgegangenen Untersuchung zu innovativen Wärmepumpenlösungen für Passivhäuser [Pfluger 2004] ergibt sich für diese Art der Gebäudetechnik - allerdings ohne die Berücksichtigung von Frostschutzlösungen der Soleflüssigkeit und mit einer noch deutlich größeren Solaranlage (14 m², entspricht plus 37 %) - ein deutlich günstigerer primärenergetischer Prognosewert. Es hat sich bei der Simulation herausgestellt, dass die Wärmeübertragungsfähigkeit und der Speichernutzungsgrad

des horizontal verlegten Erdreich-Wärmeübertragers deutlich geringer sind als bei den Prognoseberechnungen 2004 angenommen wurde. Dies ist unter anderem darin begründet, dass die Wärmeübertragungsfähigkeit nicht nur von den Stoffwerten des Erdreichs und von der Strömungsform (laminar, turbulent), sondern auch vom Be- bzw. Entladezustand des Wärmespeichers abhängt. Die Wärmeübertragungsfähigkeit nimmt bei geringerer Temperaturdifferenz zwischen Sole- und Erdreichtemperatur deutlich ab. Dies limitiert sowohl die maximale Beladetemperatur im Sommer/Herbst als auch die minimale Entladetemperatur im Winter. So kann der Erdreich-Wärmespeicher am Ende des Winters nicht tiefer als etwa 5 °C entladen werden, obwohl theoretisch 0 °C (und weniger) möglich wären (Grädigkeit des Wärmeübertragers). Außerdem wurde festgestellt, dass ein großer Teil der im Sommer eingespeisten Solarenergie im Winter nicht mehr zur Verfügung steht. Die sehr aufwendige Ermittlung eines Speichernutzungsgrades wurde nicht durchgeführt, er dürfte weit unter 20 % liegen.

Wie dargestellt ist eine Steigerung der Jahresarbeitszahl und Verbesserung des Systems möglich, jedoch ist anzunehmen, dass der damals prognostizierte Primärenergiekennwert von **25 KWh/(m² a)** nicht erreicht werden. Es muss allerdings ergänzend berücksichtigt werden, dass bei der Prognoseberechnung vom Heizenergiebedarf von 15 kWh/(m²a) ausgegangen wurde. Wird die Differenz zum tatsächlich gemessenen Heizwärmeverbrauch von 23,4 kWh/(m²a) berücksichtigt, mit der Systemarbeitszahl verrechnet und primärenergetisch bewertet, wächst der Primärenergie-Prognosewert auf **34,8 kWh/(m²a)** [7]**)**. Damit liegen die Berechnungen aus den gemessenen Verbrauchswerten für ein optimiertes System mit 32 kWh/(m²a) etwa gleichauf mit der korrigierten Prognose.

In einem Nachfolgeprojekt des Architekten Trykowski mit ähnlicher Technik wurde eine deutlich kleinere Wärmepumpe (Sonderanfertigung mit 2 kW Heizleistung) eingesetzt. Durch die Bewohner wurden hier Stromverbräuche für die gesamte Haustechnik gemessen [Walcher 2010]. Mit Ergänzung der nicht gesondert gemessenen Verbräuche für die Solarumwälzpumpe und die Lüftungsanlage (Daten übernommen aus dem hier untersuchten Gebäude) berechnet sich der Stromverbrauch zu insgesamt 10,5 kWh/(m²a). Primärenergetisch bewertet ergibt sich damit der sehr gute Wert von **27,3 kWh/(m²a)**. Allerdings liegen keinerlei weitere messtechnische Details (Erdreich, Nutzung, Technik) zu dem relativ großen Gebäude (190 m²) vor. Eine valide Interpretation der Daten wäre erst mit einer aufwendigeren Untersuchung, ähnlich wie beim hier betrachteten Gebäude, möglich.

Es kann also gezeigt werden, dass mit Optimierungen durchaus ein noch besseres Gesamtergebnis erzielt werden kann, das deutlich näher an der Prognose liegt. Es muss aber betont werden, dass eine solche Lösung der innovativen Versorgungs-

[7]) In der Prognoseberechnung wurde kein Wärmestrom vom Gebäude ins Erdreich angenommen. Daher wird hier der in der Simulation errechnete Zusatzverbrauch von knapp 2 kWh/(m²a) auch nicht zum Abzug gebracht.

system – insbesondere bei einem solchen Prototyp – relativ kompliziert und daher besonders fehleranfällig ist. Diese Feststellung wird bestätigt durch die Untersuchungen [Afjei/Dott/Huber 2007] und [Afjei et al. 2001] von unterschiedlichen Systemen. Darin wird u.a. festgestellt, dass nur sehr einfache WP-Versorgungssysteme in der Praxis gute Jahresarbeitszahlen (JAZ) erwarten lassen. Werden sie komplizierter, sinken die erreichten JAZ.

Die saisonale Energiespeicherung mit individuellen technischen Speichern für Einfamilienhäuser ist und bleibt mit verfügbarer Technik unwirtschaftlich. Aus diesem Grund wurden, u.a. mit diesem Projekt Möglichkeiten gesucht, die Speicherkosten stark zu reduzieren. Die Verwendung des Erdreichs direkt unter dem Haus ohne weitere technische Einrichtungen reduziert die Kosten deutlich gegenüber jeder anderen gesonderten technischen Vorrichtung zur Speicherung. Es bleiben nur die Kosten der Verlegung der Soleleitung zum Laden des Erdreichwärmespeichers. Dies zeigen auch schon ältere Untersuchungen (z. B. [Hinz/Werner 1994]). Wie oben beschrieben, zeigt sich allerdings bei diesem Gebäude, dass damit nicht von einem wirklichen Wärmespeicher gesprochen werden kann, sondern nur von der solaren Regeneration des Erdreichs als Wärmequelle der Wärmepumpe.

5.1 Optimierungspotential

Durch die detaillierte Analyse des Systems durch Messdatenauswertung und Simulation konnten Schwachstellen bei der Umsetzung aufgedeckt werden und Verbesserungspotential erarbeitet werden. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Punkte folgt hier:

Einsparungen, die durch die Behebung der **Fehler,** die in der Hydraulik ermittelt wurden, erreicht werden können:

- Eine Verhinderung der unbeabsichtigten Entladung des Pufferspeichers ins Erdreich bei solarer Beladung des Erdreichs erzielt thermische und elektrische Einsparungen.

- Einsparung durch Vermeidung der nächtlichen Auskühlung der Rohrleitungen bzw. des Warmwasserspeichers durch Schwerkraftzirkulation über die Solarkollektoren / die Umgebung.

- Optimierung der Einstellungen der Solltemperaturen im Warmwasserspeicher, damit nicht die WP beim Erreichen ihrer oberen Grenztemperatur (55 °C) abschaltet, die Umwälzpumpen aber weiter betrieben werden. Zum Schutz gegen Auffrieren des Fundaments sollte der untere Grenzwert der Regelung wieder etwas angehoben werden.

Zudem sind folgende **Verbesserungen** der **bestehenden Anlage** z.T. ohne größere Umbauten bzw. Investitionen möglich:

- Wärmepumpe: Betrieb der Wärmepumpe nur im Winter und während der Übergangszeiten, ansonsten sollte das Gerät komplett ausgeschaltet werden.

- Pumpe Heizkreis: Zeitgesteuertes rechtzeitiges saisonales Ausschalten (bisher per Hand). Außerdem Regelung nach Bedarf bzw. zumindest Ausschalten der Pumpe bei Trinkwarmwasseranforderung.

- Optimierung der Regelung: Der häufige Wechsel zwischen solarer Beladung des Warmwasserspeichers und des Erdreichs sollte verringert werden.

- Solaranlage: Verringerung der zu hohen Volumenströme beim Solarladebetrieb durch die dafür überdimensionierte Solepumpe. Eine geregelte Pumpe bzw. eine eigene Solarpumpe für die Betriebsweise Erdreicheinspeisung kann hier Abhilfe schaffen. Dabei müssen auf jeden Fall die anfallenden Umbaukosten berücksichtigt werden.

Insbesondere kann die solare Beladung im Herbst energetisch ungünstig sein, da bei relativ hohem Stromaufwand für die Solepumpe relativ wenig Energie ins Erdreich eingebracht wird.

Optimierungsmöglichkeiten für zukünftige Anlagen:

- Wärmepumpe: Anpassung der Leistung der Wärmepumpe zur Reduzierung der Taktung. Die geringere Leistung der WP verbessert die Wärmeübertragungsfähigkeit des Erdreich-Wärmeübertragers und führt zu wesentlich geringeren Aufheiz- und Abkühlverlusten der WP und der Rohrleitungen.

- Solarkollektoren: Optimierung der Neigung des jetzt dachintegrierten Kollektors für die Übergangszeit (z.Z. mit 16 ° Neigung optimiert für die Sommerzeit).

- Warmwasserspeicher: Optimierung der Größe und der Wärmedämmung des Warmwasserkombispeichers.

- Optional Backup für Heizung: Denkbar ist eine Verschaltung der vorhandenen Durchlauferhitzer zum direktelektrischen Notbetrieb falls die Heizleistung irgendwann doch nicht ausreichen sollte. Im Passivhaus kann dies im Notfall allerdings auch einfach und kostengünstig durch einen kleinen Heizlüfter gelöst werden.

Das Verbesserungspotential bei der Dimensionierung des Erdreich-Wärmeübertragers (Solerohrleitungen) kann insgesamt als gering bewertet werden. Durch angepasste Volumenströme sowie durch Reihenschaltung der Rohrschlangen oder Ver-

größerung der flächenspezifischen Rohrlänge ist zwar eine gewisse Verbesserung erzielbar, letztere jedoch auf Kosten eines höheren Pumpenstrombedarfs, weshalb die Maßnahme nicht zu empfehlen ist.

Wie oben bereits analysiert, stellt das größte Verbesserungspotential in der Größenordnung von 5 bis 15 % die Vermeidung von Taktung durch eine abgestimmte Dimensionierung von Wärmepumpe und Wärmeübertragungsfähigkeit des Erdreich-Wärmeübertragers dar.

Mit optimierter Auslegung und Vermeidung der technischen Fehler lassen sich dann gute Primärenergiewerte erreichen. Die dafür notwendige Technik ist allerdings relativ aufwendig und damit vergleichsweise kostenintensiv. Bei dem realisierten Gebäude bleibt abzuwarten wie stark sich die Optimierungen auswirken werden. Dazu wäre es sinnvoll, wenn das System ein weiteres Jahr messtechnisch begleitet werden könnte.

5.2 Denkbare Alternativsysteme

Als kostengünstigere Alternative zum realisierten System ist ein solar unterstütztes Kompaktgerät zu sehen. Unter der Annahme, dass das Kompaktgerät (Luft-Luft bzw. Luft/Wasser) nur den Heizwärmebedarf deckt, kann von einer Jahresarbeitszahl von min. 2 ausgegangen werden. Wird dazu etwa 70 % des Trinkwarmwasserbedarfs solar gedeckt, wozu für 2 Personen etwa 4-6 m² Kollektorfläche (und damit nur etwa 50 % derjenigen des untersuchten Systems) benötigt werden, ist solch ein System primärenergetisch kaum schlechter, auch wenn die verbleibenden 30 % des Trinkwarmwasserbedarfs direktelektrisch erzeugt werden.

Tabelle 20: Abschätzung Primärenergieaufwand Alternativsystem

	Endenergie		**Strombedarf**
Heizwärmebedarf *)	21 kWh/(m²a)	JAZ = 2 **)	10,5 kWh/(m²a)
Trinkwarmwasser	20 kWh/(m²a)	Solar mit 30 % direktelektrische Nacherwärmung	6,0 kWh/(m²a)
Summe			**16,5 kWh/(m²a)**
Primärenergie		PE = 2,6	**42,9 kWh/(m²a)**

*) gemessen minus 2 kWh/(m² a) wg. Erdreichunterkühlung.

**) Mindest JAZ einer Luft/Luft-WP nur Heizbetrieb nach [Pfluger 2004] abgeschätzt.

Als eine Alternative zur Optimierung des Systems (mit umfassender konzeptioneller Änderung, jedoch ohne größere Investitionen) ist entsprechend die Trennung der Systeme Heizung und Trinkwarmwasser zu untersuchen. Wird die Wärmepumpe ausschließlich für die Deckung des Heizwärmebedarfs auf niedrigem Temperatur-

niveau (30 bis 35 °C) eingesetzt, ist der Betrieb der Wärmepumpe mit relativ hohem JAZ gegebenenfalls auch ohne solare Einspeisung möglich. Der Erdkollektor könnte dann neben dem Gebäude untergebracht werden. Mit der Solaranlage kann 70 bis 80 % des Trinkwarmwasserbedarfs abgedeckt werden. Die vorhandenen direktelektrischen Durchlauferhitzer decken die fehlenden 20 bis 30 %.

Im Falle hoher solarer Deckung von z.B. 90 % des Trinkwarmwasserbedarfs kann eine deutliche primärenergetische Verbesserung auch ohne saisonale Speicherung erreicht werden. Dafür ist insbesondere, auch um Stagnation zu vermeiden bzw. zumindest zu reduzieren, eine Kollektorneigung von 60 ° und höher anzustreben (z.B. Fassadenkollektoren).

Tabelle 21: Abschätzung Primärenergieaufwand Alternativsystem „ Hohe Solare Deckung“

	Endenergie		**Strombedarf**
Heizwärmebedarf *)	21 KWh/(m²a)	JAZ = 2 **)	10,5 KWh/(m²a)
Trinkwarmwasser	20 KWh/(m²a)	Direktelektrische Nacherwärmung 10 %	2,0 KWh/(m²a)
Summe			**12,5 KWh/(m²a)**
Primärenergie		PE = 2.6	**32,5 KWh/(m²a)**

*) gemessen minus 2 kWh/(m² a) wg. Erdreichunterkühlung.

**) Mindest JAZ einer Luft/Luft-WP nur Heizbetrieb nach [Pfluger 2004] abgeschätzt.

6 Literatur

[Auer/Schote 2007] Dr. Auer, Falk; Schote, Herbert: **Feldtest Elektro – Wärmepumpen: Nicht jede Wärmepumpe trägt zum Klimaschutz bei**. Erfassung der Leistungsfähigkeit von Elektro – Wärmepumpen unter realistischen Betriebsbedingungen am Oberrhein, Lahr (Schwarzwald), Oktober 2007

[Afjei et al. 2001] Afjei ;Schonhardt; Zweifel; Achermann; von Euw; Gabathuler; Erb; Renaud: **Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen.** Teil 2: Grundlagen und Computersimulationen. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Dezember 2002

[Afjei/Dott/Huber 2007] Afjei, T.; Dott, R.; Huber, A.: **Heizen und kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen**. Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Bern August 2007

[Carnot 09] CARNOT Blockset, Version R2009; Bezugsquelle: Solar-Institut Jülich, 2009

[Feist 2005] Feist, Wolfgang: **Heizlast in Passivhäusern – Validierung durch Messungen**. Endbericht im Rahmen des IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38. Passivhaus Institut, Darmstadt, Juni 2005

[Gemis] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit / Öko-Institut: **Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme** (Version 4.14); Wiesbaden

[Hinz/Werner 1994] Hinz, Eberhard; Werner, Johannes: **Messdatenerfassung und Auswertung beim ökologischen Nullenergiehaus Dörpe**. Institut Wohnen und Umwelt (IWU); ISBN-Nr.: 3-927846-57-0; Darmstadt, November 1994

[Matlab 10] Matlab/Simulink - Produktinformation, The MathWorks GmbH; http://www.mathworks.com, 2010

[Ochs 2010] Ochs, Fabian: **Simulationsstudie zum Projekt Passivhaus Houwen**. Untersuchung und Optimierung des Wärmeversorgungssystems. Universität Innsbruck, September 2010, *unveröffentlicht*

[Peper/Feist/Kah 2001] Peper, S.; Feist, W.; Kah, O: **Meßtechnische Untersuchung und Auswertung Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg**, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19, Endbericht Messzeitraum Oktober 1999 bis April 2001 Passivhaus Institut/Stadtwerke Hannover, Darmstadt / Hannover 2001.

[Peper/Feist/ Pfluger 2004] Peper, S.; Feist, W.; Pfluger, R.: **Ein nordorientiertes Passivhaus, Messtechnische Untersuchung und Auswertung von 19 Wohnungen im Passivhaus-Standard in Frankfurt-Bockenheim,** Grempstraße, Forschungsbericht im Auftrag der Frankfurter Aufbau AG, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004 (Bezug unter www.passiv.de).

[Peper 2008] Peper, Søren: **Passivhaus-Heizsysteme in der Praxis.** In: Heizsysteme im Passivhaus - Statistische Auswertung und Systemvergleich**;** Protokollband Nr. 38 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase IV; Herausgeber: Dr. W. Feist, Passivhaus Institut; Darmstadt 2008.

[Pfluger/Feist 2001] Pfluger, R.; Feist, W: **Meßtechnische Untersuchung und Auswertung, Kostengünstiger Passivhaus-Geschoßwohnungsbau in Kassel-Marbachshöhe**, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 15, Fachinformation PHI-2001/2. Darmstadt 2001

[Pfluger 2004] Pfluger, Rainer: **Möglichkeiten und Potentiale unterschiedlicher Wärmequellen und Wärmesenken für Wärmepumpen und Kompaktgeräte.** In: Neue Passivhaus – Gebäudetechnik mit Wärmepumpen; Protokollband Nr. 26 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2004.

[PHPP] **Energiebilanz des Gebäudes mit dem Passivhaus Projektierungspaket** (PHPP 2004). Erstellt vom Ingenieurbüro Trykowski vor (Stand vom 22. Nov 2005)

[Schnieders 2004] Schnieders, Jürgen: **Berechnungsverfahren für Wärmeverluste durch das Erdreich: Physikalische Prinzipien und die Hintergründe der EN 13370.** In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 27, Wärmeverluste durch das Erdreich, Darmstadt, Passivhaus Institut, 2004

[Walcher 2010] Monatliche Messdaten von zwei Stromzählern (Januar 2008 bis Juni 2010) und Mitteilungen per E-Mail (17.09.2010) des Bewohners des Nachfolgerprojektes.

7 Anhang

Protokoll Bodenproben Passivhausinstitut 24.01.2007

Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl Angewandte Physik/Thermophysik
Konrad-Zuse-Straße 1
03046 Cottbus
Tel: +49-355-692315
Fax: +49-355-692103
www.thermophysik.de

Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Cottbus, den 24.01.2007

Protokoll

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Sorptionsisothermen an Bodenproben

(Dieses Protokoll enthält 5 Seiten)

Auftraggeber: Passivhausinstitut Darmstadt
Rheinstraße 44/46, D-64283 Darmstadt

Probenbezeichnung

Probe	Bezeichnung
A	Garten Süd, verdichtete Oberfläche
B	Untere Sauberkeitsschicht (Mitte Haus)

Ermittlung der Probenfeuchte im Anlieferungszustand

Die Proben wurden bis zur Massekonstanz bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet.

Probe	$Masse_{feucht}$ [g]	$Masse_{trocken}$ [g]	U_m [%]	U_v [%]
A	728,13	639,08	13,93	15,68
B	715,59	638,59	12,06	14,70

$$U_m = \frac{m_{feucht} - m_{trocken}}{m_{trocken}} \times 100 \text{ in \%} \qquad U_v = U_m \times \frac{\rho_{Baustoff}}{\rho_{Wasser}} \text{ in \%}$$

Dichtebestimmung

Die Ermittlung der Dichte erfolgte nach dem Messzylinderverfahren an den bei 105 °C getrockneten Proben (auf Korngröße <0,8 mm zerkleinert).

Probe	Volumen [cm^3]	Masse [g]	Trockendichte [g/cm^3]
A	89	100,25	1,126
B	82	99,98	1,219

Protokoll Bodenproben Passivhausinstitut 24.01.2007

Sorptionsisotherme

Die Sorptionsfeuchte wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 12571 im Klimaschrank gemessen.

Die Proben wurden in flachen Schalen bis zum Erreichen der Massekonstanz (ca. 4 Tage) bei 23 °C und der jeweiligen Feuchte im Klimaschrank gelagert.

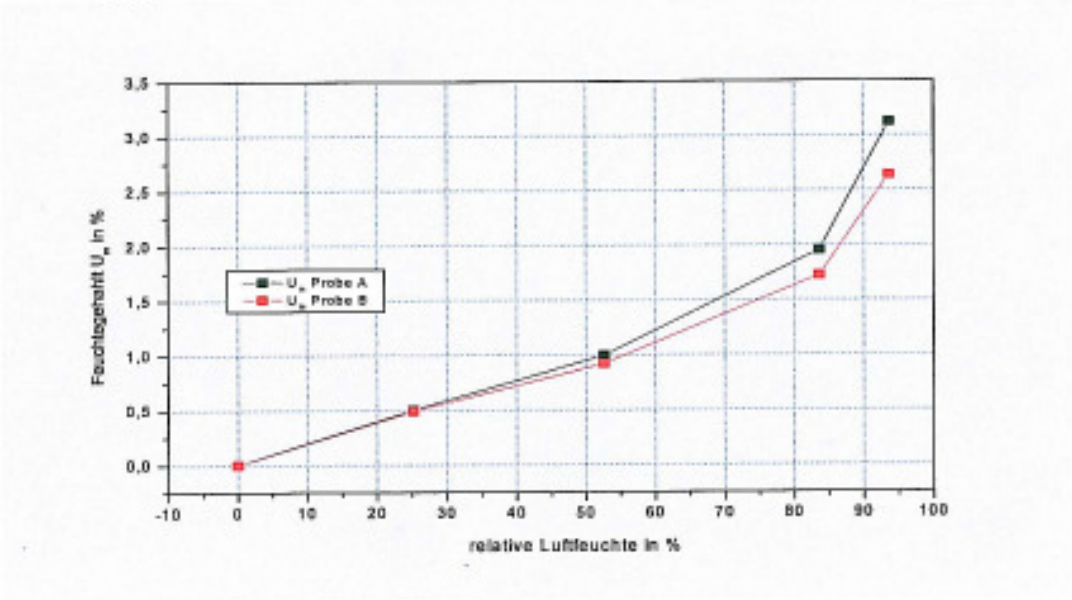
1x täglich wurden die Proben gewogen.

Die Feuchte wurde mit Protimeter/Feuchtesensor (Taupunktspiegel) gemessen.

Probe	$Masse_{trocken}$ [g]	Relative Luftfeuchte [%]	$Masse_{feucht}$ [g]	U_m [%]	U_v [%]
A	696,67	25,2	700,17	0,50	0,56
		52,3	703,62	1,00	1,13
		83,6	710,27	1,95	2,20
		93,6	718,42	3,12	3,51
B	694,03	25,2	697,43	0,49	0,60
		52,3	700,43	0,92	1,12
		83,6	705,98	1,72	2,10
		93,6	712,33	2,64	3,22

$$U_m = \frac{m_{feucht} - m_{trocken}}{m_{trocken}} \times 100 \text{ in \%}$$

$$U_v = U_m \times \frac{\rho_{Baustoff}}{\rho_{Wasser}} \text{ in \%}$$



Protokoll Bodenproben Passivhausinstitut 24.01.2007

Versuchsaufbau Klimaschrank

Protokoll Bodenproben Passivhausinstitut 24.01.2007

Wärmeleitfähigkeitsmessung

Die Messungen der Wärmeleitfähigkeit erfolgten an Probenscheiben von 85 mm Durchmesser und 20 mm Dicke in einer Einplattenapparatur nach dem stationären Wärmestrommessplattenverfahren. Die Messung erfolgte bei waagerechter Plattenanordnung und einer Mittentemperatur von 15°C sowie einer Temperaturdifferenz von 10 K.

Die feuchten Proben wurden in einem Ring leicht (Probe A) bzw. stark (Probe B) verdichtet, anschließend in dampfdiffusionsdichte Folie eingeschweißt und in der Apparatur mit Stativplatten von 14,5 kg beschwert.

Die bei 105 °C getrockneten Proben wurden vor der Messung auf eine Korngröße < 0,8 mm zerkleinert, in einen Ring gefüllt (oben und unten je ein Stück Folie) und mit Stativplatten von 14,5 kg beschwert.

Messfehler der Trockenmessung: < 5 %
Messfehler der Feuchtmessung: < 10 %

Probe	Probenzustand	Probengröße	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K]
A	Probenfeuchte im Anlieferungszustand U_m = 13,93 %	Ø 85 mm, Dicke 20,95 mm	1,160
	trocken	Ø 85 mm, Dicke 20 mm	0,201
B	Probenfeuchte im Anlieferungszustand U_m = 12,06 %	Ø 85 mm, Dicke 20,72 mm	1,184
	trocken	Ø 85 mm, Dicke 20 mm	0,206

Protokoll Bodenproben Passivhausinstitut 24.01.2007

Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität C_P wurde an den bei 105 °C getrockneten Proben (<0,8 mm) mit dem Kalorimeter Setaram Micro DSC III gemessen.

Temperatur:	2 bis 25 °C
Heizrate:	0,1 K/Minute
Mess- und Vergleichszelle:	1
Thermostat:	10 °C
Stickstoffspülung:	0,8 bar
Messfehler:	< 6%

Probe	Einwaage [g]	Temperatur [°C]	Spezifische Wärmekapazität C_P [J/g·K]
A	0,6674	5,01	0,774
		9,98	0,783
		15,05	0,792
		20,00	0,798
		24,97	0,806
B	0,6589	5,01	0,777
		9,99	0,789
		14,96	0,797
		20,00	0,802
		24,98	0,810

Die Messungen des Lehrstuhls Angewandte Physik/Thermophysik der BTU Cottbus erfolgen im Rahmen universitärer Forschung. Sie dienen der Unterstützung bei Produktentwicklungen. Sie sind keine amtlichen Prüfungen im Sinne einer Zulassung und erfolgen nicht mit DIN-zugelassenen Geräten.