

Gaswärmepumpe mit Solarthermie
für die DVGW-Innovationsoffensive „Gastechnologie“
zum Themencluster:
Anwendungstechnologie

Management Summary

G 5/02/10

gefördert durch: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
Technisch-wissenschaftlicher Verein

ausgeführt durch: Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

Autoren:

Dr. Rolf Albus, Benedikt Scherber, Jens Brauner, Frank Burmeister, Mustafa Flayyih
Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

Essen, Oktober 2012



Die DVGW-Innovationsoffensive.
www.dvgw-innovation.de



Hintergrund

Gaswärmepumpen stellen eine hocheffiziente Alternative für die Gebäudebeheizung dar. Relativ neu ist der Einsatz von Solarkollektoren als Umweltwärmequelle. Durch die potentiell höheren Temperaturen als bei anderen Umweltwärmequellen ist eine größere Effizienz zu erwarten. Da Wärmepumpen bei geringen Vorlauftemperaturen die höchste Effizienz aufweisen, wirkt sich die Warmwasserbereitung negativ auf den Gesamtwirkungsgrad aus. Durch die Kombination mit Solarkollektoren, die bei entsprechend höheren Temperaturen die Warmwasserbereitung übernehmen können, kann die Gesamteffizienz weiter gesteigert werden. Diese Systemtechnologie wurde auf Basis einer Parameteranalyse untersucht, um die Effizienz beeinflussenden Parameter isolieren zu können. Das Gesamtsystem ist im Labor untersucht worden, Feldtestdaten aus der IGWP sind in die Beurteilung mit eingeflossen, des Weiteren wurde ein Simulationsmodell in Modelica zur Gesamtsystemanalyse entwickelt, die die Abbildung dynamischer Vorgänge erlaubt.

Laboruntersuchungen

Als Grundlage der Untersuchung wurde die VDI Richtlinie 4650-2 verwendet. Die Umweltwärmequelle „Solar“ wurde zur besseren Reproduzierbarkeit durch einen Kryostaten ersetzt. Dabei wurden die Heizkreise 35/28 °C (Fußbodenheizung) und 55/45 °C (Niedertemperaturradiatoren) vermessen. Die VDI 4650-2 gibt über die Anforderungen der Messung hinaus eine Berechnungsvorschrift vor, um die Einflüsse solarunterstützter Warmwasserbereitung und solarer Direktheizung zu integrieren.

Feldtestdaten

Zur besseren Bewertung der Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen wurden Feldtestdaten von der IGWP zur Verfügung gestellt und durch das GWI ausgewertet. Aus der Interaktion von Nutzer, System und Gebäude wurden die Einflüsse der einzelnen Parameter abgeleitet. Die Bewertung hat gezeigt, dass das Nutzerverhalten nach wie vor den größten Einfluss auf die Effizienz des Gesamtsystems hat. Weiterhin hat die Auswertung der Feldtestdaten gezeigt, dass sich eine weitere Vergrößerung der Solarkollektorfläche positiv auf eine mögliche direkte Nutzung der Energie zur Warmwasserbereitung und damit auf den Systemnutzungsgrad auswirkt, allerdings so gut wie keinen Einfluss auf den Nutzungsgrad der Wärmepumpe hat.

Simulation

Die Wärmepumpe wurde mit dem Ziel einer dynamischen Sensitivitätsanalyse mit dem Programm Dymola bzw. der Modellierungssprache Modelica abgebildet, simuliert und validiert. Dabei wurden die Vorlauftemperaturen und die Umweltwärmequellentemperatur variiert, um deren Einfluss auf die Systemeffizienz zu ermitteln. Eine Steigerung der Vorlauftemperatur führt zu einer Effizienzeinbuße, eine Steigerung der Soletemperatur wirkte sich dagegen positiv auf die Effizienz aus.

Optimal-Einstellungen/Handlungsempfehlungen

Als Ergebnisse dieser Studie wurden u. a. Handlungsempfehlungen für einen möglichst effizienten Einsatz von Gaswärmepumpen mit Solarthermie als Umweltwärmequelle formuliert. Grundsätzlich sollten diese Systeme bei möglichst niedrigen Heizkreistemperaturen und kleiner Last betrieben werden. Da der Nutzer den größten Einfluss auf die Effizienz hat, sollte er für dieses System möglichst gut sensibilisiert werden.

Im Zuge der Markteinführung sind öffentliche Förderprogramme hilfreich, damit sich diese Technologien etablieren können. In der Kommunikation sind alle Marktpartner gefordert.

Gaswärmepumpe mit Solarthermie
für die DVGW-Innovationsoffensive „Gastechnologie“
zum Themencluster:
Anwendungstechnologie

Abschlussbericht

G 5/02/10

gefördert durch: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
Technisch-wissenschaftlicher Verein

ausgeführt durch: Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

Autoren:

Dr. Rolf Albus, Benedikt Scherber, Jens Brauner, Frank Burmeister, Mustafa Flayyih
Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

Essen, Oktober 2012



Die DVGW-Innovationsoffensive.
www.dvgw-innovation.de



Management Summary

Hintergrund

Gaswärmepumpen stellen eine hocheffiziente Alternative für die Gebäudebeheizung dar. Relativ neu ist der Einsatz von Solarkollektoren als Umweltwärmequelle. Durch die potentiell höheren Temperaturen als bei anderen Umweltwärmequellen ist eine größere Effizienz zu erwarten. Da Wärmepumpen bei geringen Vorlauftemperaturen die höchste Effizienz aufweisen, wirkt sich die Warmwasserbereitung negativ auf den Gesamtwirkungsgrad aus. Durch die Kombination mit Solarkollektoren, die bei entsprechend höheren Temperaturen die Warmwasserbereitung übernehmen können, kann die Gesamteffizienz weiter gesteigert werden. Diese Systemtechnologie wurde auf Basis einer Parameteranalyse untersucht, um die die Effizienz beeinflussenden Parameter isolieren zu können. Das Gesamtsystem ist im Labor untersucht worden, Feldtestdaten aus der IGWP sind in die Beurteilung mit eingeflossen, des Weiteren wurde ein Simulationsmodell in Modelica zu Gesamtsystemanalyse entwickelt, die die Abbildung dynamischer Vorgänge erlaubt.

Laboruntersuchungen

Als Grundlage der Untersuchung wurde die VDI Richtlinie 4650-2 verwendet. Die Umweltwärmequelle „Solar“ wurde zur besseren Reproduzierbarkeit durch einen Kryostaten ersetzt. Dabei wurden die Heizkreise 35/28 °C (Fußbodenheizung) und 55/45 °C (Niedertemperatur-radiatoren) vermessen. Die VDI 4650-2 gibt über die Anforderungen der Messung hinaus eine Berechnungsvorschrift vor, um die Einflüsse solarunterstützter Warmwasserbereitung und solarer Direktheizung zu integrieren.

Feldtestdaten

Zur besseren Bewertung der Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen wurden Feldtestdaten von der IGWP zur Verfügung gestellt und durch das GWI ausgewertet. Aus der Interaktion von Nutzer, System und Gebäude wurden die Einflüsse der einzelnen Parameter abgeleitet. Die Bewertung hat gezeigt, dass das Nutzerverhalten nach wie vor den größten Einfluss auf die Effizienz des Gesamtsystems hat.

Weiterhin hat die Auswertung der Feldtestdaten gezeigt, dass sich eine weitere Vergrößerung der Solarkollektorfläche positiv auf eine mögliche direkte Nutzung der Energie zur Warmwasserbereitung und damit auf den Systemnutzungsgrad auswirkt, allerdings so gut wie keinen Einfluss auf den Nutzungsgrad der Wärmepumpe hat.

Simulation

Die Wärmepumpe wurde mit dem Ziel einer dynamischen Sensitivitätsanalyse mit dem Programmpaket Dymola bzw. der Modellierungssprache Modelica abgebildet, simuliert und validiert. Dabei wurden die Vorlauftemperaturen und die Umweltwärmequellentemperatur variiert, um deren Einfluss auf die Systemeffizienz zu ermitteln. Eine Steigerung der Vorlauftemperatur führt auf eine Effizienzeinbuße, eine Steigerung der Soletemperatur wirkte sich dagegen positiv auf die Effizienz aus.

Optimal Einstellungen/Handlungsempfehlungen

Als Ergebnisse dieser Studie wurden u. a. Handlungsempfehlungen für einen möglichst effizienten Einsatz von Gaswärmepumpen mit Solarthermie als Umweltwärmequelle formuliert. Grundsätzlich sollten diese Systeme bei möglichst niedrigen Heizkreistemperaturen und kleiner Last betrieben werden. Da der Nutzer den größten Einfluss auf die Effizienz hat, sollte er für dieses System möglichst gut sensibilisiert werden.

Im Zuge der Markteinführung sind öffentliche Förderprogramme hilfreich, damit sich diese Technologien etablieren können. In der Kommunikation sind alle Marktpartner gefordert.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	I
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
1 Einleitung	9
2 Systembeschreibung	10
2.1 Beschreibung der Systemparameter	10
2.1.1 Systemparameter Wärmequelle	13
2.1.2 Systemparameter Heizkreis	14
2.1.3 Systemparameter Nutzerverhalten.....	15
2.1.4 Systemparameter Hilfsenergie	16
2.1.5 Systemparameter Wärmespeicher	17
2.1.6 Regeneration.....	18
2.2 Die Adsorptionswärmepumpe	18
2.3 Die Vaillant zeoTHERM Wärmepumpe	20
2.4 Solarthermie	21
2.4.1 Einflussgrößen Solarthermie	22
2.5 Besondere Einsatzvorteile.....	23
2.6 Vergleich mit Brennwert und Solarthermie	24
3 Messergebnisse.....	27
3.1 Erfahrungen von E.ON Ruhrgas.....	27
3.2 Erfahrungen bei RWE	28
3.3 Erfahrungen/Messungen am GWI	28
3.3.1 Nutzungsgrad der Warmwasserbereitung mit Solarunterstützung ..	35
3.3.2 Nutzungsgrad für die solarunterstützte Raumheizung.....	36
3.3.3 Gesamtjahresnutzungsgrad und Gesamtjahresheizzahl	36
3.3.4 Aussagekraft der Testergebnisse.....	38
4 Modellbildung zur Simulation.....	39

4.1 Validierung	46
4.2 Simulationsergebnisse	48
4.3 Validierung der Wärmespeichermodells	54
4.4 Validierung des Solarkollektormodells.....	56
5 Feldtestdatenauswertung	57
6 Demonstrationszentrum	80
7 Handlungsempfehlungen.....	86
A Anhang	88
Berechnung der mittleren und maximalen Fehler bei den Messungen zur VDI 4650-2	88
Literaturverzeichnis	91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Temperaturverhältnisse in einem Wärmepumpenprozess	11
Abbildung 2-2: Vergleich unterschiedlicher Nutzertypen in Gebäuden ohne Lüftungsanlage [IWU03]	16
Abbildung 2-3: Schema einer Adsorptionswärmepumpe [IELe09].....	19
Abbildung 2-4: Gaswärmepumpe zeoTHERM [Val].....	20
Abbildung 2-5: Schemazeichnung einer Brennwert und Solaranlage [ASUE]	24
Abbildung 2-6: Nutzbare Kollektortemperatur durch eine Gaswärmepumpe [Val].....	26
Abbildung 3-1: zeoTHERM in Zweimodulbauweise (Vorgängermodell) [Val]	27
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung des am GWI eingesetzten Prüfstandes.....	29
Abbildung 3-3: GWI-Prüfstand.....	30
Abbildung 3-4: Vergleich von Labordaten und Feldtestdaten	38
Abbildung 4-1: Zeolithwärmepumpenmodell mit Schnittstellen nach außen.....	40
Abbildung 4-2: Hauptstruktur der ZWP	41
Abbildung 4-3: Modell des Zeolith Moduls.....	42
Abbildung 4-4: Controller (Steuerungsmodell).....	43
Abbildung 4-5: Gesamtkreis mit Trockenkühler und Solarkreis	44
Abbildung 4-6: Modell des Brennwertkessels	44
Abbildung 4-7: Schichtenspeicher	45
Abbildung 4-8: Modell für die Solarkollektoren	46
Abbildung 4-9: Verlauf der Vorlauftemperatur für Parameter I bei erhöhter Rücklauf- temperatur	48
Abbildung 4-10: Verlauf der Vorlauftemperatur für Parameter II bei erhöhter Rück- lauftemperatur	49
Abbildung 4-11: Gasverbrauch für Parameter I mit unterschiedlichen Rücklauf- temperaturen	49
Abbildung 4-12: Gasverbrauch für Parameter II mit unterschiedlichen Rücklauf- temperaturen	50
Abbildung 4-13: Gasverbrauch für Parameter I bei 2°C und 5°C höherer Sole- Vorlauftemperatur.....	51

Abbildung 4-14: Gasverbrauch für Parameter II bei 2°C und 5°C höherer Sole-Vorlauftemperatur.....	51
Abbildung 4-15: Speicherverluste in [KWh] bei unterschiedlichen Speichergrößen über die Zeit in Sekunden.....	53
Abbildung 4-16: Kollektorverluste in [W] (oben) und Kollektortemperaturen in [°C] (unten) über die Zeit in [s].....	54
Abbildung 4-17: Verlauf der Temperatur im Speicher über die Höhe zu verschiedenen Zeitpunkten.....	55
Abbildung 4-18: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Vorlauftemperatur am Solarkollektor.....	56
Abbildung 5-1: Standorte der Feldtestanlagen der Gaswärmepumpe zeoTHERM der Firma Vaillant (Quelle: ERG)	57
Abbildung 5-2: Feldtestanlage GWP 1	59
Abbildung 5-3: Feldtestanlage GWP 23	60
Abbildung 5-4: Einflussgrößen für das System Gaswärmepumpe.....	60
Abbildung 5-5: Anlagenschema (Quelle: IGWP).....	61
Abbildung 5-6: Schematische Systemdarstellung.....	63
Abbildung 5-7: Standorte der GWP auf der Jahresstrahlungskarte	66
Abbildung 5-8: Summe der Energien und Verläufe der Temperaturen über die Periode; GWP 11.....	67
Abbildung 5-9: Visualisierung zum Anlagennutzungsgrad „Nutz_HG_Solar_oS“	69
Abbildung 5-10: Tageswerte der Anlagennutzungsgrade "Nutz_HG_Solar_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie	70
Abbildung 5-11: Visualisierung zum Systemnutzungsgrad „Nutz_Sys_Heiz_WW_oS“ .	71
Abbildung 5-12: Tageswerte der Systemnutzungsgrade "Nutz_Sys_Heiz_WW_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie	71
Abbildung 5-13: Visualisierung zum Heizgerätenutzungsgrad „Nutz_HG_oS“	72
Abbildung 5-14: Tageswerte der Heizgerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie	73

Abbildung 5-15: Tageswerte der Heizgerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie (vergrößert)	74
Abbildung 5-16: Tageswerte der Anlagennutzungsgrade "Nutz_HG_Solar_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie — Anlagen mit drei Solarkollektoren	75
Abbildung 5-17: Tageswerte der Anlagennutzungsgrade "Nutz_HG_Solar_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie —Anlagen mit zwei Solar- und einem Luftkollektor —... ..	75
Abbildung 5-18: Gegenüberstellung der Feldtestdaten und der Erwartungswerte.....	77
Abbildung 6-1: Versuchshaus mit Solarkollektoren im Hintergrund und Trockenkühler zum gleichzeitigen Betrieb mehrerer Anlagen. Vor dem Haus sind 3 Erdkollektoren für Wärmepumpen installiert.	81
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der Anbindung von Heizungsanlagen im Versuchshaus an den Trockenkühler	81
Abbildung 6-3: Vor dem Versuchshaus verlegte Flächenkollektoren und Hydraulik zur Umschaltung der Flächenkollektoren.....	82
Abbildung 6-4: Solarthermiemodule für die Brennwert plus Solar- und Gaswärmepumpenanlage.....	82
Abbildung 6-5: Aufstellungssituation im Ausstellungsraum (schematisch), nicht eingezeichnet ist die Bosch-Wärmepumpe.....	83
Abbildung 6-6: Visualisierung der Zeolith-Gaswärmepumpen-Technik im Versuchshaus.....	84
Abbildung 6-7: KWK-Geräte (links), Wärmepumpen, Brennwertkessel und Brennstoffzelle (rechts).....	85
Abbildung 6-8: Installationsstationen und Speicher in den Kellerräumen.....	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Messpunkte nach VDI 4650-2.....	31
Tabelle 3-2: Soletemperaturen in Abhängigkeit der Normaußentemperatur nach VDI 4650-2	32
Tabelle 3-3: Soletemperatur für die Versuchsstandmessungen nach VDI 4650-2	32
Tabelle 3-4: Gesamtkennzahlen nach VDI 4650-2	37
Tabelle 5: Übersicht der Gerätestandorte.....	57
Tabelle 6: Messdatenerfassung und Umrüstungszeitpunkte	62
Tabelle 7: Zeichen und Operatoren	62
Tabelle 8: Nomenklatur Nutzungsgrade und Berechnungsgrundlagen	63
Tabelle 9: Einflussgrößen und Anlagenparameter.....	64
Tabelle 10: Einflussgrößen und Anlagenparameter.....	65
Tabelle 11: Matrix Nutz_Sys_Heiz_WW_oS.....	78
Tabelle 12: Matrix beheizte Wohnfläche.....	78
Tabelle 13: Matrix Außentemperatur	78
Tabelle 14: Matrix bereinigter Heizwärmebedarf absolut.....	78
Tabelle 15: Matrix bereinigter Heizwärmebedarf spezifisch.....	79
Tabelle 16: Matrix solare Strahlung	79
Tabelle 17: Matrix Brauchwasserenergie.....	79
Tabelle 7-1: Eignung der zeoTHERM in Abhängigkeit von Solarkollektortyp und Heizkreistemperaturen.....	86

1 Einleitung

In Deutschland hat die Energieversorgung von Gebäuden mit den größten Anteil am Primärenergieverbrauch (ca. 40 %). Die Raumwärmebereitstellung stellt mit 78 % den weitaus größten Anteil am gesamten Energieverbrauch und damit auch das größte Reduktionspotential dar. Die grundlegenden Ziele für die Zukunft sind mit einer Reduktion der Treibhausgasemissionen (hier CO₂) um 40 % (Basis 1990), dem Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeerzeugung von 14 % bis ins Jahr 2050 durch die Bundesregierung vorgegeben. Mit dem bereits in 2007 verabschiedeten integrierten Energie- und Klimaschutzprogramm (IEKP) hat die Bundesregierung die grundlegenden Ziele bis 2020 vorgegeben.

Gaswärmepumpen stellen eine hocheffiziente Alternative für die Gebäudebeheizung dar, da diese Systeme hohe Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade aufweisen und zudem erneuerbare Energien in Form von oberflächennaher Geothermie und damit solarer Strahlung einkoppeln. Die Systeme benötigen dazu einen Kollektor, der diese Umweltwärme in das System überträgt und damit für den Wärmepumpenprozess zur Verfügung stellt. Die Kollektoren können in das Erdreich entweder als Tiefenbohrung oder als Flächenkollektor eingebracht werden. Damit ist allerdings ein nicht zu unterschätzender Bauaufwand verbunden – vorausgesetzt es sind überhaupt die Möglichkeiten dazu durch z. B. genügend große Gartenfläche gegeben. Als Alternative gibt es Luftkollektoren, die ohne größeren Aufwand installiert werden können. Allerdings kann die Lufttemperatur im Winter soweit absinken, dass die Effizienz nicht mehr größer ist als bei anderen Heizsystemen.

Die Energie, die schlussendlich aus dem Boden bzw. aus der Luft entnommen wird, ist gespeicherte Sonnenenergie. Eine direkte Einbindung der Sonnenenergie erhöht die Effizienz der Gaswärmepumpe noch weiter. Solarthermische Anlagen sind schon seit Jahren in Betrieb, so dass hier keine grundlegenden technischen Herausforderungen zu meistern sind. Diese werden zurzeit überwiegend für die Warmwasserbereitstellung bzw. Heizungsunterstützung bei Kombinationen aus Brennwertkesseln und Solarthermiekollektoren eingesetzt. Die Kombination von Solarkollektoren mit einer Wärmepumpe stellt eine technologisch interessante Alternative dar, die es ermöglicht auch schon bei geringem Temperaturniveau Umweltwärme für die Heizung über den Wärmepumpenprozess zu nutzen, solare Warmwasserbereitung und solare Direktheizung zu integrieren.

Für das Projekt wurde von der Fa. Vaillant ein System bestehend aus einer Adsorptionswärmepumpe (Vaillant zeoTERM) mit 300 l Trinkwarmwasserspeicher und 3 Solarflachkollektoren bereitgestellt. Im Labor wurden Wärmepumpen zweier Generationen nach der VDI-Richtlinie 4650-2 vermessen und das Gesamtsystem anschließend im Demonstrationszentrum des GWI zum weiteren Betrieb installiert.

Des Weiteren wurden Feldtestdaten aus der Initiative Gaswärmepumpe (IGWP) analysiert und eine Simulation der Wärmepumpe zur Parametervariation mit dem Programmpaket Modelica/Dymola durchgeführt.

2 Systembeschreibung

Eine Wärmepumpe „hebt“ Energie von einem niedrigen – zu Heizzwecken zunächst nicht nutzbaren – Temperaturniveau (Umweltwärmequelle) durch den Einsatz von Antriebsenergie (mechanischer bzw. „thermischer Verdichter“) auf ein höheres Niveau und kann so zur Beheizung eingesetzt werden. Technisch wird dies über ein Kältemittel realisiert, welches in einem Verdampfer durch die Umweltwärme verdampft, anschließend verdichtet und in einem Kondensator kondensiert wird. Die Wärme aus der Kondensation kann dann zu Beheizungszwecken genutzt werden. Eine anschließende Entspannung führt das Medium wieder in seinen Ausgangszustand zurück. Dabei wird in der Wärmepumpe entweder ein Medium mit niedrigem Siedepunkt eingesetzt oder der Siedepunkt wird durch einen gegenüber Umgebung kleineren Druck abgesenkt. Technologisch werden bei Gaswärmepumpen 3 verschiedene Prinzipien unterschieden: Die gasmotorisch betriebene Kompressionswärmepumpe und die Absorptions- und Adsorptionswärmepumpen. Die Vaillant zeoTERM WP gehört zu den Adsorptionswärmepumpen.

2.1 Beschreibung der Systemparameter

Entscheidend für die Effizienz einer Wärmepumpe ist die zuzuführende Energie, die nötig ist, um das Temperaturniveau der Umweltwärmequelle auf das Temperaturniveau des Heiznetzes zu heben (Verdichterarbeit bzw. Verdichterleistung).

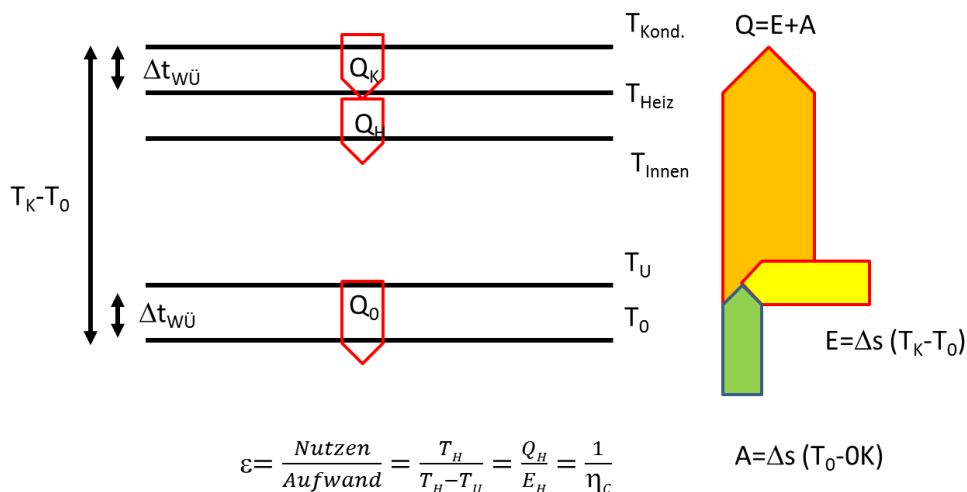


Abbildung 2-1: Temperaturverhältnisse in einem Wärmepumpenprozess

Die Energie, die eingesetzt werden muss, um die Umweltwärme nutzbar zu machen, ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen T_H (Nutz/Heiztemperatur) und T_U (Umweltwärmequellentemperatur). T_K ist die Temperatur im Gerätekreis (Kondensator), durch den Wärmeübergang zum Heizwärmenetz kann diese Temperatur über T_H liegen. T_U ist die Temperatur der Umweltwärmequelle, auch hier kann durch einen Wärmetauscher ein Temperaturunterschied zwischen T_U und T_0 (Temperatur am Verdampfer) vorliegen – gleichbedeutend mit Abweichungen vom reversiblen Idealprozess. Das nur von Temperaturen abhängige Verhältnis der Heizwärme Q zur eingesetzten Energie E wird als die Carnot'sche Leistungszahl bezeichnet – entsprechend dem reziproken Carnotfaktor η_c . Die nutzbare Wärme ist um die Leistungszahl – diese Begrifflichkeit wird bei Elektrowärmepumpen verwendet – größer als die eingesetzte Energie. Für die Leistungszahl gilt:

$$\epsilon_{WP} = \frac{T_H}{T_H - T_U}$$

mit

T_H = hohe Prozesstemperatur (Heizungsvorlauf) und

T_U = niedrige Prozesstemperatur (Umweltwärmequellentemperatur).

Somit ist der Zusammenhang der Systemtemperaturen und der Leistungszahl gegeben. Die Temperaturdifferenz zwischen T_H und T_U wird als Temperaturspreizung im Wärmepumpenprozess bezeichnet. Die Leistungszahl steigt bei Reduktion der Temperaturspreizung im Wärmepumpenprozess, also bei einer Absenkung der

hohen Prozesstemperatur (Heizungsvorlauf) ebenso wie bei einer Erhöhung der niedrigen Prozesstemperatur (Umweltwärmequellentemperatur).

Zur Beurteilung von gasbetriebenen Wärmepumpen wird die so genannte Heizzahl bzw. der Nutzungsgrad herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass die Heizzahl analog zur Leistungszahl der Elektrowärmepumpe ist. Sie beschreibt das Verhältnis von Nutzenergie zu der gesamten eingesetzten Energie, hierbei wird sowohl die eingesetzte Gasenergie als auch die elektrische Hilfsenergie betrachtet. Hierbei ist zu beachten, dass bei einem elektisch betriebenen Verdichter die zugeführte Energie thermodynamisch hochwertiger (100 % Exergie) und zunächst im Kraftwerk mit einem thermischen Wirkungsgrad von ca. 0,37 im Mittel erzeugt werden muss, während bei der thermischen Verdichtung ein kleinerer Exergieanteil der Wärme oder auch Abwärme genutzt wird. Es wird demnach weniger „Arbeitsfähigkeit“ für den Prozess benötigt. Aus diesen Gründen sind die die Heizzahlen zwangsläufig kleiner als Leistungszahlen. Der Nutzungsgrad ist analog zum Nutzungsgrad eines herkömmlichen Gasheizgerätes und bezieht nur die eingesetzte Gasenergie mit ein. Die Heizzahl ist wie folgt definiert:

$$\zeta_h = \frac{P}{Q+P_{el}} \text{ mit}$$

ζ_h (Heizzahl), P (Wärmeleistung), Q (Brennstoffleistung (heizwertbezogen)) und P_{el} (el. Leistungsaufnahme). Der Nutzungsgrad folgt zu

$$\eta_h = \frac{P}{Q}$$

Der Nutzungsgrad ist von mehreren Faktoren abhängig. Ein Heizkreis mit niedrigen Vor- bzw. Rücklauftemperaturen begünstigt den Einsatz einer Wärmepumpe, da die Umweltwärme mit weniger extern zugeführter Energie auf das nutzbare Niveau gehoben werden kann. Die Umweltwärme liefert immer nur einen bestimmten Betrag, sollte das Heizsystem hohe Temperaturen benötigen, um die Räume zu heizen, dann steigt der Betrag externer Energie und das Verhältnis zwischen Umweltwärme und extern zugeführter Energie verschlechtert sich.

Entscheidend für die Menge an Umweltwärme, die genutzt werden kann, ist die Soletemperatur und damit die Temperatur der Umweltwärmequelle. Die Parameter werden im Nachfolgenden näher betrachtet und mittels einer Simulation wird der Einfluss der Einzelparameter auf den Nutzungsgrad untersucht.

Wesentlich für einen effizienten Betrieb sind nicht nur die Momentanwerte von Heizzahl bzw. Nutzungsgrad, sondern die Jahreswerte. Dazu sind über das Jahr gesehen relativ konstante Wärmequellentemperaturen erforderlich.

2.1.1 Systemparameter Wärmequelle

Wichtig für die effiziente Nutzung von Umweltwärmequellen ist die Temperatur der Wärmequelle. Je höher die Temperatur ist, umso mehr Umweltwärme kann prinzipiell eingekoppelt werden. Es ist aber zu beachten, dass ein Wärmepumpenprozess in der Praxis nur eine bestimmte Energiemenge nutzbar machen kann. Außerdem muss bei einer hohen Umweltwärmtemperatur weniger Energie aufgewendet werden, damit sie nutzbar wird. Das Verhältnis von extern eingesetzter Energie zu eingekoppelter Umweltwärme verschiebt sich zu Gunsten der Umweltwärme und dadurch steigt direkt der Nutzungsgrad.

Für den Jahresnutzungsgrad ist der Verlauf der Heizquellentemperatur wichtig. Eine hohe Quelltemperatur die nicht genutzt werden kann, weil kein/kaum Heizwärmebedarf vorhanden ist, erhöht den Wirkungsgrad nicht. Bei gleichzeitig niedrigen Umweltwärmequellentemperaturen in der Heizperiode ergibt sich ein niedriger Wirkungsgrad, obwohl die mittlere Jahrestemperatur einen guten Wert erreicht. Unter Umständen kann eine niedrigere mittlere Jahrestemperatur, bei höheren Umweltwärmequellentemperaturen in der Heizperiode, einen höheren Wirkungsgrad erzielen. Beachtet werden muss auch die Wärmeübertragerfläche (Kollektor o. Ä.) auf Seiten der Wärmequelle. Bei einer zu kleinen Fläche kann nicht genug Umweltwärme in das System eingekoppelt werden und der Nutzungsgrad würde nicht den maximal möglichen Wert erreichen. Wird die Wärmeübertragerfläche zu groß dimensioniert, dann verbessert sich der Nutzungsgrad trotzdem nicht über einen bestimmten Wert, da der Wärmepumpenprozess nur eine bestimmte Menge an Umweltenergie aufnehmen kann. Hierbei ist auch zu beachten, dass die Wärmequelle ausreichend Möglichkeiten hat, um sich zu regenerieren, sprich die entnommene Wärme wieder nachströmen kann. Ökonomisch gesehen, würde der Nutzen der Wärmepumpe durch die höheren Kosten abnehmen, da die eingesparten Brennstoffkosten nicht im Verhältnis zu den Investitionskosten stehen.

Zu beachten ist auch die Erschließbarkeit der Wärmequelle. Die Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle verspricht gute Wirkungsgrade, allerdings ist ein Bohrung immer mit Auflagen verbunden. In vielen Gebieten ist eine solche Bohrung auf Grund der gesetzlichen Bestimmungen nicht möglich.

Für die technische Umsetzung ist der Siedepunkt des Kältemittels im Verdampfer entscheidend dafür, welches Temperaturniveau aus der Umweltwärmequelle einge-

koppelt werden kann. Die meisten Systeme nutzen ein Kältemittel mit einem niedrigen Siedepunkt, wie z. B. Ammoniak. Dabei ist zu beachten, dass durch die u. U. vorliegende Toxizität des Kältemittels unter Umständen zusätzliche Anforderungen an Konstruktion und Aufstellort zu erfüllen sind.

Mit der Vaillant zeoTERM ist auch ein System erhältlich, das mit Wasser als Kältemittel arbeiten. Dabei ist es erforderlich, den Druck im Verdampferkreislauf zu senken, um die Verdampfung auch bei geringen Temperaturen gewährleisten zu können. Die verfügbaren Wärmepumpen arbeiten im Vakuum.

2.1.2 Systemparameter Heizkreis

Entscheidend für die Effizienz des Gesamtsystems ist auch die Vor- und Rücklauf-temperatur des Heizkreises. Ideal für eine Wärmepumpe ist eine Fußbodenheizung oder ein Heizsystem mit vergleichbar niedrigen Temperaturen. Je niedriger die geforderten Temperaturen sind, umso weniger externe Energie muss aufwendet werden, um die Umweltwärme auf ein nutzbares Niveau zu transportieren. Bei niedrigen Heizkreistemperaturen wird insgesamt weniger Energie benötigt, der Eintrag der Umweltwärme bleibt jedoch bestehen und das Verhältnis zwischen Umweltwärme und externe Energie verbessert sich zu Gunsten der Umweltwärme, was wiederum einen direkten Anstieg des Nutzungsgrades zur Folge hat.

Die Heizkreistemperatur ist abhängig von den eingesetzten Heizflächen, die wiederum abhängig vom Heizwärmebedarf des Hauses sind. In einem nicht gedämmten Haus mit einem hohen Heizwärmebedarf ist eine Fußbodenheizung nur selten vorzufinden. Am besten geeignet für eine Heizungsanlage mit einer Wärmepumpe sind daher gut gedämmte bzw. sanierte Gebäude mit einem geringen Heizwärmebedarf und großen Heizflächen, so dass die Wärmepumpe mit geringen Vorlauftemperaturen und einer geringen Last laufen kann.

Wird auch die Warmwasserbereitung mit einbezogen, dann sinkt der Nutzungsgrad üblicherweise, da die Warmwasserbereitung höhere Temperaturen erfordert, als die normale Raumheizung. Nur wenige Wärmepumpen können die für die Warmwasserbereitung notwendigen hohen Vorlauftemperaturen über den Wärmepumpenprozess erzeugen. Während jedoch bei Elektrowärmepumpen meistens ein elektrischer Heizstab verwendet wird, kann bei einer Gaswärmepumpe auf ein internes Gasbrennwertgerät zurückgegriffen werden, welches primärenergetisch effizienter arbeitet. Je nach Anteil des Warmwassers am gesamten Energiebedarf des Hauses schlägt es sich stärker oder schwächer in der Berechnung des Nutzungsgrades nieder. Dabei wirkt sich sowohl die verbrauchte Warmwassermenge als auch die bereitgestellte Temperatur aus. Die Wassertemperatur aber liegt in fast jedem Haushalt bei mindes-

tens 55°C und somit übt die bereitgestellte Warmwassermenge einen größeren Einfluss auf die Gesamteffizienz aus. Eine zusätzliche Nutzung des Solarkollektors für die Warmwasserbereitung, wirkt sich positiv auf den Systemjahresnutzungsgrad aus.

2.1.3 Systemparameter Nutzerverhalten

Darüber hinaus ist das Nutzerverhalten für die Bestimmung des Jahresnutzungsgrades bzw. der Jahresheizzahl sehr wichtig. Je nach Wärmebedarf und Warmwasserverbrauch können die Werte durch das Nutzerverhalten sehr unterschiedlich ausfallen. Dabei gilt, dass eine richtig dimensionierte Anlage die Effizienz im Betrieb steigern lässt. Bei einem zu hohen Verbrauch kann das Gerät im Wärmepumpenbetrieb unter Umständen nicht genug Leistung liefern und die Anlage im Brennwertbetrieb effizienter betrieben werden kann. Eine Fußbodenheizung reagiert thermisch „träger“ als Radiatoren. In einer Fußbodenheizung ist ein größeres Volumen im Umlauf als in Radiatoren. Als Empfehlung sollte der Nutzer dies beachten und vorausschauend heizen. Weiterhin ist für den Nutzungsgrad der Warmwasserverbrauch entscheidend. Bei Temperaturen von 55°C findet kaum ein Wärmepumpenbetrieb statt und auch eine mögliche Nutzung des Brennwerteffektes ist gering. Somit können weder Brennwertheizgerät noch Wärmepumpe die maximal mögliche Effizienz verwirklichen. Je größer der Anteil der Warmwasserbereitung an dem gesamten Energiebedarf des Hauses ist, umso geringer fällt der Anteil des Wärmepumpenbetriebes am Gesamtenergiebedarf aus. Der übrige Anteil muss durch ein Gasbrennwertgerät mit schlechterem Jahresnutzungsgrad bereitgestellt werden. Dadurch verschlechtert sich der Gesamtjahresnutzungsgrad.

Die Einstellung der Heizungsanlage für den persönlichen Komfort wirkt sich direkt auf die benötigten Heizkreistemperaturen aus. Unterschiedliches Wärmeempfinden führt zu unterschiedlichen gewünschten Raumtemperaturen. Während manche Nutzer eine Raumtemperatur von ~19°C als hinreichend empfinden, benötigen andere Nutzer Raumtemperaturen von ~22°C, um sich wohl zu fühlen. Diese Temperaturunterschiede schlagen sich direkt in den erforderlichen Heizkreistemperaturen und somit auch dem Wirkungsgrad nieder. Bei vergleichbaren Wohnungen kann es nachweislich durch die individuelle Betriebsweise zu einer Abweichung von bis zu 50 % im Energieverbrauch kommen [IWU03]. (Siehe Abbildung 2-2).

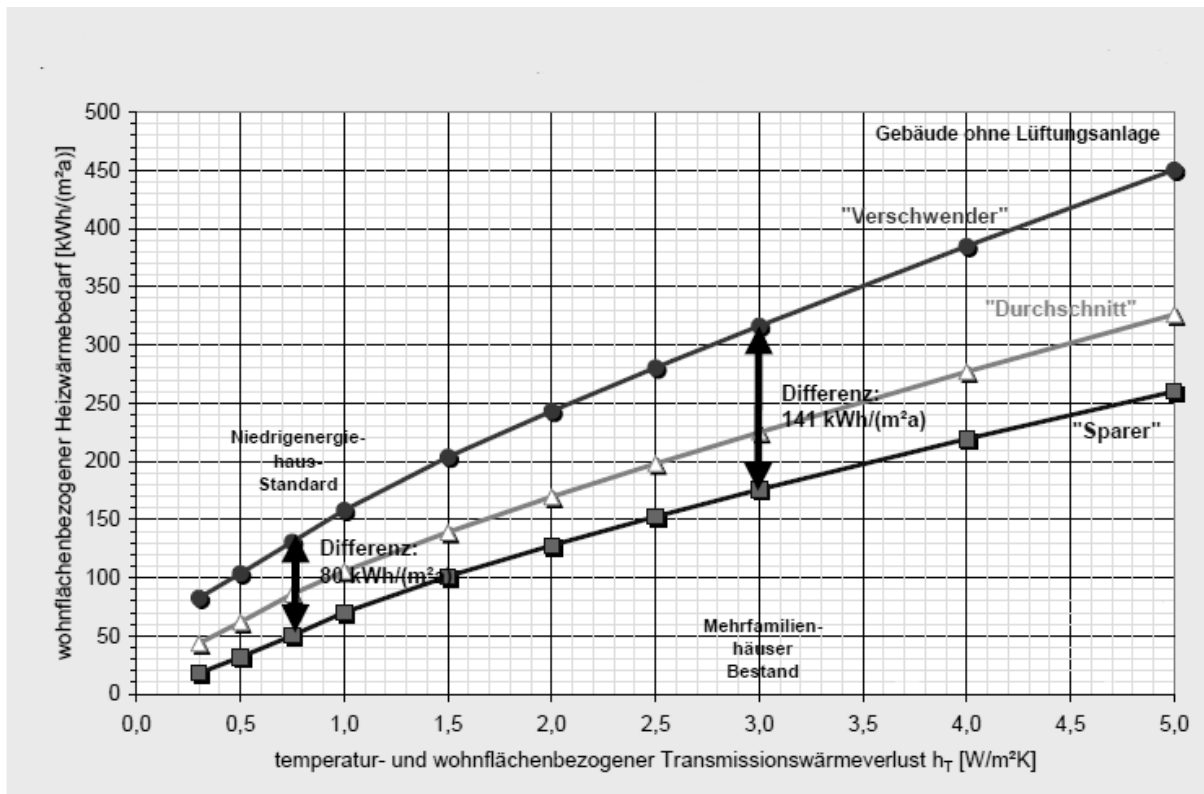


Abbildung 2-2: Vergleich unterschiedlicher Nutzertypen in Gebäuden ohne Lüftungsanlage [IWU03]

Außerdem kann durch eine schlechte Dämmung ein konstanter Luftzug in den Innenräumen herrschen, der eine subjektiv tiefere Temperatur vermittelt. Dadurch wird, um eine persönlich als komfortabel empfundene Raumtemperatur zu erreichen, die Heizkreistemperatur erhöht. Die Heizungsanlage wird mit höheren Temperaturen und somit einer niedrigeren Effizienz als nötig betrieben.

Die Art und Weise der Lüftung schlägt sich im Heizenergiebedarf nieder. Energetisch günstiger ist die kurze Stoßlüftung, bei der der Luftaustausch in kurzer Zeit vollzogen wird. Ein „verschwenderischer“ Nutzer kann einen bis zu dreifach höheren Luftwechsel als ein sparsamer Nutzer erreichen.

2.1.4 Systemparameter Hilfsenergie

Neben dem eingesetzten Gas wird auch der benötigte Strom bei der Berechnung der Heizzahl mit betrachtet. Strom wird fast ausschließlich für die Pumpen im System benötigt. Darunter fallen sowohl die geräteinternen Pumpen, um das Wärmeträgermedium zirkulieren zu lassen, als auch Pumpen für den Kollektorkreis, um das Wärmeträgermedium zirkulieren zu lassen. Durch neue Hocheffizienzpumpen kann der Beitrag zum Gesamtenergieverbrauch deutlich

verringert werden. Weiterhin kann durch eine Regelung der Stromverbrauch gesenkt werden. Laufen die Pumpen nicht durchgehend, sondern in einem intermittierenden Betrieb, kann die elektrische Leistungsaufnahme noch weiter gesenkt werden.

2.1.5 Systemparameter Wärmespeicher

Für die Betrachtung des Gesamtsystems und der daraus folgenden Effizienzabschätzung ist auch eine Betrachtung des eingesetzten Speichers notwendig. Um einen Trinkwasserkomfort gewährleisten zu können, muss ein Trinkwasserspeicher auf einem bestimmten Temperaturniveau gehalten werden. Dabei treten Stillstandsverluste auf. Ein Speicher kühlt täglich um etwa ein bis fünf Kelvin ab. Hierbei kann bei einem üblichen 300 l Trinkwasserspeicher täglich ein Verlust von bis zu einer Kilowattstunde auftreten.

Eine Bauvariante des Trinkwasserspeichers ist der Schichtenspeicher. In einem Schichtenspeicher wird nicht der gesamte Speicher gleichmäßig erwärmt, sondern auf Grund der Dichteunterschiede liegen Schichten mit verschiedenen Temperaturniveaus vor. Durch spezielle Einbauten wird verhindert, dass durch das ein/ausströmende Wasser sich die Schichten miteinander vermischen. So ist es möglich, immer eine bestimmte Menge an Warmwasser zur Verfügung zu haben, ohne den gesamten Speicherinhalt auf hohen Temperaturen zu halten. Der Schichtenspeicher bietet bei gleichem Volumen einen höheren Warmwasserkomfort als herkömmliche Speicher. Bei Schichtenspeichern kann die Speichergröße kleiner dimensioniert werden. Durch die Schichtenbildung kann der Speicherinhalt nur teilweise erhitzt werden, wodurch Wasser mit der gewünschten Temperatur schneller wieder zur Verfügung steht.

Die zweite weit verbreitete Speicherart ist ein Pufferspeicher für den Heizkreis. Pufferspeicher dienen dazu, um Leistungsschwankungen zu glätten und einem Heizgerät einen konstanten Betrieb zu ermöglichen. Gaswärmepumpen profitieren von einem Teillastbetrieb, weil sie teilweise in niedrigen Laststufen mit einem höheren Wirkungsgrad arbeiten. Ein Pufferspeicher ist selten in Heizungsanlagen mit Gaswärmepumpen verbaut. Sinnvoll dagegen ist der Einsatz eines Pufferspeichers in Heizungsanlagen mit Elektrowärmepumpen. Hierbei nutzt die Elektrowärmepumpe nachts den billigen Strom und erzeugt Heizwärme, die im Speicher gepuffert wird und tagsüber nach Bedarf angefordert werden kann.

Eine Kombination aus beiden Typen ist der sogenannte Kombispeicher. Diesen gibt es als Schichtenspeicher, wobei die oberste Schicht für die Brauchwassererwärmung 'reserviert' ist und der Rest für die Heizwärmebereitstellung. Dabei ist allerdings zusätzlich ein zwischengeschalteter Wärmeübertrager notwendig. Alternativ dazu gibt es Tank-im-Tank-Speicher, dabei wird ein kleinerer Wassertank für das Brauchwasser in einen größeren Tank installiert. Das Brauchwasser wird durch das umgebende

Heizungswasser aufgewärmt. Wichtig hierbei ist eine große Ausdehnung des Brauchwasserspeichers nach unten. Dadurch wird eine große Temperaturdifferenz zwischen nachströmendem Kaltwasser und Heizungswasser erreicht und der Wärmeübergang begünstigt.

2.1.6 Regeneration

Bei dem ganzjährigen Betrieb einer Wärmepumpe mit Erdkollektor muss auf die Regeneration des Bodens geachtet werden. Die im Winter entzogene Wärmeenergie muss im Sommer wieder hergestellt werden. Dies geschieht durch nachströmende Wärme aus dem umschließenden Erdreich, versickerndes Regenwasser oder Sonneneinstrahlung. Ansonsten kann der Boden vereisen und nicht mehr optimal als Wärmequelle dienen. Diese Regeneration kann mit Hilfe eines im System eingebundenen Solarkollektors oder durch einen Kühlbetrieb im Sommer unterstützt werden. Im Sommer oder auch an milden Frühlings-/Herbsttagen wird die abzuführende Wärme aus dem Wohnraum oder die nicht genutzte solare Energie in den Boden eingespeist und so die Regeneration beschleunigt. Diese Systemvarianten sind bisher selten zu finden und werden wahrscheinlich auch aufgrund des zusätzlichen Aufwands in der hydraulischen Verschaltung und Regelung in Zukunft nicht vermehrt geplant und installiert. Da hier die Solarthermie nicht primär als Umweltwärmequelle dient, werden solche nicht weiter berücksichtigt.

2.2 Die Adsorptionswärmepumpe

Bei der Adsorptionswärmepumpe wird die Umweltwärme mit Hilfe eines Adsorptionsprozesses für das Heizen nutzbar gemacht (Siehe Abbildung 2-3). Die Medien/Stoffe, die in diesem Wärmepumpenprozess eingesetzt werden, sind Wasser als Kältemittel und Zeolith als Adsorbens. Damit Wasser bei Umgebungstemperaturen verdampft werden kann, wird der Prozess im Unterdruck durchgeführt. Das Kältemittel wird durch die Umweltwärme verdampft und dann von einem Adsorbens aufgenommen. Dabei entsteht Adsorptionswärme, die zum Heizen genutzt werden kann. Zur Regeneration des Adsorbens wird die Wärme durch ein Gasbrennwertgerät erzeugt. Bei diesem Prozess wird Desorptionswärme und Energie aus dem Brennwerteffekt in das Heiznetz eingekoppelt. Nach der Desorption liegt das ausgetriebene Wasser im dampfförmigen Zustand vor und wird in einem Kondensator kondensiert. Die dabei entstehende Kondensationswärme wird an das Heizungswasser übertragen. Das Wasser wird in einen Verdampfer geleitet, wo durch Einkopplung von Umweltwärme das Kältemittel wieder dampfförmig wird und

der Kreislauf kann von neuem beginnen. Neben dem Nutzen für den Wärmepumpenprozess wird die solare Wärme auch für die solare Heizungsunterstützung und die solare Warmwasserbereitung genutzt. Bei der solaren Heizungsunterstützung wird durch Solarthermie die Rücklauftemperatur angehoben, so dass das Heizgerät weniger Energie braucht, um die erforderliche Vorlauftemperatur zu erreichen. Die solare Warmwasserbereitung erfolgt bei höheren Kollektortemperaturen und der Solarkollektor beheizt über einen Wärmetauscher direkt den Trinkwasserspeicher.

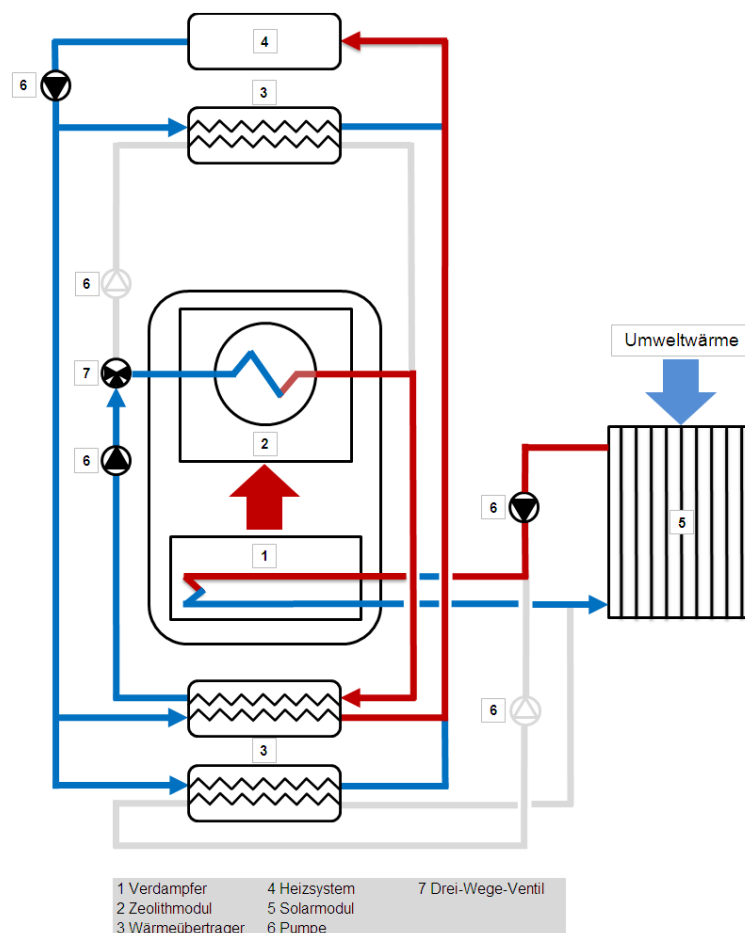


Abbildung 2-3: Schema einer Adsorptionswärmepumpe [IELe09]

Eine weitere Eigenschaft, die die Adsorptionswärmepumpe von den anderen Techniken unterscheidet, ist, dass der Prozess in Zyklen von Ab- und Desorptionsprozessen abläuft.

Mit einer Adsorptionswärmepumpe wird eine Heizzahl von ca. 1,3 erreicht. Weitere Systemoptimierungen sind noch zu erwarten.

2.3 Die Vaillant zeoTHERM Wärmepumpe

Für das Projekt wurde von der Firma Vaillant die Adsorptionsgaswärmepumpe zeoTHERM zur Verfügung gestellt (Abbildung 2-4). Das Komplettsystem besteht aus



Abbildung 2-4: Gaswärmepumpe zeoTHERM [Val]

der zeoTHERM, drei Solarkollektoren und einem 300l Trinkwasserspeicher. Die Solarkollektoren sind inzwischen zum einen als Flachkollektoren und zum anderen als Röhrenkollektoren verfügbar. Zum Zeitpunkt der Bereitstellung war nur die Version mit Flachkollektoren verfügbar, so dass diese Version am GWI installiert ist. Von der Kombination von Luft- und Solarkollektor wurde wieder Abstand genommen, da die Sole im Solarkollektor unter realen Bedingungen fast nie kälter als die Umgebungsluft sein wird. Selbst bei solch einem Fall wird die Temperatur des Solar-kollektors nur unwesentlich unter der Lufttemperatur liegen, dies würde aber durch die schon

bei geringer Sonneneinstrahlung höheren Temperaturen mehr als kompensiert werden.

Die Anlage läuft in vier vorgegebenen Parametern. Die Parameter I, II und III nutzen den Wärmepumpenprozess um Heizwärme bereitzustellen. Parameter IV ist ein reiner Brennerbetrieb. Parameter I hat die längsten Adsorptions- und Desorptionsphasen, der Brenner läuft nur mit kleiner Last und eine Trocknung des Zeolithen dauert länger. Bei der Adsorptionsphase wird der Wasserumsatz soweit wie vertretbar umgesetzt. In Parameter II werden die Brennerbelastung und der interne Volumenstrom erhöht, was zu einem höheren Gasverbrauch und geringeren

Gasumsatz führt. In Parameter III wird eine Kombination aus Wärmepumpenprozess und Brennwertbetrieb. Während der Desorption wird über einen Bypass Heizenergie direkt dem Heiznetz zugeführt, dadurch verlängert sich die Desorption, allerdings kann eine größere Leistung bereitgestellt werden. In Parameter IV wird die Wärmepumpe als Brennwertgerät betrieben und es findet kein Wärmepumpenprozess statt.

Diese Anlagenkombination benötigt keine aufwändige Verlegung von Kollektoren in das Erdreich, aber erreicht durch die Einbindung der Solarthermie höhere Heizzahlen, als ein herkömmlicher Luftkollektor. Weiterhin ist bei einer Installation von Solarkollektoren treten nur mit geringe Schallemissionen auf, da im Gegensatz zu Luftkollektoren keine externen Gebläse genutzt werden.

2.4 Solarthermie

Eine solarthermische Anlage kann mindestens 60 % des Warmwasserbedarfs decken und in der Heizperiode kann die solarthermische Anlage zusätzlich die Heizung unterstützen und damit ca. 20 % der gesamten Wärmebereitstellungskosten einsparen. Bei einer Nutzung von solarer Heizungsunterstützung und solarer Warmwasserbereitung gilt die Faustformel von 4 m² Flachkollektor bzw. 3 m² Röhrenkollektor pro Person. Bei nur solarer Warmwasserbereitung reduziert sich die Fläche auf 1,5 m² (Flachkollektor) bzw. auf 1 m² (Röhrenkollektor) pro Person.

Es können demnach zwei Arten der Kollektoren unterschieden werden. Die Flachkollektoren weisen eine flache, ebene Absorberfläche auf, die zur Sonne ausgerichtet ist. Hinter einer Abdeckung, die meistens aus entspiegeltem Glas besteht, befindet sich der Absorber, der mit einer Wärmeträgerflüssigkeit gefüllt ist. Dieser Absorber ist zudem oft mit einer selektiven Beschichtung versehen, die bewirkt, dass mehr Strahlung aufgenommen wird und gleichzeitig weniger Energie durch Strahlung abgegeben wird. Die Wärmeträgerflüssigkeit durchströmt den Absorber und wird durch die einfallende Sonnenstrahlung erwärmt.

Die zweite übliche Bauweise sind die Vakuumröhrenkollektoren. Hier wird der Wärmeträger nicht durch eine ebene Fläche geleitet sondern durch ein Absorberrohr, welches durch ein entlüftetes Glasrohr verlegt ist. Durch diese doppelte Rohrkonstruktion ist das Absorberrohr besser isoliert und verliert weniger Wärme an die Umgebung. Zusätzlich zu dieser Isolierung steigert eine Parabolspiegelrinne die Strahlungsintensität und somit die Wärmeaufnahme des Systems. Vor allem im Winter liefert dieses System durch die gute Dämmung im Vergleich zu herkömmlichen Flachkollektoren eine größere Warmwasserleistung.

Eine solarthermische Anlage zur Systemunterstützung ist witterungsgeführt. Sobald der Solarregler feststellt, dass Solarenergie genutzt werden kann, wird das Drei-Wege-Ventil so geschaltet, dass der Kombischichtenspeicher durch solar erwärmtes Wasser aufgeheizt wird. In Fällen, in denen keine solare Nutzung möglich ist, wird der Speicher konventionell durch die Gasheizung beheizt.

Solarkollektoren können neben der Trinkwassererwärmung auch für die Heizungsunterstützung oder auch für die Direktheizung genutzt werden. Bei der Heizungsunterstützung wird das solare Warmwasser genutzt, um die Heizungsrücklauftemperatur anzuheben, wodurch das Heizgerät weniger Energie aufbringen muss, um die benötigte Heizkreistemperatur zu erreichen.

Bei einer solaren Direktheizung wird das Heiznetz direkt durch den Solarkollektor gespeist. Dies geschieht immer dann, wenn die Kollektortemperatur über der Vorlauftemperatur des Heiznetzes liegt. Die Direktheizung wird durch große Heizflächen und damit verbundenen niedrigen Systemtemperaturen begünstigt, so ist es möglich, an Tagen mit niedrigem Heizenergiebedarf und hoher Solarstrahlung den Gaseinsatz zu reduzieren.

2.4.1 Einflussgrößen Solarthermie

Die primäre Einflussgröße auf den Ertrag einer Solarthermieanlage ist die solare Strahlung. Diesen Faktor kann man in weitere Teilfaktoren unterteilen. Wie viel Strahlung umgesetzt werden kann, hängt von der Ausrichtung und dem Aufstellwinkel der Solaranlage ab. Je nachdem, ob eine maximale jährliche Ausbeute oder eine maximale temporäre Ausbeute im Sommer gewünscht ist, muss ein anderer Aufstellwinkel gewählt werden. Die typischen Aufstellwinkel liegen zwischen 30° und 45°. Unabhängig davon ist eine Ausrichtung nach Süden empfehlenswert. Anders ausgerichtete Anlagen werden nicht die maximal mögliche Ausbeute liefern können. Es rentieren sich je nach den anderen Einflussfaktoren auch noch Anlagen, die um bis zu 15° versetzt zur Südrichtung installiert werden.

Die Kollektortemperatur hat ebenfalls einen Einfluss auf die nutzbare Wärme. Je höher die Differenz zwischen Kollektortemperatur und Umgebungstemperatur ist, umso mehr Wärme wird wieder an die Umwelt abgegeben. Daraus folgt, dass die Abstrahlverluste im Sommer am höchsten sind. Der Ertrag bleibt natürlich auf Grund der hohen Sonneneinstrahlung im Sommer am höchsten.

Es sollte auch darauf geachtet werden, dass die Kollektorfläche nicht durch z. B. nah stehende Gebäude oder Bäume verschattet ist. Die Verschattung durch Wolken hat einen geringen Einfluss, da die solarthermische Anlage auch mit diffuser Solarstrahlung Wärme erzeugen kann.

2.5 Besondere Einsatzvorteile

Durch das integrierte Brennwertgerät in der Zeolithwärmepumpe ist es möglich bei unzureichender Umweltwärme oder schnell benötigter Heizwärme mit immer noch relativ hohem Wirkungsgrad nachzuheizen. Bei einer Elektrowärmepumpe geschieht dies meistens mit einem elektrisch betriebenen Heizstab. Bei einer Zugrundlegung des deutschen Kraftwerksparkes mit seinem erheblichen Anteil an Kohlekraftwerken bedeutet dies eine stärkere Umweltbelastung als die direkte Verbrennung von Gas.

Eine Gaswärmepumpe verfügt über die gleichen Anschlüsse wie ein normales Gasheizgerät und auch von den Abmessungen ist es ohne weitere Schwierigkeiten möglich, eine alte Gasheizung durch eine neue Gaswärmepumpe zu ersetzen. Des Weiteren können Rohre und Wärmeübertrager und auch das Abgassystem größtenteils übernommen werden. Ein Installateur hat einen ähnlichen Installationsaufwand wie bei einem System mit Brennwertgerät und Solarthermie.

Im Sommer besteht bei einer falschen Systemauslegung die Gefahr, dass ein Solarkollektor überhitzt. Sollte der entstehende Druck nicht aufgefangen werden können, so kann es zu ernststen Schäden an der Anlage führen. Weiterhin kann eine hohe Systemtemperatur zum „Vercracken“ des Propylenglykols führen, wodurch Ablagerungen den Kollektorkreis beeinträchtigen können.

Für Neubauten schreibt das Erneuerbare Energien Wärme Gesetz vor, dass ein bestimmter Prozentsatz des Heizwärmebedarfs aus erneuerbaren Energien gedeckt wird (15 % Solarthermie, bzw. 50 % aus Geothermie/Umweltwärme). Zu den ‚Erneuerbaren Energien‘ zählt auch die Nutzung der Umweltwärme im Wärmepumpenprozess.

Zusätzlich zu einer Effizienzsteigerung der Wärmepumpe kann auch durch die Kombination von Wärmepumpe und Solarkollektor der Wirkungsgrad des Solarkollektors gesteigert werden. Durch die Möglichkeit, die Wärme des Kollektors abzuleiten, sinkt die Temperatur des Kollektors und es wird weniger Wärme an die Umwelt ungenutzt abgegeben, wodurch der Wirkungsgrad des Kollektors steigt.

Für eine Heizungsunterstützung wird eine Temperatur der Kollektorflüssigkeit von sechs Grad über der Rücklauftemperatur benötigt.

Mit einer Gaswärmepumpe kann je nach Bauart und Einsatz eine Vorlauftemperatur von bis zu 60°C erreicht werden. Damit eignet sich das System auch für eine Sanierung von bisher schlecht gedämmten Altbauten und Mehrfamilienhäusern. Es ist auch problemlos möglich, dass die Anforderungen bezüglich der Trinkwasserhygiene erfüllt werden können.

In der Gaswärmepumpe sind relativ wenig bewegliche Teile verbaut, so dass die Anlage einen relativ geringen Wartungsaufwand aufweist. Der Schallpegel einer Gaswärmepumpe ist mit dem eines herkömmlichen Gasheizgerätes vergleichbar.

Durch die direkte Einkopplung von solarer Strahlung sind keine Freiflächen/Gartenflächen oder Sondenbohrungen erforderlich.

2.6 Vergleich mit Brennwert und Solarthermie

Geht man von den theoretischen Wirkungsgraden aus, so liegt der reine Gerätwirkungsgrad einer Gaswärmepumpe um 20 % über dem eines Gasbrennwertgerätes (Abbildung 2-5). Die Systemwirkungsgradsteigerung durch einen Solarkollektor fällt bei beiden System gleich aus, da die Hauptnutzung eines Solarkollektors für die Warmwasserbereitung besteht.

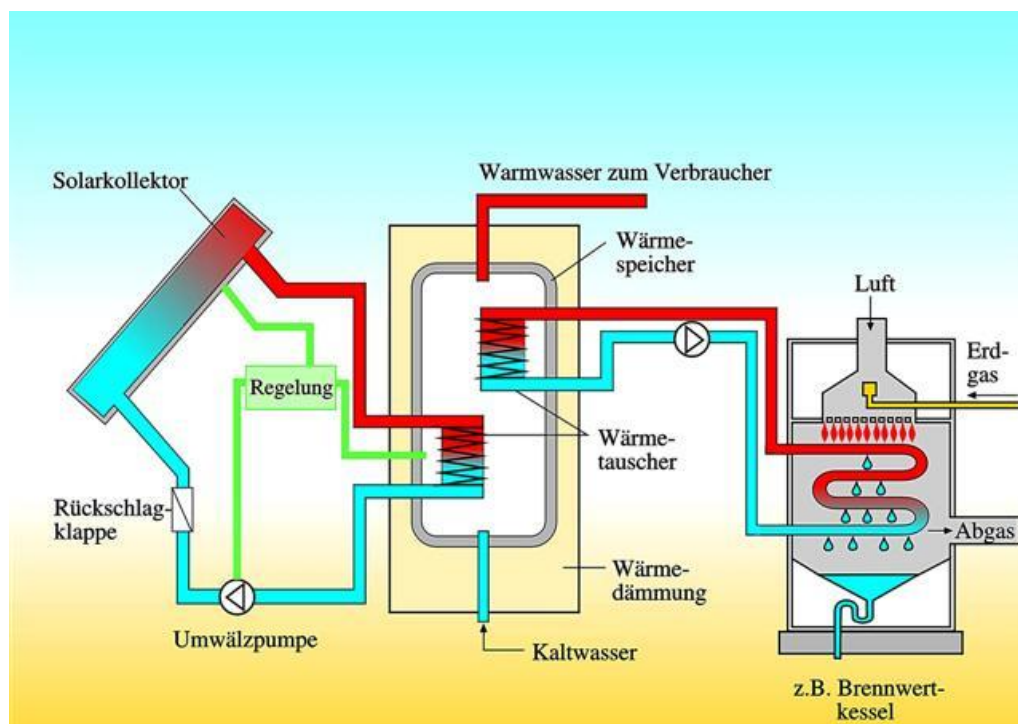


Abbildung 2-5: Schemazeichnung einer Brennwert und Solaranlage [ASUE]

Sowohl das Brennwertgerät als auch die Wärmepumpe können solare Wärme für eine Heizungsunterstützung nutzen. Dabei wird mit solar erwärmtem Wasser der Rücklauf vorgewärmt, so dass weniger Energie benötigt wird, um die erforderliche Vorlauftemperatur zu erreichen. Eine Gaswärmepumpe, die den Solarkollektor als Wärmequelle nutzt, kann die solar gewonnene Energie über ein breiteres Spektrum

einbinden, als es ein reines Brennwertgerät könnte. Für den Wärmepumpenbetrieb reicht niederkalorische Wärme aus, so dass schon geringe Solareinstrahlungen genutzt werden können, die bei einem System bestehend aus Gasbrennwertheizgerät und Solarkollektor ungenutzt bleiben. Bei einer Kombination aus Wärmepumpenbetrieb, solarer Heizungsunterstützung und solarer Trinkwasserbereitung kann fast das komplette, vom Solarkollektor bereitgestellte Wärmespektrum genutzt werden (Siehe Abbildung 2-6).

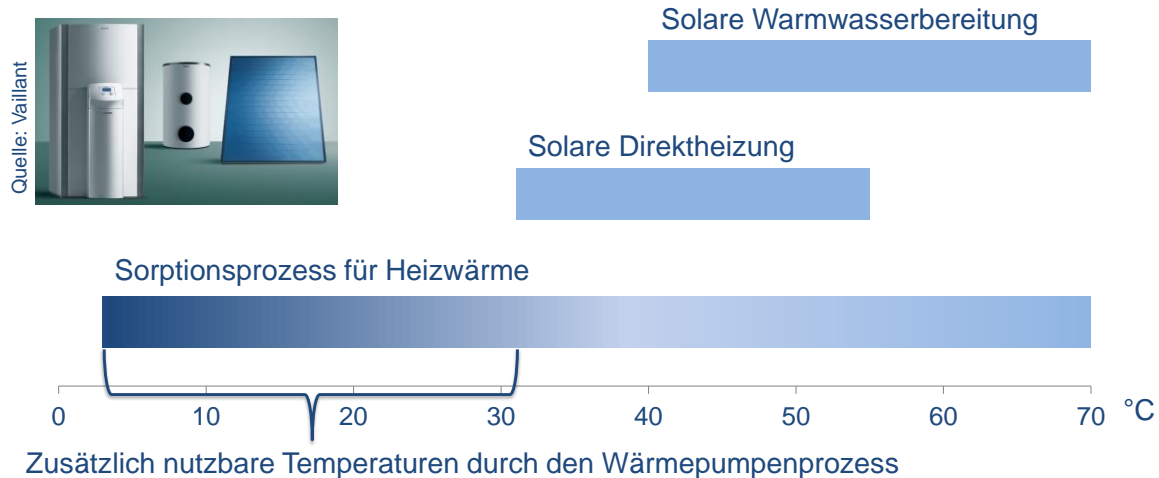


Abbildung 2-6: Nutzbare Kollektortemperatur durch eine Gaswärmepumpe [Val]

Das untersuchte System wird mit einer festgelegten Kollektorfläche ausgeliefert, bei einem Brennwert + Solar System kann der Endkunde die Größe des Kollektors frei wählen. Eine Fläche von ~7 m², wie mit dem zeoTHERM geliefert, reicht aber für die meisten Anwendungen im Einfamilienhaus aus. Unter gewissen Umständen, wie z. B. geringe Globalstrahlung bei hohem Wasserverbrauch, kann aber eine Erhöhung der Kollektorfläche sinnvoll sein. Außerdem kann mit einer größeren Kollektorfläche der Beitrag der solaren Heizungsunterstützung gesteigert werden.

3 Messergebnisse

3.1 Erfahrungen von E.ON Ruhrgas

Im Rahmen einer Kooperation zwischen der Firma Vaillant und E.ON Ruhrgas wurde die Zeolith-Gaswärmepumpe zeoTHERM in unterschiedlichen Konfigurationen untersucht. Diese Zusammenarbeit wurde in die Aktivität der „Initiative Gaswärmepumpe“ überführt.

Bei E.ON Ruhrgas wurden Geräte aus drei Generationen auf dem Prüfstand untersucht.

Das Gerät der ersten Generation wurde im April 2006 auf dem Prüfstand montiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Als Testpunkt wurde seitens Vaillant ein Referenzpunkt aus der Zulassungsmessung gewählt. Die Ergebnisse aus dem Hause Vaillant konnten dabei nachvollzogen werden.



Abbildung 3-1: zeoTHERM in Zweimodulbauweise (Vorgängermodell) [Val]

Das Gerät der ersten Generation war mit zwei Zeolith-Modulen ausgestattet (Siehe Abbildung 3-1). Nach einer Kostenanalyse entschied sich Vaillant die „Zweimodulbauweise“ einzustellen und nur noch die „Einmodulbauweise“ zu verfolgen.

Im Februar 2008 wurde ein Gerät der zweiten Generation in Betrieb genommen und ein in Absprache mit Vaillant erstelltes Versuchsprogramm gefahren. Nach einer weiteren Optimierung der Einstellparameter (Software) wurde eine weitere Versuchsreihe mit gleichen Bedingungen gefahren. Nach Abschluss der Versuchsstandmessungen wurde die Anlage auf dem Versuchsstand über einen Zeitraum von ca. 3.000 Stunden im Dauerbetrieb gehalten. Die Anlage lief über den gesamten Zeitraum stabil. Ende Juli 2008 wurde das Desorptions-/Adsorptionsmodul durch den Hersteller getauscht und es wurde ein neues Zeolith-Modul eingesetzt. Danach wurden umfangreiche Versuchsreihen mit unterschiedlichen Regler-einstellungen

durchgeführt. Die Gerätebelastung wurde auf 5 kW begrenzt. Das Gerät wurde über einen Zeitraum von 2.000 Stunden erfolgreich betrieben.

Im ersten Quartal 2009 wurden vier Geräte der dritten Generation geliefert. Zwei Geräte waren für Daueruntersuchungen im Labor vorgesehen und zwei wurden als Austauschgeräte für die Feldtests verwendet. Zwei Geräte mit unterschiedlichen Zeolithen sind installiert und weisen eine Laufzeit ohne Betriebsstörungen von ca. 42.193 Stunden auf (Stand: August 2011). Weiterhin kann gesagt werden, dass der Prozess stabil abläuft und einen konstanten Heizzahlverlauf aufweist. Aufgrund von Optimierungen vor Ort konnte zudem eine Steigerung der energetischen Effizienz erreicht werden.

Die Geräte wurden in der Zwischenzeit auf eine direkte Solarnutzung für den Heizbetrieb einschließlich Hocheffizienzpumpen umgebaut. Die benötigte elektrische Hilfsenergie wurde dadurch nahezu halbiert. Der Test wird fortgesetzt und endet voraussichtlich im Dezember 2012.

Die gemessenen Werte bestätigen die vom Hersteller Vaillant durchgeführten Messungen. Das Ziel, die Betriebssicherheit dieser Technologie nachzuweisen, wurde erreicht.

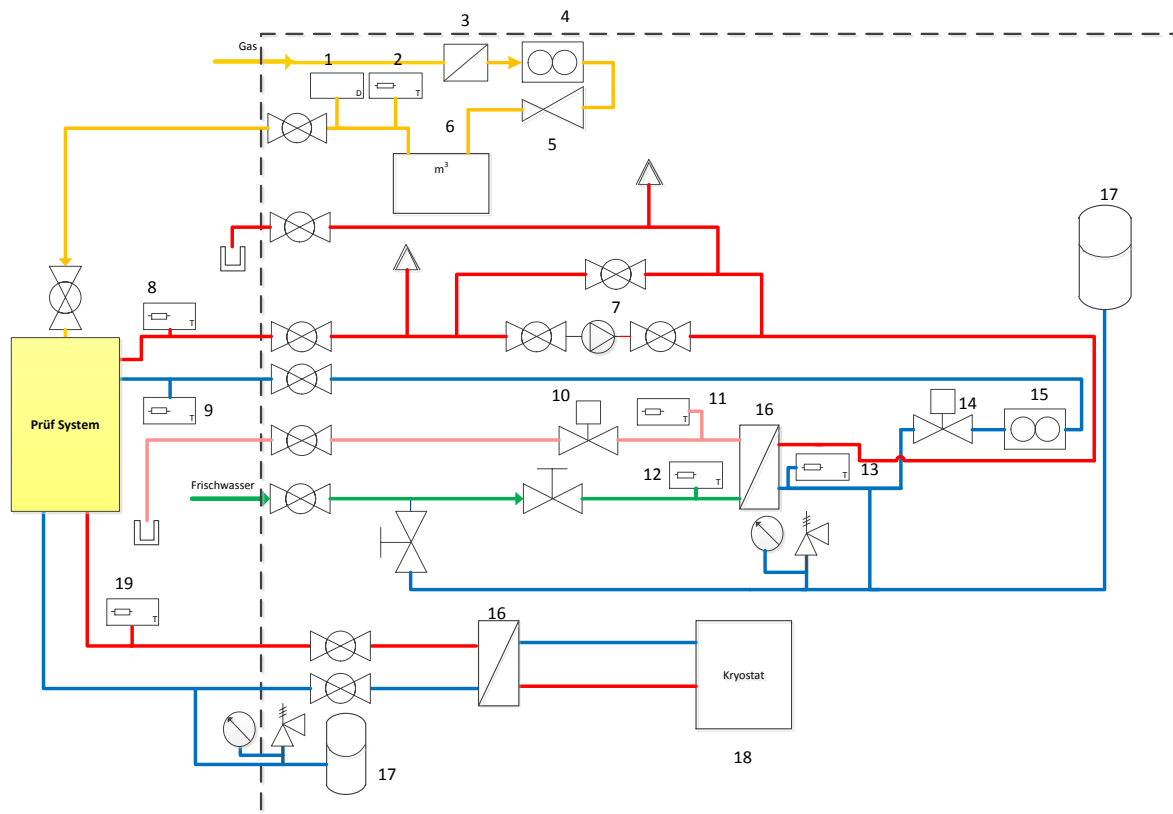
3.2 Erfahrungen bei RWE

Ebenfalls im Rahmen der „Initiative Gaswärmepumpe“ wurde bei RWE in Duisburg eine zeoTHERM der dritten Generation auf dem Versuchsstand untersucht. Das Gerät wurde Anfang Mai 2010 installiert und in Betrieb genommen. Es wurden verschiedene Punkte mit unterschiedlicher Belastung gefahren. Die Umweltwärmequellentemperatur wurde während der Messungen nicht verändert. Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen des Herstellers. Bis Mitte August 2011 wurde das Gerät knapp 10.000 Stunden störungsfrei betrieben.

Neben der Leistungsmessung wurde insbesondere Augenmerk auf die elektrischen Verbräuche gelegt. Mit Einführung der vierten Generation mit reduzierter Pumpen-Anzahl und Einsatz von Hocheffizienzpumpen wird eine deutliche Verbesserung hinsichtlich des Stromverbrauchs nachweislich erreicht.

3.3 Erfahrungen/Messungen am GWI

Die normativen Anforderungen sowie das Betriebsverhalten der Wärmepumpe führten zu Besonderheiten bei den Labormessungen. Kleine Temperaturspreizen und das dynamische Verhalten der untersuchten Wärmepumpe stellten dabei die größten Anforderungen an die Messtechnik des Versuchsstandes. Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 verdeutlichen den schematischen Aufbau sowie eine Ansicht der hydraulischen Verschaltung des eingesetzten Versuchsstandes.



1	Gasdruckmessstelle	8	Temperaturgerätevorlauf	15	Volumenstrommessung Gerät
2	Gastemperaturmessstelle	9	Temperatur Geräterücklauf	16	Wärmetauscher
3	Gasfilter	10	Frischwasserregler	17	Ausdehnungsgefäß
4	Gasmassenstrommessung	11	Temperatur Kühlwasser ein	18	Kryostat
5	Druckminderer	12	Temperatur Kühlwasser aus	19	Temperatur Solevorlauf
6	Gasvolumenstrommessung	13	Regeltemperatur		
7	Umwälzpumpe	14	Stellventil Volumenstrom		

Abbildung 3-2: Schematische Darstellung des am GWI eingesetzten Prüfstandes

Der Versuchsstand ist größtenteils mit Kupferrohren DN¹ 35 aufgebaut. Diese Rohrdimension führte in den zu messenden Leistungsbereichen zu vergleichsweise geringen Strömungsverlusten. Größere Strömungsverluste treten in dem Rücklaufregler (14) und in dem Volumenstrommessgerät (15) auf.

Der Vor- und Rücklauf des Prüfsystems ist über Stahl-draht- Panzerschläuche mit dem Versuchsstand verbunden. Die relevanten Temperaturmessstellen (8 und 9), die zur thermischen Energiemessung benötigt werden, befinden sich direkt am Gerät. Durch diese und weitere Maßnahmen werden die Umgebungseinflüsse der Messungen gering gehalten. Ein zusätzliches Ausdehnungsgefäß (17) im Versuchsstand gleicht Druckänderungen optimal aus. Eine leistungsstarke 3- stufige Umwälzpumpe (7) ermöglicht ein weites Volumenspektrum. Die

¹ Nennweite

Temperturmessstellen (11 und 12) des Kühlkreislaufes dienen der Plausibilitätsprüfung. Das Frischwasserregelventil (10) regelt über den Frischwasservolumenstrom die Rücklauftemperatur. Das Volumenstrommessgerät (15) dient zur Erfassung des Volumenstroms im Heizkreislauf und liefert die Grundlage zur Berechnung der thermischen Energie.



Abbildung 3-3: GWI-Prüfstand

Für die Gasleitung wurde Kupferrohr DN22 verwendet. In der Gasleitung befindet sich ein Gasfilter (3). Dieser ist in Strömungsrichtung zu Beginn der Gasstrecke installiert. Damit soll verhindert werden, dass die Messungen durch Schmutzpartikel oder sonstige Verunreinigen aus der Rohrleitung verfälscht werden. Danach folgt ein Gas-massenstrommessgerät (4). Hiermit wird der Brennstoffmassenstrom gemessen. Da diese Bauteile einen hohen Druckverlust in der Leitung erzeugen, werden sie mit einem Druck von 100 mbar durchströmt. Danach ist ein Druckminderer angeordnet, der den Gasdruck auf einen Anschlusswert von 25 mbar einstellt. Eine weitere Erfassung der Gasmenge wird über die gesamte Versuchszeit anhand eines Balgengaszähler (6) realisiert. Zur Ermittlung des Normvolumens sind weiterhin eine Gasdruckmessstelle (1) und eine Gastemperaturmessstelle (2) integriert. Der Solekreislauf wird indirekt über einen Wärmetauscher mittels eines Kryostaten (18) mit Wärme versorgt.

Die Messgenauigkeiten des eingesetzten Prüfstandes sind nachfolgend aufgeschlüsselt, eine detailliertere Fehlerbetrachtung ist dem Anhang zu entnehmen:

- **Temperaturen**

- Temperaturfühler (Pt 100 Typ B 1/10 DIN) mit einer absoluten Messgenauigkeit von 0,06K. Durch einen gegenseitigen Abgleich der Temperaturfühler beträgt die Messgenauigkeit der Temperaturdifferenz weniger als 0,01K.
- **Durchflüsse**
 - Wasser: Magnetisch – Induktives Durchflussmessgerät MID (Krohne IFC 090): Überprüfung der Messgenauigkeit auf externem Prüfstand ergab maximalen Messfehler von **0,07 %**
 - Gas: Thermische Massedurchflußmessung (Bronkhorst): Lt. Kalibrierzertifikat liegt beim Volumenstrom von 2,271 m³/h ein maximaler Fehler von **0,7 %** des Messwerts vor
 - Gas (zusätzlich): Balgengaszähler (Elster): Beim Durchfluss von 5,0055 m³/h liegt die maximale Abweichung bei **1,1 %**

Im Rahmen der Innovationsoffensive wurde die zeoTHERM der Firma Vaillant nach der VDI-Richtlinie 4650-2 [VDI10] am GWI auf dem zuvor beschriebenen Versuchsstand in Essen untersucht. Ein Gerät der dritten Generation wurde im März/April 2011 mit Heizkreistemperaturen von T_{VL}/T_{RL} von 35/28 °C vermessen. Die gemessenen Werte stimmen dabei mit den Herstellerwerten überein. Nach Einführung der vierten Generation wurde das Gerät ausgetauscht und mit dem neuen Gerät wurde im August/September erneut der Heizkreis 35/28 °C und zusätzlich 55/45 °C vermessen. Die vermessenen Leistungspunkte der 4. Generation nach VDI 4650-2 sind in Tabelle 3-1 aufgeführt.

Tabelle 3-1: Messpunkte nach VDI 4650-2

Relative Leistung P/P _N	Heiznetz 35/28°C		Heiznetz 55/45°C	
	t _{VL} in °C	T _{RL} in °C	t _{VL} in °C	T _{RL} in °C
0,13	22,2	21,3	26,0	24,8
0,3	24,9	22,8	32,6	29,6
0,39	26,2	23,5	35,6	31,7
0,48	27,5	24,2	38,5	33,8
0,63	29,	25,3	43,4	37,2

Die Temperatur der Umweltwärmequelle bei der Nutzung von Solarthermie richtet sich nach der Größe der Aperturfläche und wird mit folgender Formel berechnet:

$$t_{verd} = t_a + 8,2 * (1 - e^{-\left(\frac{A}{6,9}\right)})$$

mit:

t_a Außentemperatur gemäß Tabelle 3-2, abhängig von der Normaußentemperatur und der relativen Leistung

A Aperturfläche in m²

Tabelle 3-2: Soletemperaturen in Abhängigkeit der Normaußentemperatur nach VDI 4650-2

Relative Leistung P/P _N	$t_{a,N} = -10 \text{ °C}$	$t_{a,N} = -12 \text{ °C}$	$t_{a,N} = -14 \text{ °C}$	$t_{a,N} = -16 \text{ °C}$
0,13	16,2	15,9	15,6	15,4
0,3	10,9	10,3	9,7	9,1
0,39	8,4	7,6	6,8	6,0
0,48	5,7	4,8	3,8	2,9
0,63	1,2	0,0	-1,3	-2,5

Bei einer Normaußentemperatur von -10 °C ergaben sich für die Versuchsstandmessungen die in Tabelle 3-3 aufgeführten Werte.

Tabelle 3-3: Soletemperatur für die Versuchsstandmessungen nach VDI 4650-2

Relative Leistung P/P _N	Heiznetz 35/28	Heiznetz 55/45
	t_{UWQ} in °C	t_{UWQ} in °C
0,13	21,4	21,4
0,3	16,1	16,1
0,39	13,6	13,6
0,48	10,9	10,9
0,63	6,4	6,4

In der Richtlinie sind Formeln zur Berechnung des Nutzungsgrades und der Heizzahl angegeben. Bei der Heizzahl wird die elektrische Hilfsenergie mit berücksichtigt. Dadurch sollen Gaswärmepumpen vergleichbar mit elektrischen Wärmepumpen und herkömmlichen Gasheizgeräten gemacht werden. Die Kennzahlen berechnen sich wie folgt.

Definition der Heizzahl mit 5 Messpunkten:

$$\zeta_h = \frac{5}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\zeta_{h,i}}}$$

mit

$$\zeta_{h,i} = \frac{P_i}{Q_i + P_{i,el}}$$

Dabei sind

$\zeta_{h,i}$	Heizzahl
P_i	Wärmeleistung
Q_i	Brennstoffleistung
$P_{i,el}$	el. Leistungsaufnahme

Definition des Nutzungsgrades:

$$\eta_{N,h} = \frac{5}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\eta_{h,i}}}$$

mit

$$\eta_{h,i} = \frac{P_i}{Q_i}$$

Dabei sind:

- $\eta_{h,i}$ Nutzungsgrad
- P_i Wärmeleistung
- Q_i Brennstoffleistung

Das Heizgerät kann nicht auf eine bestimmte Leistung geregelt werden, sondern läuft in definierten Parametern. Um die erforderlichen Leistungspunkte zu vermessen, wurde ein Punkt über und ein Punkt unter den gewünschten Leistungen vermessen und über eine gewichtete Mittelwertbildung aus den beiden Einzelergebnissen der gesuchte Punkt errechnet. Die gemessenen Teillastpunkte in den Heizkreisen mit 35/28 °C und 55/45 °C sind im Folgenden aufgeführt. Im Heizkreis 55/45 wurden die Punkte 48 % und 63 % im Direktheizbetrieb gemessen, da bei den geforderten hohen Temperaturen der Wärmepumpeneffekt sich nicht mehr auf die Effizienz auswirkt.

Das Besondere an dem System ist, dass neben der Funktion als Umweltwärmequelle der Solarkollektor auch für die Warmwasserbereitung und für die solare Heizungsunterstützung genutzt werden kann. Dadurch kann der Solarkollektor über ein breiteres Temperaturspektrum genutzt werden.

Die VDI-Richtlinie 4650-2 [VDI10] gibt für diese Fälle Formeln an, um die Gesamtsystemeffizienz zu berechnen.

3.3.1 Nutzungsgrad der Warmwasserbereitung mit Solarunterstützung

Der Nutzungsgrad für die Warmwasserbereitung berechnet sich nach der VDI 4650-2

wie folgt:

$$\eta_{N,w} = \frac{1}{\frac{W}{\eta_{w1}} + \frac{1-W}{\eta_{w2}}}$$

Dabei ist

$\eta_{N,w}$ der Nutzungsgrad der Warmwasserbereitung

W der Anteil der Heizarbeit zur Aufheizung des kalten Speichers = 0,4

η_{w1} der Nutzungsgrad der Aufheizung (Nutzungsgrad im Heiznetz 55/45)

η_{w2} der Nutzungsgrad der Bereitschaftsladung (Nutzungsgrad bei 65/50 mit Nennlast)

Daraus berechnet sich der Nutzungsgrad der solarunterstützten Warmwasserbereitung wie folgt:

$$\eta_{N,w,S} = \frac{N_{N,w}}{(1 - \phi)}$$

Dabei ist

$\eta_{N,w,S}$ der Nutzungsgrad der Warmwasserbereitung mit Solarunterstützung

$\eta_{N,w}$ der Nutzungsgrad der Warmwasserbereitung

ϕ der solare Deckungsgrad

Für den solaren Deckungsgrad wurde ein Prozentsatz von 60 % angenommen. Je nach Nutzerverhalten und Gebäude kann sich der Wert beim tatsächlichen Gebrauch ändern.

Daraus ergibt sich ein Nutzungsgrad von 255 %.

3.3.2 Nutzungsgrad für die solarunterstützte Raumheizung

Mit dem Nutzungsgrad für die Raumheizung ($\eta_{N,h}$) errechnet sich der Nutzungsgrad für solarunterstütztes Heizen wie folgt:

$$\eta_{N,h,S} = \frac{\eta_{N,h}}{1 - X}$$

Dabei ist

$\eta_{N,h}$ der Jahresnutzungsgrad der Wärmepumpenanlage

X der Anteil an Heizwärme durch direkte solare Heizungsunterstützung

Der Anteil an der Heizwärme, der durch die direkte solare Heizungsunterstützung beigetragen wird, wurde nach Herstellerangaben mit 0,058 angenommen.

3.3.3 Gesamtjahresnutzungsgrad und Gesamtjahresheizzahl

Der Gesamtjahresnutzungsgrad berechnet sich aus den Werten für solarunterstütztes Heizen ($\eta_{N,h,S}$) und solarunterstützte Warmwasserbereitung ($\eta_{N,w,S}$) wie folgt:

$$\eta_{WP} = \frac{1}{\frac{(1 - y)}{\eta_{N,h,S}} + \frac{(y)}{\eta_{N,w,S}}}$$

Dabei ist

η_{WP} der Gesamtjahresnutzungsgrad der Gaswärmepumpe

y der Anteil der Brauchwasserenergie am Gesamtenergiebedarf, hier wurde mit einem Wert von 0,18 gerechnet, je nach Haus und Nutzer kann sich dieser Wert ändern.

$\eta_{N,h,S}$ Jahresnutzungsgrad für die Raumheizung mit Solarunterstützung

$\eta_{N,w,S}$ Jahresnutzungsgrad für die Warmwasserbereitung mit Solarunterstützung

Die Ergebnisse decken sich mit den Erwartungen des Herstellers. Im Heizkreis 35/28 °C erreicht das Komplettsystem einen Gesamtjahresnutzungsgrad von 140 % und im Heizkreis 55/45 wird ein Gesamtjahresnutzungsgrad von 133 % erreicht.

Die Ermittlung der Gesamtjahresheizzahl erfolgt analog zur Ermittlung des Gesamtjahresnutzungsgrades, anstelle der Teilnutzungsgrade werden die Teilheizzahlen benutzt.

Die Mindestanforderungen, die vom Marktanreizprogramm und EEWärmeG gefordert werden, werden durch das Komplettsystem in beiden Heizkreisen erreicht. Die Anforderungen des Marktanreizprogramms nach einer Gesamtjahresheizzahl von $\geq 1,3$ werden sowohl im Heizkreis 35/28 als auch im Heizkreis 55/45 von dem System erreicht. Das Zeolith-System weist für den Heizkreis 35/28 eine Gesamtjahresheizzahl von 1,4 und für den Heizkreis 55/45 eine Gesamtjahresheizzahl von 1,3 auf. Die Werte sind in Tabelle 3-4 aufgeführt.

Tabelle 3-4: Gesamtkennzahlen nach VDI 4650-2

Heizkreistemperaturpaarung	35/28 °C	55/45 °C
Gesamtjahresnutzungsgrad	1,40	1,33
Gesamtjahresheizzahl	1,37	1,30

Außerdem wurde eine Messung im Heizkreis 35/28 mit einer erhöhten Umweltwärmequellentemperatur durchgeführt, um so den Unterschied zwischen Flach- und Röhrenkollektoren abzubilden. Die Erhöhung führte, wie vom Hersteller vorhergesagt, zu einer Verbesserung der energetischen Effizienz und zeigt damit eine technische Möglichkeit auf, die Effizienz derartiger Systeme zu verbessern.

Zwischen der dritten und der vierten Generation mit reduzierter Pumpenanzahl und Hocheffizienzpumpen konnte bei den Messungen im Heizkreis 35/28 eine Reduzierung der elektrischen Hilfsenergie von bis zu 50 % nachgewiesen werden. Besonders im Wärmepumpenbetrieb machten sich die Reduzierung der Pumpenanzahl und der Einsatz von Hocheffizienzpumpen deutlich bemerkbar. Der intermittierende Betrieb der Pumpen im Feld verspricht eine weitere deutliche Einsparung an elektrischer Hilfsenergie.

Während der Versuche lief die Anlage stabil. Es kam zu keinen störungsbedingten GWP-Stillständen. Es konnte messtechnisch ein konstanter Wirkungsgradverlauf beobachtet werden.

Das aktuelle Gerät der vierten Generation wurde nach den Versuchsstandmessungen ohne weitere Probleme im institutseigenen Versuchshaus installiert und steht dort als Demonstrationsobjekt zur Verfügung.

Die zeoTHERM erwies sich in allen bisher gelaufenen Versuchen als betriebssicher. Im Rahmen der „Initiative Gaswärmepumpe“ wurden insgesamt 51 Geräte (3. und 4.

Generation) im Feld installiert und über einen längeren Zeitraum getestet. Innerhalb dieser Gruppe bestätigte sich der sichere und störungsfreie Betrieb der zeoTHERM. Die Anlage eignet sich besonders für Neubauten bzw. Gebäude mit Fußbodenheizungen und dementsprechend niedrigen Heizkreistemperaturen. Mit steigenden Heizkreistemperaturen sinkt die Effizienz.

Die Installation ist mit der Installation eines Brennwertkessels mit Solaranlage zu vergleichen, so dass entsprechend geschulte Handwerker auch die zeoTHERM ohne weiteres aufstellen können.

3.3.4 Aussagekraft der Testergebnisse

Um die Aussagekraft der gewonnenen Testdaten beurteilen zu können wurde eine Feldtestanlage mit einer ordnungsgemäßen Installation und Betriebsweise ausgewählt (GWP 01) und den Laborergebnissen nach VDI 4650-2 gegenüber gestellt (Siehe Abbildung 3-4).

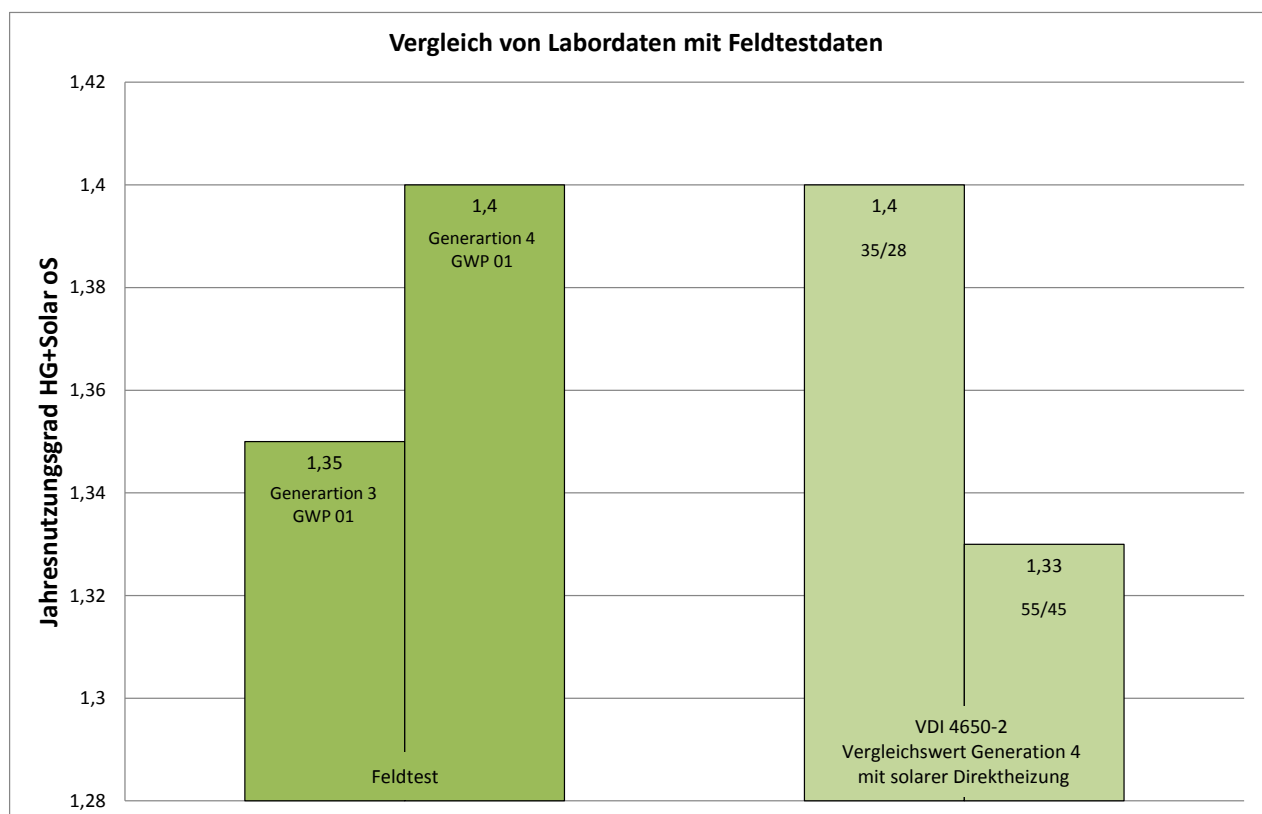


Abbildung 3-4: Vergleich von Labordaten und Feldtestdaten

Die Feldtestdatenanalyse hat verdeutlicht, dass der Jahresnutzungsgrad „HG+Solar oS“ aufgrund der vergleichsweise geringen Auswirkungen der Einflussfaktoren die bestmögliche Vergleichsgröße darstellt. Abbildung 3-4 zeigt die gute Übereinstimmung der Nutzungsgrade aus dem Feldtest mit den Nutzungsgraden aus den Labormessungen. Die Generation 4 der zeoTHERM hat aufgrund der

durchgeführten Optimierungen eine Nutzungsgradsteigerung um fünf Prozentpunkte erzielt.

4 Modellbildung zur Simulation

Die Simulation dynamischer Systeme mit einer Vielzahl voneinander abhängiger, zeitabhängiger Variablen wird auch in der Gerätetechnik zur Gebäudeenergieversorgung immer bedeutsamer, da auch hier die Komplexität der Technologie immer größer wird.

Modelica als Programmiersprache und Dymola als Graphical User Interface (GUI) repräsentieren ein relativ neues und mächtiges Werkzeug für die Modellierung und Simulation komplexer dynamischer Systeme. Als Teil dieses Projekts wurden Einzelmodelle von Solarkollektoren und Speichern inklusive der Hydraulik mit einem Modell einer Zeolithwärmepumpe für Modelica entwickelt und verknüpft.

Modelica ist eine frei verfügbare, objektorientierte und gleichungsbasierte Programmiersprache. Modelica-Modelle werden mathematisch durch Systeme algebraischer Gleichungen und Differentialgleichungen beschrieben. Seit 1996 befindet sich in der kontinuierlichen Entwicklung und ist zur Beschreibung von fachbereichsübergreifenden Problemen in einem weiten Bereich von Themengebieten geeignet: Mechanik, Elektrotechnik und Elektronik, Thermodynamik, Hydraulik und Pneumatik, Regelungstechnik und Prozesstechnik. Die aktuellste Version repräsentiert der Sprachstandard 3.2, der seit März 2010 verfügbar ist.

Es existieren verschiedene grafische Entwicklungsumgebungen für diese Sprache, um dem Benutzer die Entwicklung komplexer Simulationsmodelle mittels grafischer Symbole, die jeweils ein Objekt darzustellen, zu erlauben. Hier wird als Simulationsumgebung Dymola (Dynamic Modeling Laboratory) genutzt.

Weitere Vorteile von Dymola sind:

- Große und komplexe Multi-Engineering-Modelle sind handhabbar,
- schnellere Modellierung von grafischen Modell-Zusammensetzungen,
- schnellere Simulation – symbolische Vorverarbeitung,
- offen für benutzerdefinierte Modellkomponenten,
- offene Schnittstelle zu anderen Programmen,
- 3D-Animation und
- Simulation in Echtzeit.

Das mit Modelica erstellte Modell zur Simulation und Parameteruntersuchung der Zeolithwärmepumpe Vaillant zeoTHERM inklusive der Technologieperipherie wird im Folgenden näher beschrieben. Das Gesamtmodell besteht aus mehreren Teilkomponenten. Abbildung 4-1 zeigt das Modell der Zeolithwärmepumpe (ZWP) zur Simulation und Validierung an Hand der Messdaten, die im Labor gewonnen wurden.

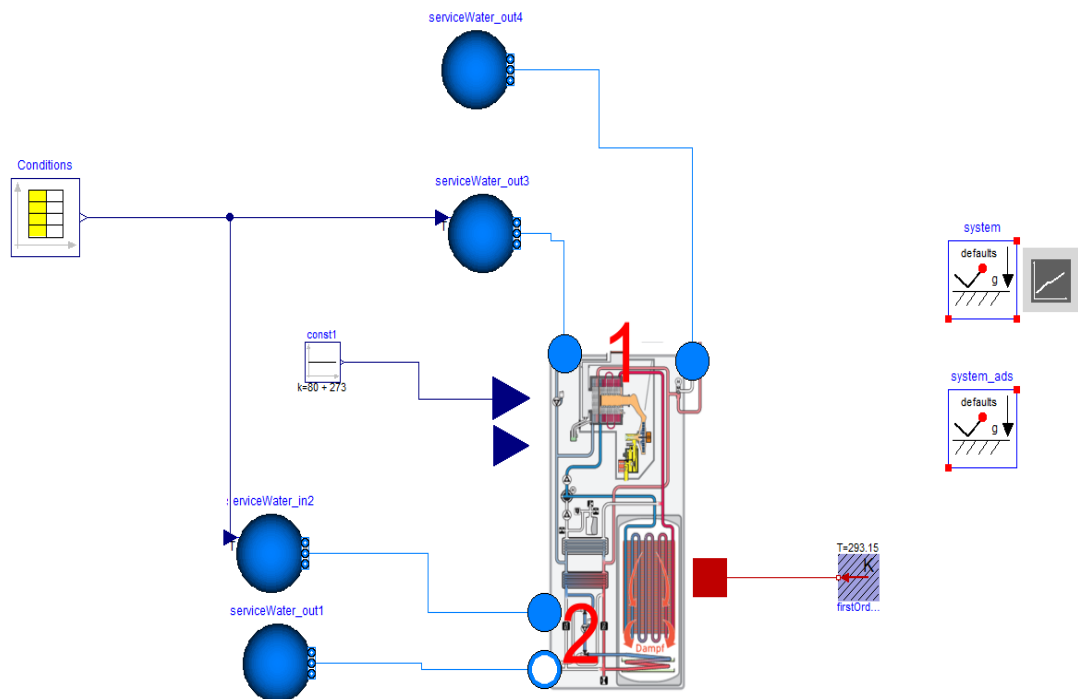


Abbildung 4-1: Zeolithwärmepumpenmodell mit Schnittstellen nach außen

Für die Berechnungen wurden folgende Randbedingungen gewählt:

- Die Außentemperatur beträgt 0°C und ist konstant.
- Die Vorlauftemperaturen der Solarkollektoren sind vorgegeben.
- Die Rücklauftemperaturen der ZWP sind ebenfalls vorgegeben bzw. die Anlage läuft über konstante Rücklauftemperatur
- Es ist kein Trinkwasserspeicher vorhanden.

Die Zeolithwärmepumpe als Hauptkomponente des Modells ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

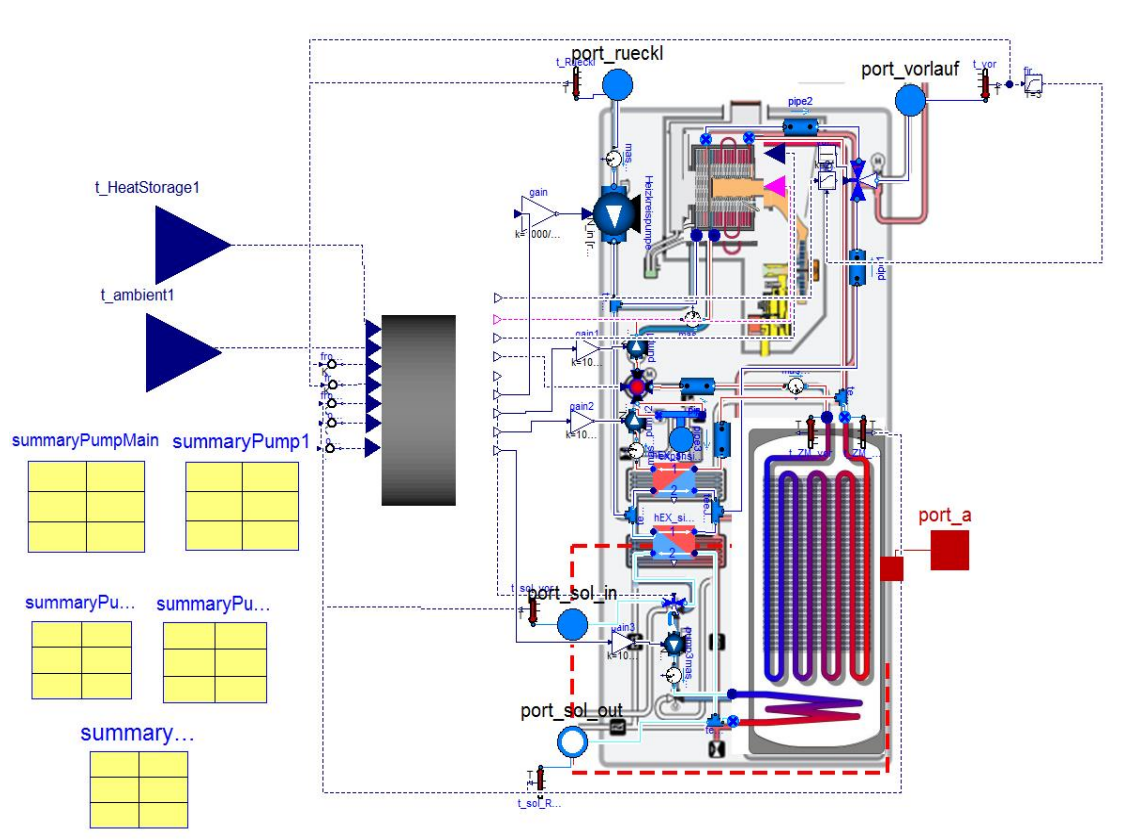


Abbildung 4-2: Hauptstruktur der ZWP

Die Hauptstruktur der ZWP ist durch Herstellerinformationen und verschiedene Daten und Kennlinien abgebildet. Mit diesem Modell wird der gesamte Wärmepumpenprozess beschrieben. Die meisten Parameter sind nach Herstellerangaben modelliert worden. Zusätzlich dazu mussten Annahmen getroffen werden, wie z. B. Gesamtgewicht der ZWP zur Berechnung der thermischen Trägheit oder Wärmeübergangskoeffizienten der ZWP-Einhausung.

Das Zeolithmodul ist wie in Abbildung 4-3 modelliert.

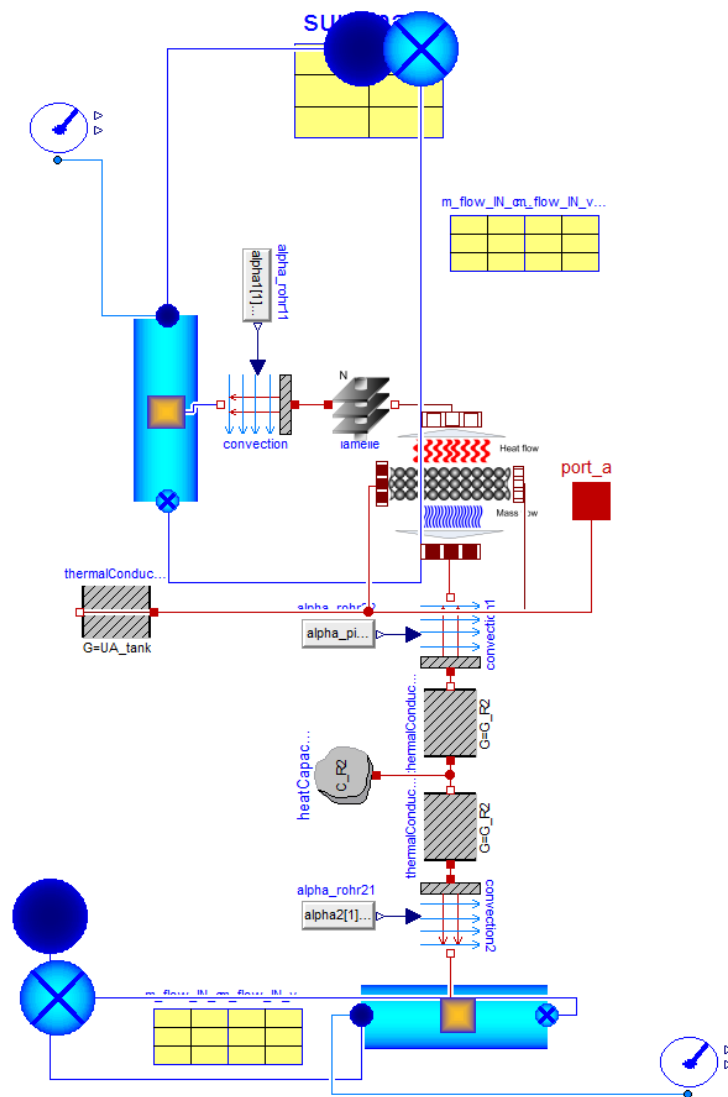


Abbildung 4-3: Modell des Zeolith Moduls

Im Zeolithmodul befindet sich eine bestimmte Menge an Zeolith, das auf Aluminium-Lamellen, deren Masse ebenfalls durch den Hersteller bekannt ist, verteilt ist, um die Wärme besser abzugeben zu können. Das zusätzlich eingesetzte Medium ist Wasser, was unter bekannten Randbedingungen vorliegt. In diesem Modul finden sowohl die Desorption als auch die Adsorption statt.

Die Wärmepumpe wird über einen Controller gesteuert. Das Modell des Controllers ist in Abbildung 4-4 abgebildet.

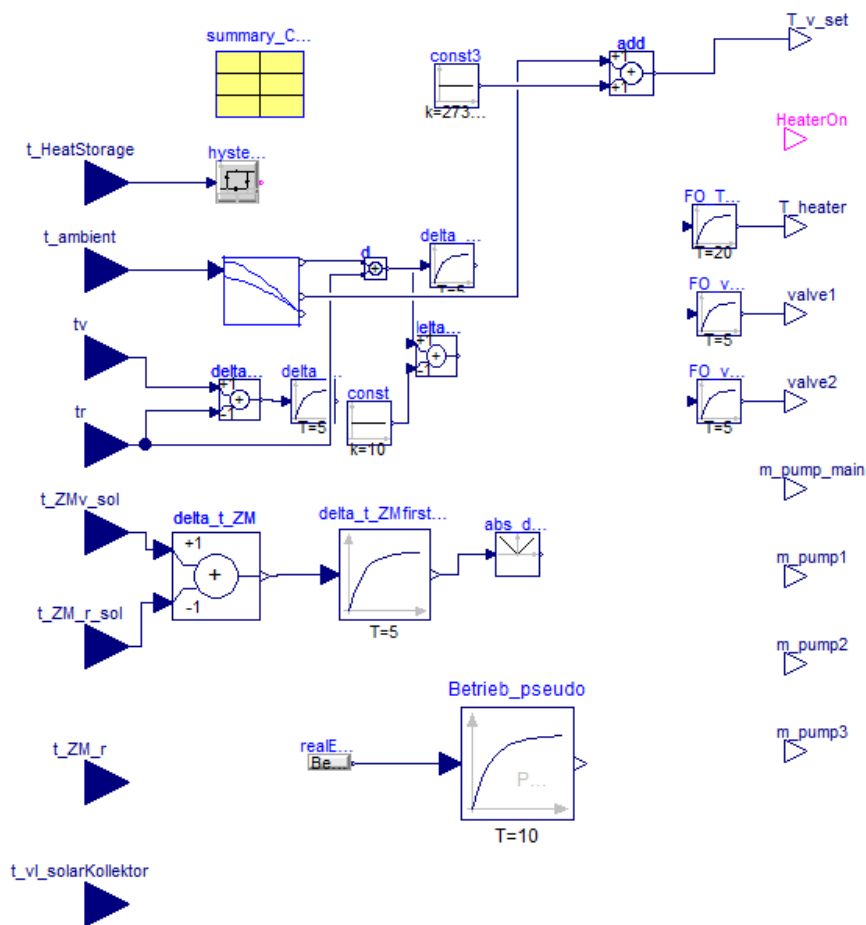


Abbildung 4-4: Controller (Steuerungsmodell)

Der Controller steuert die gesamte ZWP. Hier wird die De- bzw. Adsorption gestartet oder beendet. Z. B. laufen die Pumpen bei jedem Parameter mit einer unterschiedlichen Drehzahl und es werden somit unterschiedliche Mengen gefördert.

Als weiterer Schritt wurde ein Modell aus ZWP, Speicher, Solarkollektoren und einer Wärmesenke erstellt wie in Abbildung 4-5 dargestellt.

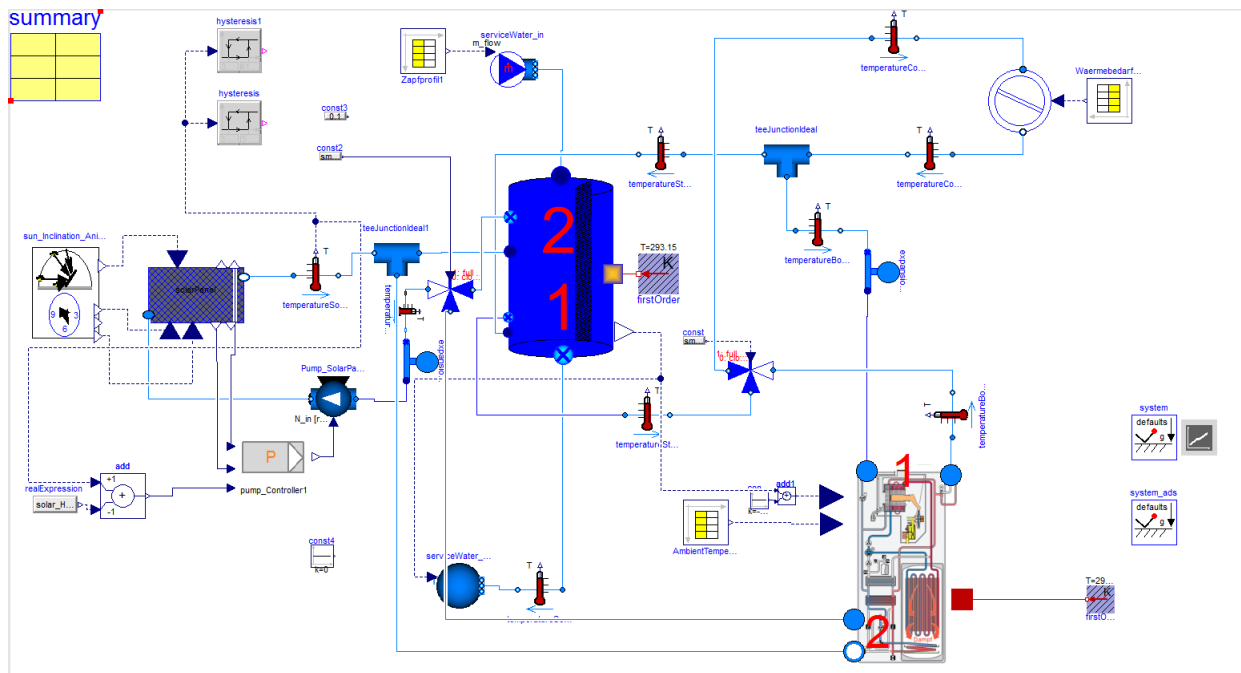


Abbildung 4-5: Gesamtkreis mit Trockenkühler und Solarkreis

Neben dem Wärmepumpenmodul beinhaltet das System zusätzlich einen Brennwertkessel für die Betriebsweise nach Parameter III und IV, dessen Modell auf der folgenden Abbildung dargestellt ist.

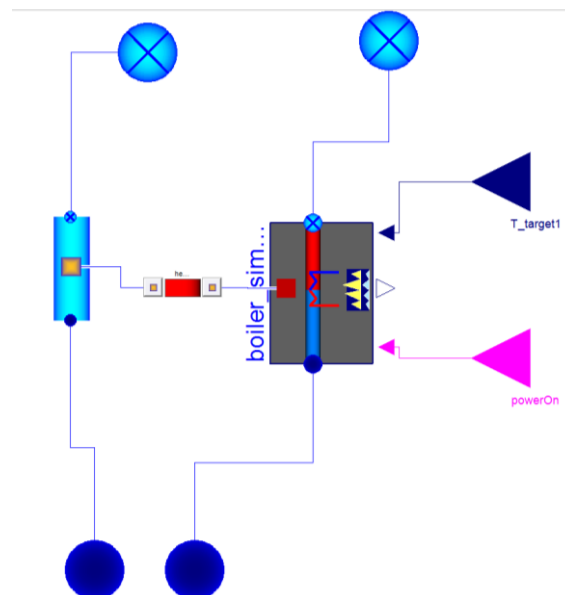


Abbildung 4-6: Modell des Brennwertkessels

Als Modell wurde ein Brennwert-Kessel als Kennlinienmodell aus einer HVAC-Library mit einem zusätzlichen Wärmetauscher gewählt und integriert.

Zusätzlich zu dem Modell der ZWP besteht das System aus Solarkollektoren und einem Schichtenspeicher (Abbildung 4-7).

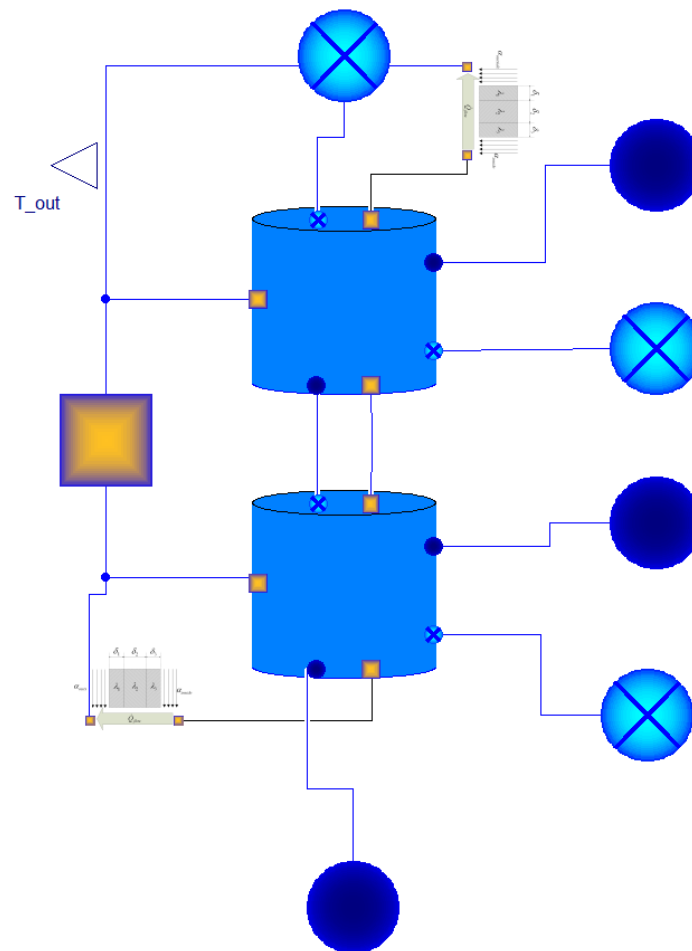


Abbildung 4-7: Schichtenspeicher

Der Schichtenspeicher ist für Warmwasserspeicherung integriert. Im Modell können verschiedene Parameter variiert werden, wie z. B. das Volumen, das Speichermedium und die Wärmeübergangskoeffizienten.

Der Solarkollektor (Abbildung 4-8) wird in der Modellbildung vollständig durch die Konduktion, Konvektion und Strahlung beschrieben. Bei dem vorliegenden Modell handelt es sich um einen Flachkollektoren.

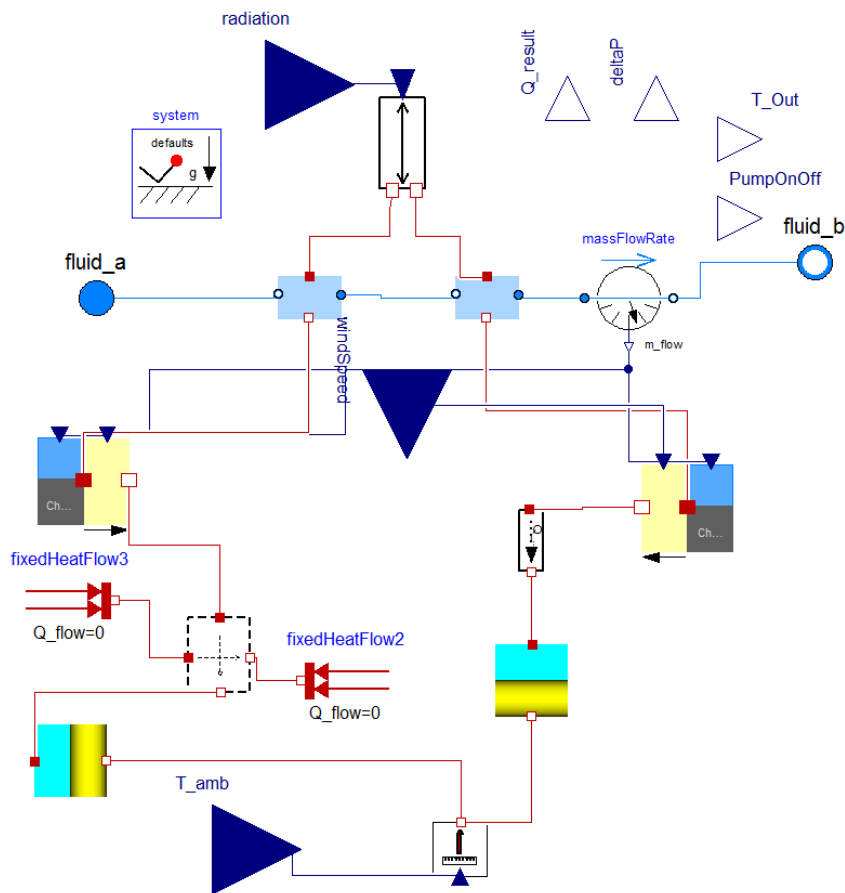


Abbildung 4-8: Modell für die Solarkollektoren

4.1 Validierung

Die Modelica-Simulation wurde mit Hilfe der Messdaten am Versuchsstand validiert. Eine Validierung durch Messdaten, die während des Betriebs im Versuchshaus aufgenommen wurden, war auf Grund der Komplexität und der zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch unfertigen Abbildung der Gebäudestrukturen in Modelica nicht zielführend. Da die Wärmepumpe mit 4 festen Parametern arbeitet, wurde die Validierung für die einzelnen Parameter durchgeführt. Parameter IV stellt den reinen Brennwertbetrieb ohne Wärmepumpenbeitrag dar. Hier wurde auf ein existierendes Brennwertmodul zurückgegriffen, so dass auf eine Validierung verzichtet werden konnte. Da das Hauptziel in der Validierung des Wärmepumpenbetriebs bestand werden im Folgenden nur die Parameter I und II betrachtet, da Parameter III bereits eine Kombination aus Wärmepumpenbetrieb und Brennwertbetrieb darstellt.

Parameter I:

Beim Wärmepumpenbetrieb mit einer Fahrweise gemäß Parameter I wurden folgende Werte am Versuchsstand gemessen:

Messwerte Versuchsstand:

- Vorlauftemperatur, $T_{\text{Vorlauf Mittelwert}} = 22,5^{\circ}\text{C}$
- Rücklauftemperatur, $T_{\text{Rücklauf Mittelwert}} = 21,34^{\circ}\text{C}$
- Zugeführte Leistung (Brenngas), $P_{\text{Gas Summe}} = 1,78 \text{ KW}$

Die Simulation liefert folgende Daten:

- Vorlauftemperatur, $T_{\text{Vorlauf Mittelwert}} = 22,3^{\circ}\text{C}$ (Abweichung < 1 %)
- Rücklauftemperatur, $T_{\text{Rücklauf Mittelwert}} = 20,75^{\circ}\text{C}$ (Abweichung ~ 3 %)
- Zugeführte Leistung (Brenngas), $P_{\text{Gas Summe}} = 2,2 \text{ KW}$ (Abweichung ~20 %)

Parameter II

Bei Parameter II ergaben sich folgende Werte

Messwerte Versuchsstand:

- Vorlauftemperatur, $T_{\text{Vorlauf Mittelwert}} = 23,5^{\circ}\text{C}$
- Rücklauftemperatur, $T_{\text{Rücklauf Mittelwert}} = 22,8^{\circ}\text{C}$
- Zugeführte Leistung (Brenngas), $P_{\text{Gas Summe}} = 3,05 \text{ KW}$

Die Simulation liefert folgende Daten:

- Vorlauftemperatur, $T_{\text{Vorlauf Mittelwert}} = 22,3^{\circ}\text{C}$ (Abweichung ~ 5 %)
- Rücklauftemperatur, $T_{\text{Rücklauf Mittelwert}} = 20,75^{\circ}\text{C}$ (Abweichung ~ 10 %)
- Zugeführte Leistung (Brenngas), $P_{\text{Gas Summe}} = 3,46 \text{ KW}$ (Abweichung ~ 12 %)

Die Simulationsgenauigkeit ist zufriedenstellend, nur bei dem Gaseinsatz in den Parametern I und II gibt es größere Abweichungen. So ist keine exakte Abbildung der Ad- bzw. Desorptionsprozesse möglich, allerdings ist die richtige Funktionsweise sichergestellt und durch Vergleiche einzelner Simulationen untereinander kann der Einfluss einzelner Parameter ermittelt werden.

4.2 Simulationsergebnisse

Zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse wurden die Parameter Vorlauf-temperatur und Umweltwärmequellentemperatur variiert. Es wurden zwei Simulationen mit einer um 2 bzw. um 5 °C erhöhten Temperatur durchgeführt. Zur besseren Abschätzung wurden diese Simulationen bei den Betriebsparametern I und II, bei denen ein reiner Wärmepumpenbetrieb gefahren wird, durchgeführt.

Im Modell wird eine Rücklaufregelung vorgenommen, d. h. die Rücklauf-temperatur wird durch das Programm vorgegeben und die simulierte Anlage liefert eine entsprechende Vorlauf-temperatur. Der Vergleich der Vorlauf-temperaturen ist in Abbildung 4-9: Verlauf der Vorlauf-temperatur für Parameter I bei erhöhter Rücklauf-temperatur zu sehen. Die Anhebung der Rücklauf-temperatur schlägt sich analog in den Vorlauf-temperaturen nieder.

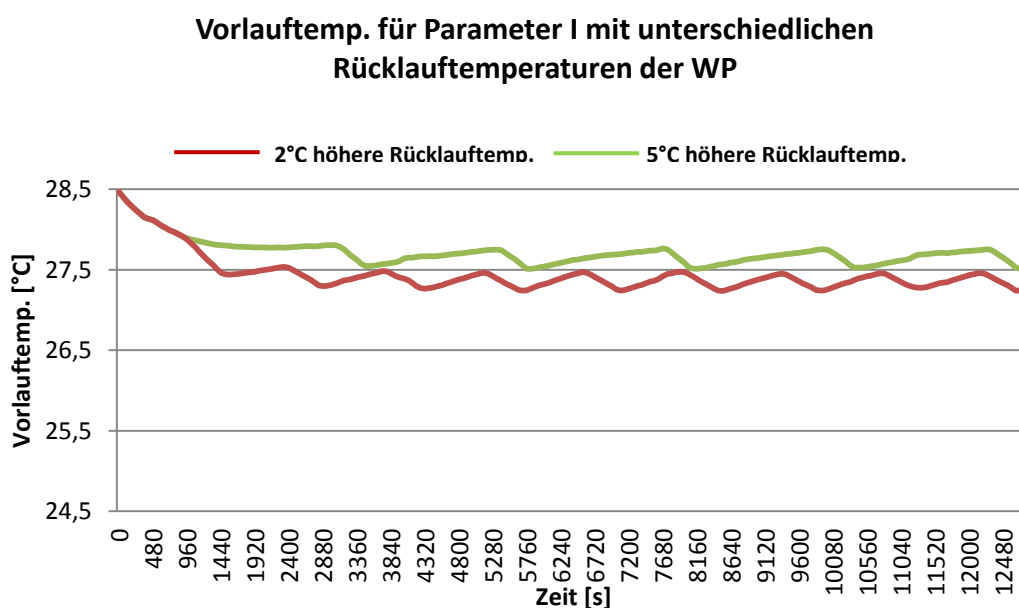


Abbildung 4-9: Verlauf der Vorlauf-temperatur für Parameter I bei erhöhter Rücklauf-temperatur

Die gleiche Vorgehensweise wurde für die Simulation von Parameter II verfolgt (Siehe Abbildung 4-10). Dabei ist zu beobachten, dass die Erhöhung der Vorlauf-temperatur geringer ausfällt als bei Parameter I.

Vorlauftemp. für Parameter II mit unterschiedlichen Rücklauftemperaturen der WP

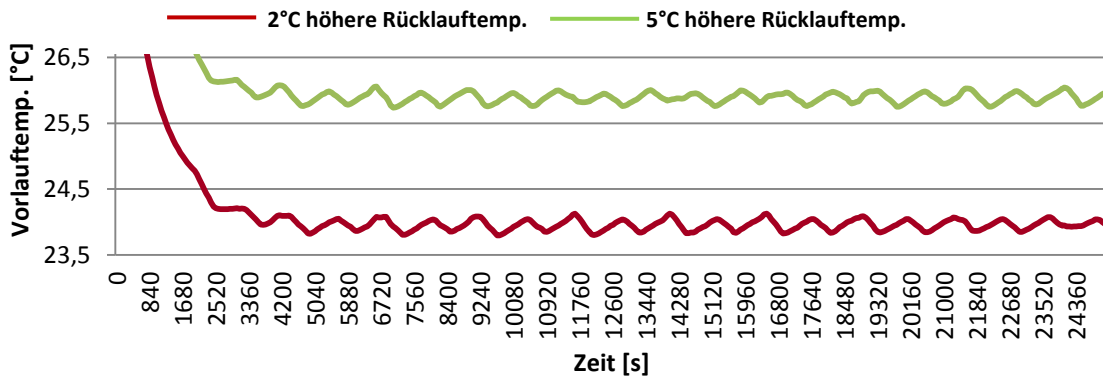


Abbildung 4-10: Verlauf der Vorlauftemperatur für Parameter II bei erhöhter Rücklauftemperatur

Durch die theoretischen Überlegungen war zu erwarten, dass die benötigte Gasmenge ansteigt. Dies bestätigte sich in den Simulationen (Siehe Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12).

Gasverbrauch für Parameter I mit unterschiedlichen Rücklauftemperaturen der WP

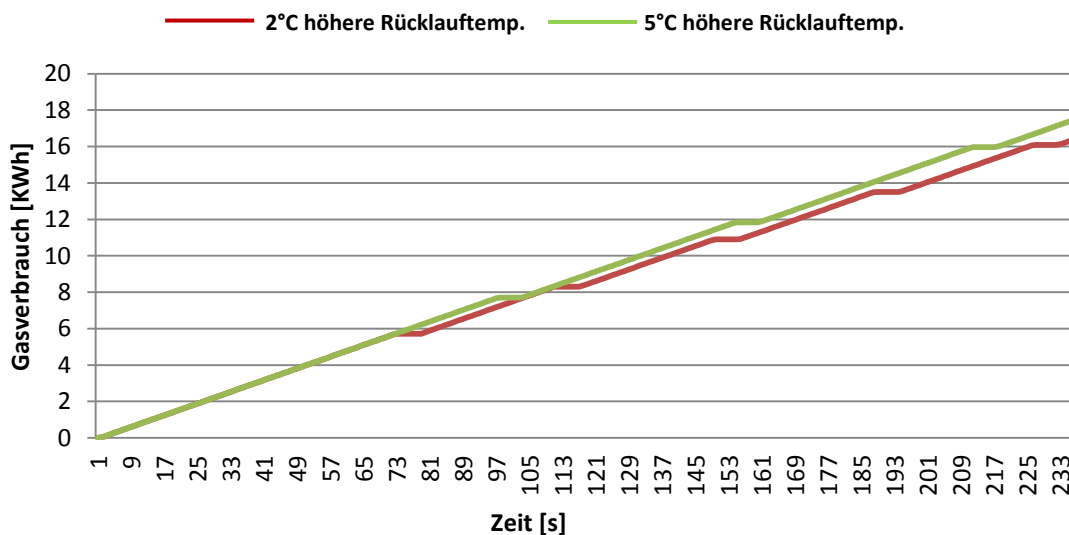


Abbildung 4-11: Gasverbrauch für Parameter I mit unterschiedlichen Rücklauftemperaturen

Gasverbrauch für Parameter II mit unterschiedlichen Rücklauftemperaturen der WP

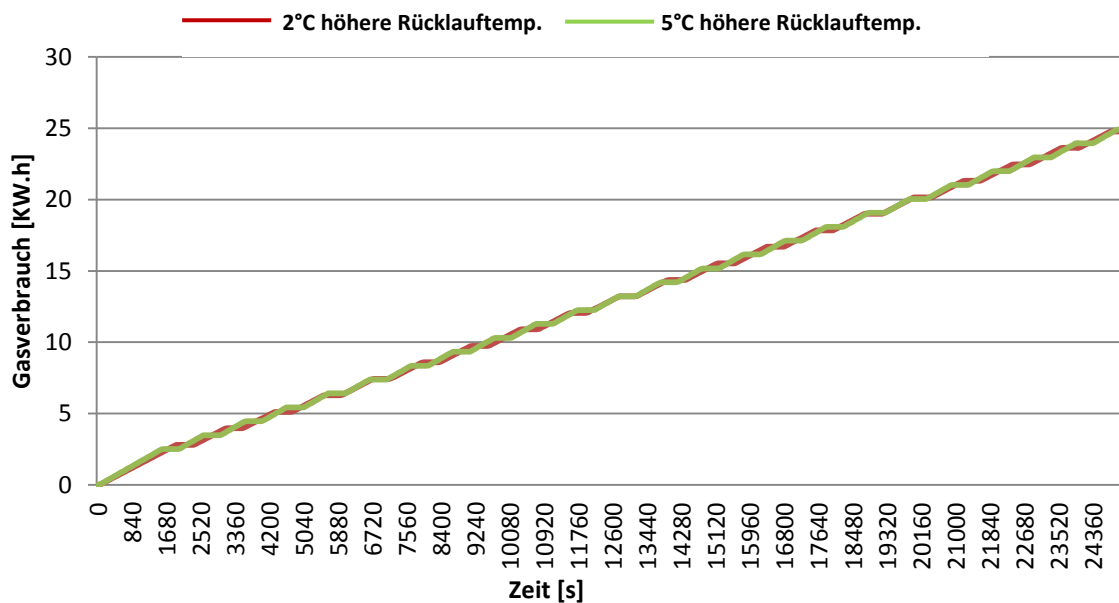


Abbildung 4-12: Gasverbrauch für Parameter II mit unterschiedlichen Rücklauftemperaturen

Als zweiter Schritt wurde die Soleeingangstemperatur verändert. Analog zu der Simulation mit einer Änderung der Rücklaufstemperatur wurden eine um 2°C bzw. um 5°C erhöhte Soletemperatur simuliert.

Den theoretischen Überlegungen zu Folge ist bei einer Erhöhung der Soletemperatur eine Verringerung des Gasverbrauchs zu erwarten.

In Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 sind die Gasverbräuche der Simulationen mit erhöhten Soletemperaturen dargestellt.

Gasverbrauch für Parameter I mit unterschiedlichen Soletemperaturen

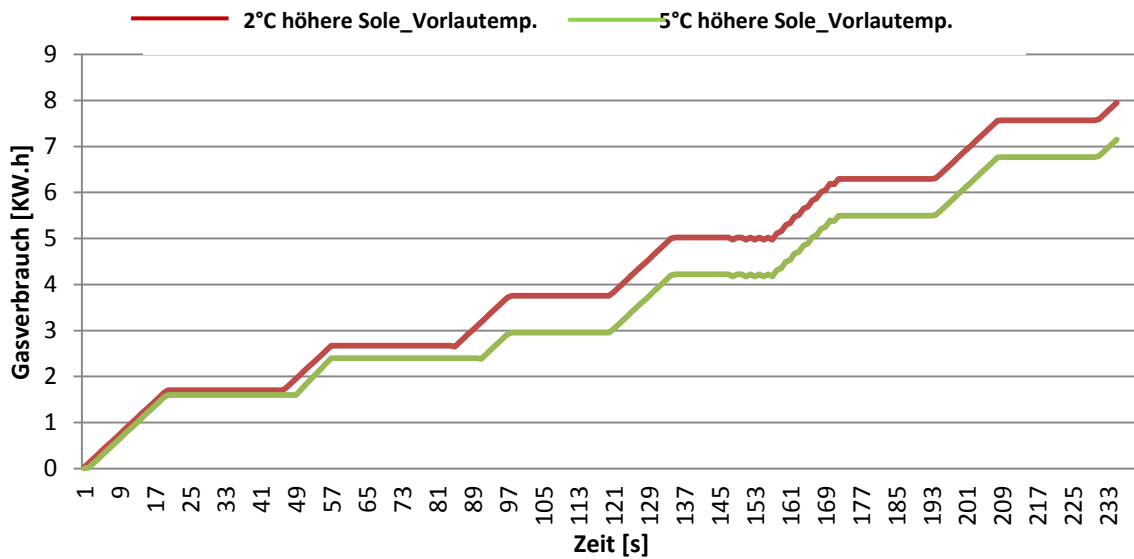


Abbildung 4-13: Gasverbrauch für Parameter I bei 2°C und 5°C höherer Sole-Vorlaufemperatur

Gasverbrauch für Parameter II mit unterschiedlichen Soletemperaturen

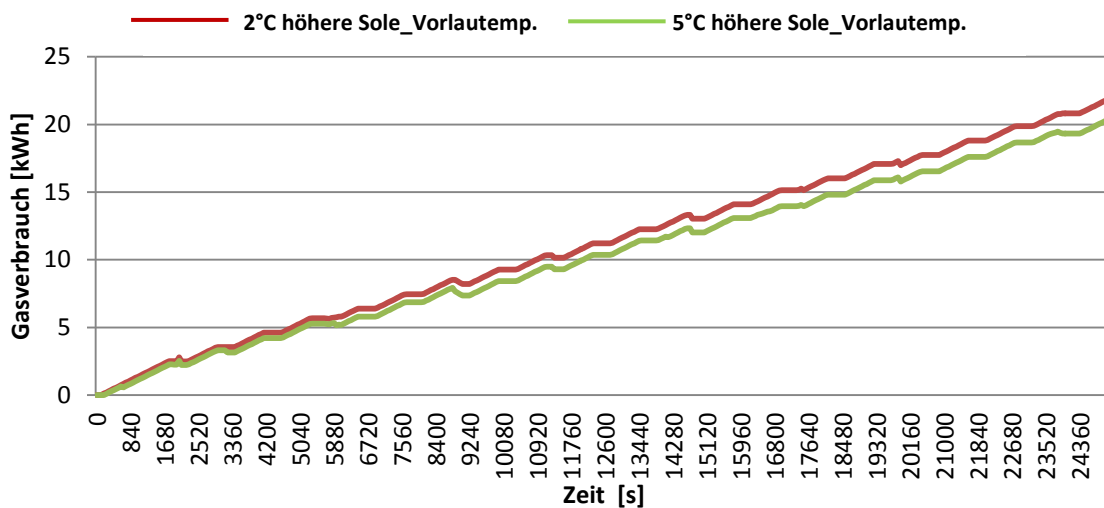


Abbildung 4-14: Gasverbrauch für Parameter II bei 2°C und 5°C höherer Sole-Vorlaufemperatur

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der Temperaturerhöhung von 2 auf 5°C liegt noch ein Unterschied von 6 % gegenüber den Herstellererwartungen von 3 % vor.

Bei einer Vorlauftemperaturanhebung von 2°C und 5°C in Parameter II weichen die Wirkungsgrade um 3% ab. In der Realität ist vom Hersteller eine leicht größere Änderung von 3 % zu erwarten, allerdings kann das gewonnene Ergebnis als realitätsnah betrachtet werden und die theoretischen Überlegungen als auch die Herstellererwartungen werden dadurch bestätigt.

Bei dem Vergleich der Wirkungsgrade unter Berücksichtigung der Soletemperatur kann in Parameter I ein ebenso plausibles Ergebnis erzielt werden. Bei einem Vergleich der Auswirkungen einer Temperatursteigerung von 2 und 5°C wird eine Wirkungsgradverbesserung von 1 % erreicht, während die Steigerung bei dem Vergleich in Parameter II 1 % betrug. Diese Resultate bestätigen die theoretischen Überlegungen.

Neben den Systemtemperaturen wurden auch die Systemkomponenten Solarkollektor und Speicher untersucht. Hierfür wurden verschiedene Größen simuliert und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Für den Speicher wurden Volumina von 300 l (rot), 500 l (blau) und 1000 l (grün) angenommen. Der Verlauf der Speicherverluste ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Wie zu erwarten, steigen die Verluste mit der Größe des Speichers. Bei der Dimensionierung des Speichers muss ein Kompromiss zwischen Komfort und Wirtschaftlichkeit gefunden werden.

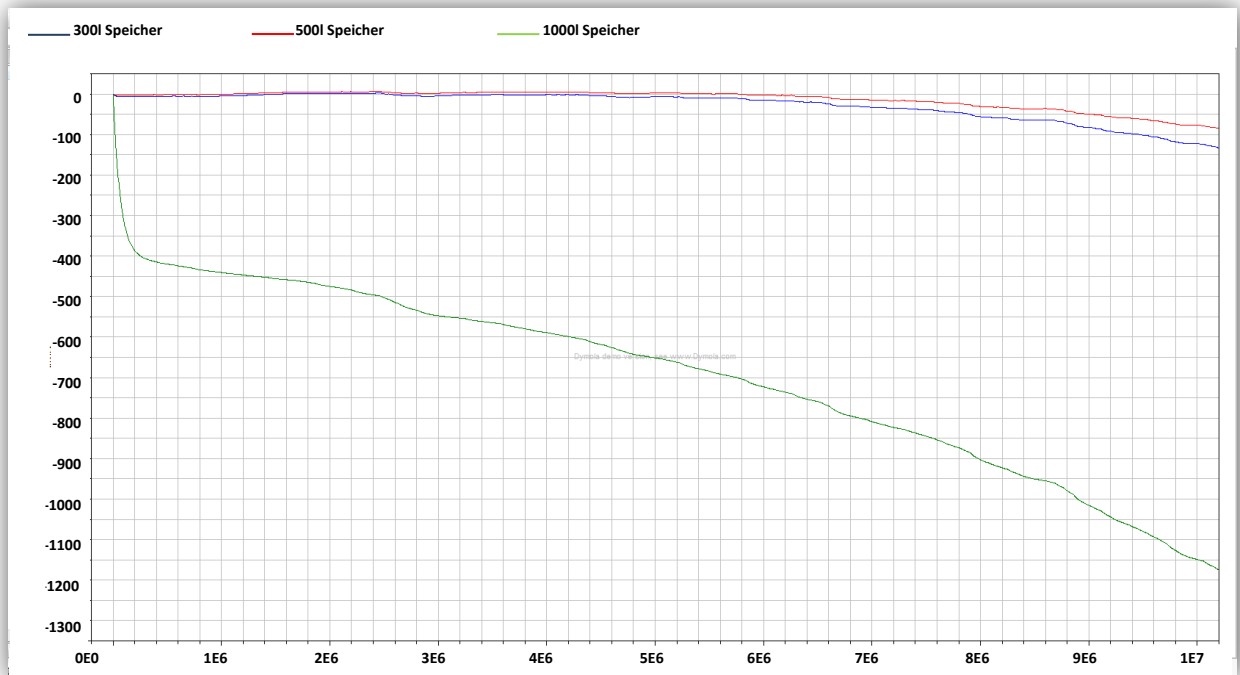


Abbildung 4-15: Speicherverluste in [KWh] bei unterschiedlichen Speichergrößen über die Zeit in Sekunden

Für den Solarkollektor wurden Aperturflächen von 2, 8 und 40 m² simuliert. Mit einer größeren Kollektorfläche steigt die Kollektorleistung, allerdings nehmen auch die Verluste zu. Hier muss auch darauf geachtet werden, dass der Kollektor vernünftig dimensioniert wird, um den Wärmepumpenprozess ausreichend zu versorgen und eine wirtschaftliche solare Warmwasserbereitung sicherzustellen.

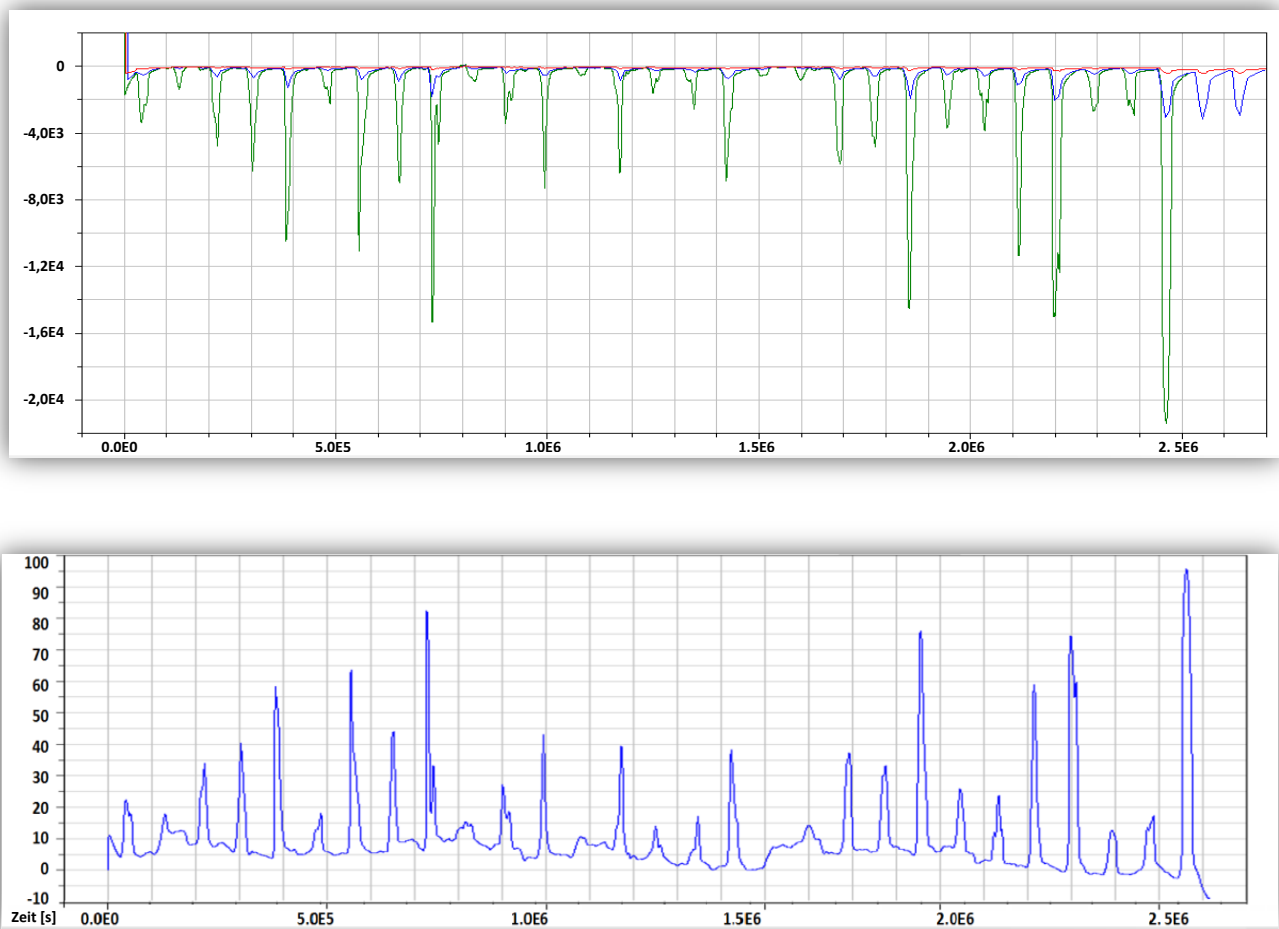


Abbildung 4-16: Kollektorverluste in [W] (oben) und Kollektortemperaturen in [°C] (unten) über die Zeit in [s]

4.3 Validierung der Wärmespeichermodells

Eine weitere zentrale Komponente der Gesamtanlagentechnik ist der Speicher, der sowohl als Pufferspeicher als auch als Trinkwarmwasserspeicher Verwendung findet und in allen Gesamtmodellen mindestens in einer dieser Variantengenutzt wird. Für die Beurteilung des Speichers ist neben den eigentlichen Verlusten durch die Speicherhülle auch die Temperaturverteilung im Speicher von Bedeutung. Diese ist maßgebend für die Nutzbarkeit der gespeicherten Energie.

Zur Validierung des Speichermodells müssen die Randbedingungen des Speichers sehr detailliert bekannt sein. Zu- und Abflussmassenströme sowie deren Temperatur, die Umgebungstemperatur und alle physikalischen Eigenschaften des Speichers

(Abmessungen, Dämmmaterial und -stärke etc.) spielen eine Rolle für das physikalische Verhalten des Speichers.

Um trotz unvollständiger Datensätze diese wichtige Komponente validieren zu können, wird auf einen gut dokumentierten Fall aus der Literatur [Oli 03] zurückgegriffen. Hier wird ein Speicher betrachtet, der zu Beginn eine homogene Temperatur von 82 °C aufweist und anschließend ohne Be- und Entladung abkühlt. Der Aufbau des Speichers und die Positionierung der Temperatursensoren sind bekannt, wodurch ein Vergleich der gemessenen mit den simulierten Daten vorgenommen werden kann. Der als Referenz gewählte Speicher verfügt über 14 Temperaturmessstellen, die in ungleichmäßigen Abständen über der Speicherhöhe verteilt sind. Dies kann durch die Berechnung von 14 Speicherschichten gleicher Höhe abgedeckt werden. In Abbildung 4-17 ist der Temperaturverlauf im Speicher zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Die gemessenen Schichttemperaturen wurden durch Interpolieren der Messwerte der 14 Temperaturmessstellen erzeugt, wodurch für jede Speicherschicht aus der Simulation ein repräsentativer Messwert zur Verfügung steht.

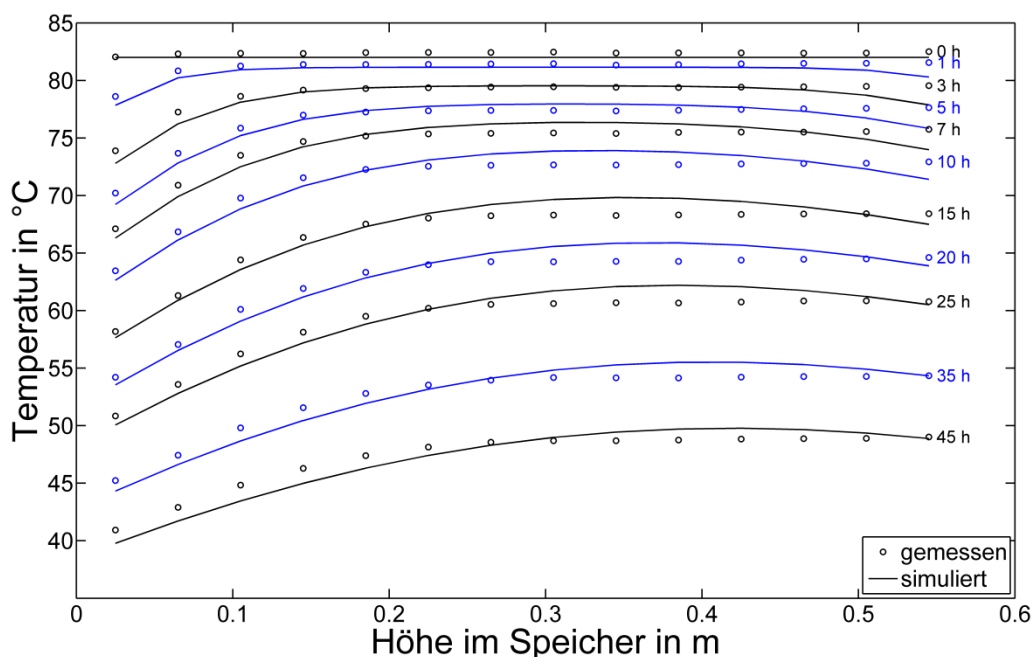


Abbildung 4-17: Verlauf der Temperatur im Speicher über die Höhe zu verschiedenen Zeitpunkten

Der betrachtete Speicher hat ein Fundament, in dem metallische Bauteile durch höhere Wärmeleitfähigkeiten für Wärmeverluste sorgen und somit die Speichertemperatur absenken. Es ist erkennbar, dass sich auf Grund der stärkeren

Abkühlung im unteren Bereich eine Schichtung ausbildet, die über den gesamten Betrachtungszeitraum von 45 Stunden erhalten bleibt. Insgesamt stimmen die simulierten Temperaturen zu den verschiedenen Zeitpunkten sehr gut mit den gemessenen Temperaturen überein. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass das Speichermodell für die Simulation geeignet ist.

4.4 Validierung des Solarkollektormodells

Da für die Einfamilienhausanwendung auch ein Referenzfall unter Berücksichtigung einer solaren Trinkwarmwassererwärmung simuliert werden soll, wird nachfolgend auf die Validierung des Solarkollektormodells eingegangen. Der Vergleich der gemessenen Vorlauftemperatur mit der simulierten Vorlauftemperatur ist in Abbildung 4-18 dargestellt. Auf Grund der großen Auswirkungen der solaren Einstrahlung auf die Vorlauftemperatur sind hier erhebliche Schwankungen erkennbar. Qualitativ zeigen die beiden Kurven jedoch einen sehr ähnlichen Verlauf. Die Strahlungsmessung kann generell mit Unsicherheiten behaftet sein, eine quantitative Bewertung der Abweichungen ist jedoch nicht möglich. Diese möglichen Abweichungen in der Strahlung könnten die Abweichungen in den Temperaturverläufen erklären. Da der qualitative Verlauf der Temperaturen übereinstimmt, wird dieses Modell für die weiteren Simulationen verwendet.

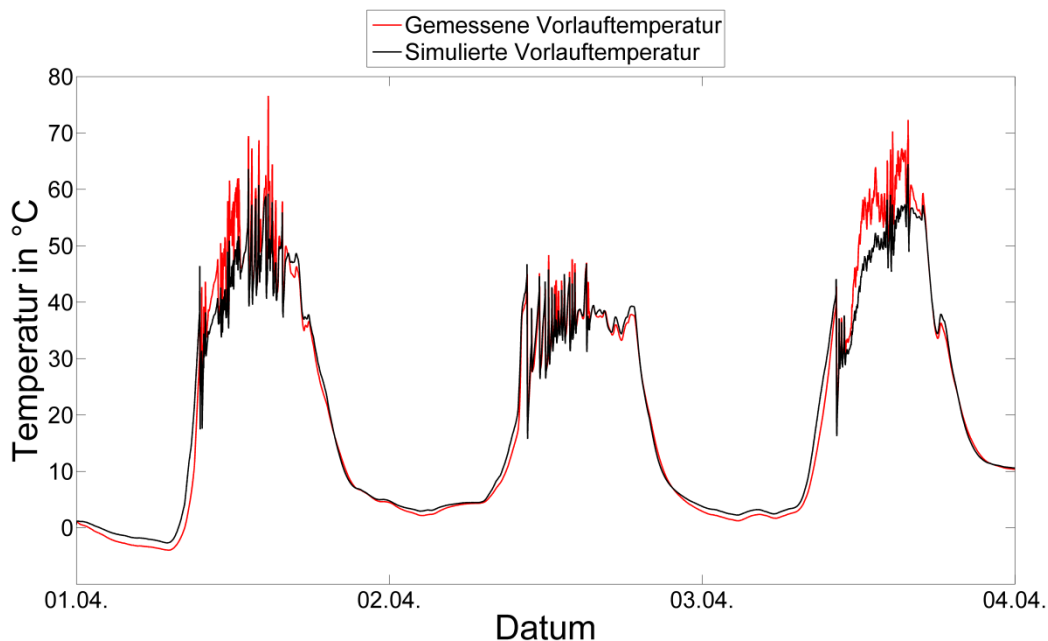


Abbildung 4-18: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Vorlauftemperatur am Solarkollektor

5 Feldtestdatenauswertung

Damit die Aussagekraft der Messdaten aus den Prüfstandmessungen eine Transformation in die Praxis erlangt, wurden Feldtestdaten dieser Anlagen untersucht. Die Feldtestdaten wurden von der Initiative Gaswärmepumpe (IGWP) bereitgestellt. Insgesamt wurden 30 Anlagen im Feld installiert und betrieben. Die Standorte sind in Abbildung 5-1 und Tabelle 5-1 aufgetragen.

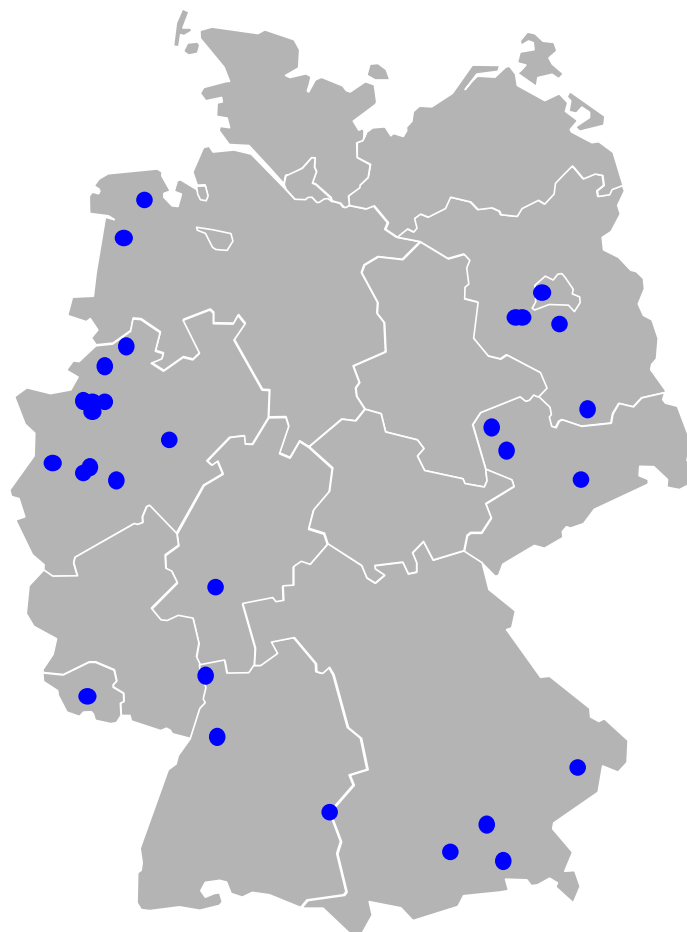


Abbildung 5-1: Standorte der Feldtestanlagen der Gaswärmepumpe zeoTHERM der Firma Vaillant (Quelle: ERG)

Unter dem Dach der IGWP wurden die Feldtests von den Unternehmen ESB, VNG, EWE, E.ON Ruhrgas, MVV, EnBW/ESW, GASAG und RWE in Kooperation mit der Herstellerfirma Vaillant durchgeführt. Die Anlagenverteilung ist in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 5-1: Übersicht der Gerätestandorte

GWP-	Betreiber	Ort	Feldtestphase
1	ESB	Raubling	1

2	VNG	Schkeuditz	1
7	EWE	Westoverledingen-Völlenerfehn	1
8	EWE	Friedeburg-Marx	1
21	E.ON	Langenfeld	1
22	E.ON	Langenfeld	1
23	MVV	Mannheim	1
25	ESB	Ortenburg	1
26	E.ON	Borken	1
27	E.ON	Borken-Marbeck	1
32	RWE	Oberursel	1
38	E.ON	Heiden	1
39	E.ON	Borken-Marbeck	1
40	E.ON	Odenthal-Osenau	1
	EnBW/ESW	Walzbachtal	2
	ESB	Ebersberg	2
	ESB	Geretsried	2
	EWE	Zossen	2
	RWE	Arnsberg	2
	RWE	Mönchengladbach	2
	RWE	Leaden	2
	RWE	Riegelsberg	2
	RWE	Neunkirchen	2
	VNG	Markkleeberg	2
	VNG	Freital	2
	VNG	Werder	2
	VNG	Werder	2
	VNG	Brandenburg/Lachhammer	2
11	EnBW/ESW	Burrieden	1
16	GASAG	Berlin	1

Im Folgenden sind beispielhaft zwei Anlagen aufgeführt.

Die GWP 1 (Abbildung 5-2) befindet sich in Oberbayern und liefert seit Februar 2010 Messdaten. In dem Haus leben drei Personen auf einer Wohnfläche von 130 m². Als Heizungssystem wird eine Fußbodenheizung mit einem 300 l Trinkwasserspeicher eingesetzt.

Die Anlage erreicht einen Anlagennutzungsgrad (Nutz_HG_Solar_oS vgl.

Tabelle 8) von 136 % und erzielt dabei einen regenerativen Deckungsbeitrag von 28 %.



Abbildung 5-2: Feldtestanlage GWP 1

GWP 23 (Abbildung 5-3) befindet sich in Mannheim und wird seit Oktober 2010 messtechnisch kontinuierlich erfasst. In dem Haus leben drei Personen auf einer Wohnfläche von 100 m². Als Heizungssystem wird eine Fußbodenheizung mit einem 300 l Trinkwasserspeicher eingesetzt. Die Anlage erreicht einen Nutzungsgrad (Nutz_HG_Solar_oS vgl. Tabelle 8) von 130 % und erzielt dabei einen regenerativen Deckungsbeitrag von circa 21 %.



Abbildung 5-3: Feldtestanlage GWP 23

Die weiteren Anlagen sind in Anhang A aufgeführt.

Die aus den theoretischen Überlegungen isolierten Einflussgrößen sind in Abbildung 5-4 dargestellt.

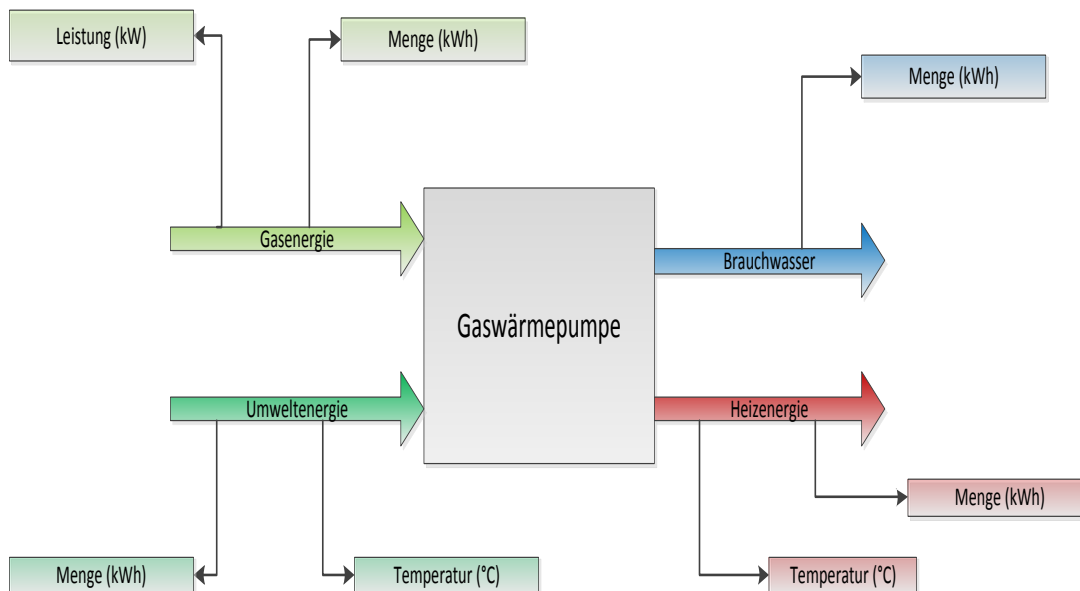


Abbildung 5-4: Einflussgrößen für das System Gaswärmepumpe

Die gasbetriebenen Adsorptionswärmepumpen sind bis auf standortabhängige Unterschiede der Peripherie, wie in Abbildung 5-5 dargestellt ausgeführt und mit Messtechnik ausgestattet.

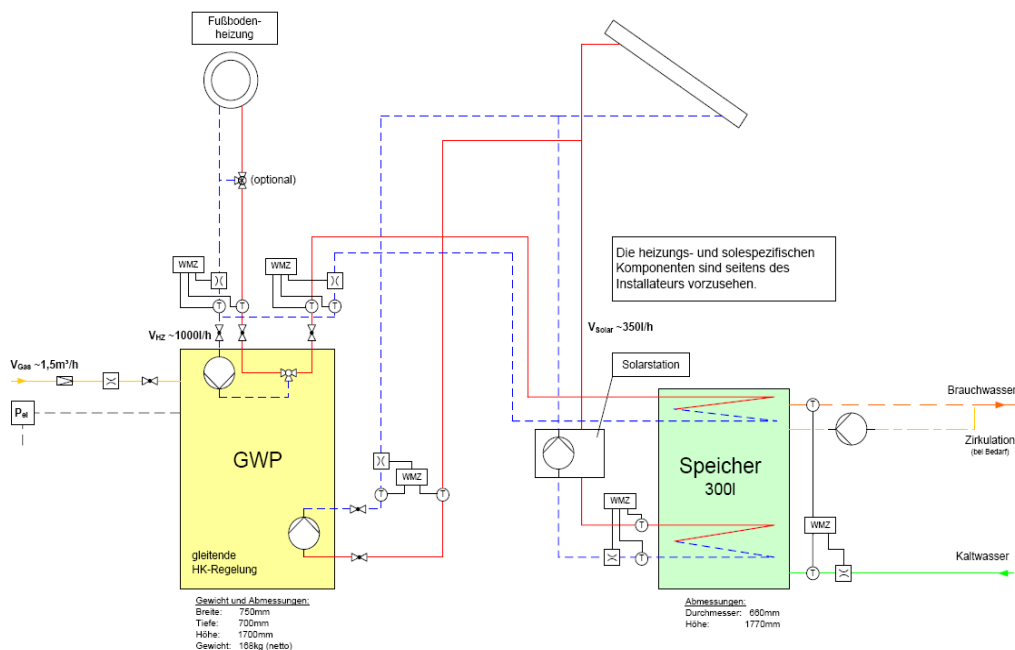


Abbildung 5-5: Anlagenschema (Quelle: IGWP)

In Abstimmung mit dem Hersteller wurde aus dem Anlagenbestand eine Auswahl geeigneter Anlagen für die Betrachtung der Feldtestdaten getroffen. Dazu wurden Anlagenparameter, Störfälle, charakteristische Daten der Gebäude und Nutzer als wesentliche Parameter zur Unterscheidung begutachtet. Dabei wurde auch darauf geachtet, dass die Verteilung der ausgewählten Anlagen das gesamte Bundesgebiet abdeckt. Dies ist bei einer Anlage mit einem solarthermischen Kollektor aufgrund der unterschiedlichen Globalstrahlung von Bedeutung (Vergl. Abbildung 5-7). Die Anlagen GWP 21 und GWP 22 liegen im gleichen Wohngebiet und wurden auf Grund der ähnlichen Gebäude aufgenommen. Durch diese Vorgehensweise ist der Umfang auf neun Gaswärmepumpen benannt worden. Tabelle 5-2 veranschaulicht die Laufzeiten der einzelnen Gaswärmepumpen und den Zeitpunkt des Generationswechsels der Anlagen. Eine sinnvolle Auswerteperiode ergibt sich mit diesen Informationen zwischen Juni 2010 bis einschließlich Mai 2011.

Tabelle 5-2: Messdatenerfassung und Umrüstungszeitpunkte

Bezeichnung	Start Messungen	Generation 4 ab:	Heizperiode 09/10												Heizperiode 10/11												Heizperiode 11/12																			
			Jan 09	Feb 09	März 09	Apr 09	Mai 09	Jun 09	Jul 09	Aug 09	Sep 09	Okt 09	Nov 09	Dez 09	Jan 10	Feb 10	März 10	Apr 10	Mai 10	Jun 10	Jul 10	Aug 10	Sep 10	Okt 10	Nov 10	Dez 10	Jan 11	Feb 11	März 11	Apr 11	Mai 11	Jun 11	Jul 11	Aug 11	Sep 11	Okt 11	Nov 11	Dez 11	Jan 12	Feb 12	März 12	Apr 12				
GWP 01	11.02.2010	17.06.2011																																												
GWP 02	05.10.2009	13.10.2011																																												
GWP 08	16.09.2009	20.10.2011																																												
GWP 11	01.03.2010	20.10.2011																																												
GWP 21	25.06.2009	20.09.2011																																												
GWP 22	01.08.2009	20.09.2011																																												
GWP 23	12.01.2010	19.07.2011																																												
GWP 26	21.08.2009	29.08.2011																																												
GWP 39	01.06.2011	ab Start																																												

Stand: 17.01.2012

gelb = Generation 3; grün = Generation 4; hellere Bereiche bezeichnen unvollständige Monate

Als Bezugs- und Vergleichsgrößen zur Bewertung der Anlagen dienen die Nutzungsgrade. Zum Abgleich des Verständnisses sind in Tabelle 5-3, Tabelle 5-4 und Abbildung 5-6 die Randbedingungen und Berechnungsgrundlagen für die Nutzungsgradbestimmung aufgeführt.

Tabelle 5-3: Zeichen und Operatoren

Zeichen	Beschreibung
$\dot{m}_B H_i$	Brennstoffenergie
\dot{Q}_{HZ}	Wärmestrom an Heizung
\dot{Q}_{SA}	Wärmestrom an Warmwassernetz
\dot{Q}_{Solar}	Wärmestrom Solar an Gesamtsystem
\dot{Q}_{SP}	Wärmestrom Solar an Speicher (Solar direkt Anteil)
\dot{Q}_{SS}	Wärmestrom Sole Solar an Wärmepumpe
$\dot{Q}_{Verluste}$	Wärmeverluststrom
\dot{Q}_{WW}	Wärmestrom aus der Wärmepumpe an Speicher
w_{el}	Elektrische Arbeit

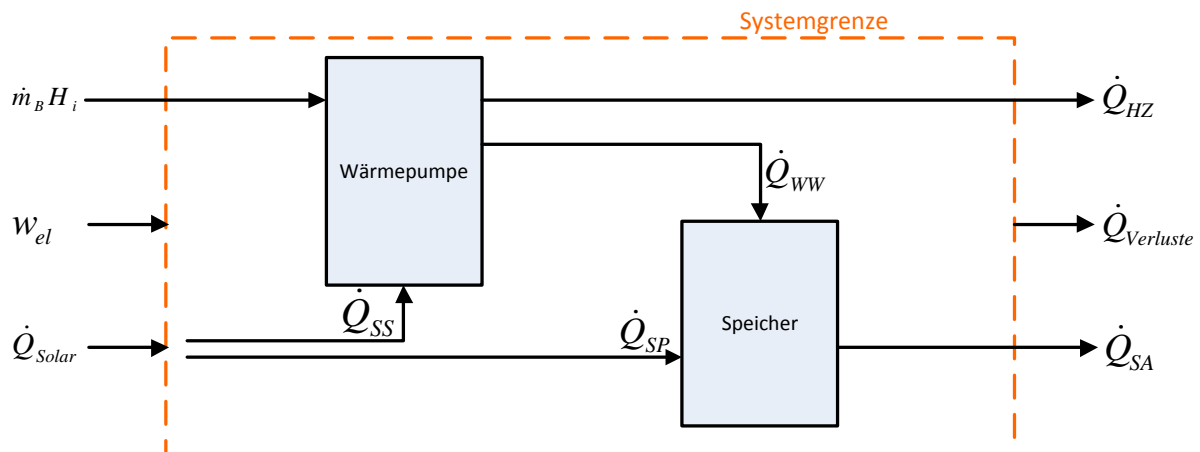


Abbildung 5-6: Schematische Systemdarstellung

Tabelle 5-4: Nomenklatur Nutzungsgrade und Berechnungsgrundlagen

Nutzungsgrad	Berechnungsgrundlage
Systemnutzungsgrad <i>Nutz_Sys_Heiz_WW_oS</i>	$\eta_{SysoS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{SA}}{\dot{m}_B H_i}$
Systemnutzungsgrad mit Strom <i>Nutz_Sys_Heiz_WW_mS</i>	$\eta_{SysmS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{SA}}{\dot{m}_B H_i + w_{el}}$
Heizgerätenutzungsgrad <i>Nutz_HG_oS</i>	$\eta_{HGoS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{WW}}{\dot{m}_B H_i}$
Heizgerätenutzungsgrad mit Strom <i>Nutz_HG_mS</i>	$\eta_{HGmS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{WW}}{\dot{m}_B H_i + w_{el}}$
Anlagennutzungsgrad <i>Nutz_HG_Solar_oS</i>	$\eta_{HGSoS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{WW} + \dot{Q}_{SP}}{\dot{m}_B H_i}$
Anlagennutzungsgrad mit Strom <i>Nutz_HG_Solar_mS</i>	$\eta_{HGSmS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{WW} + \dot{Q}_{SP}}{\dot{m}_B H_i + w_{el}}$

Die Betriebsweisen der Gaswärmepumpen sind von unterschiedlichsten Einflussgrößen abhängig und haben Einfluss auf die Nutzungsgrade der Anlagen. Die Einflussgrößen, die durch die Anlagenbeschaffenheit gegeben sind, sind in Tabelle 5-5 ohne eine Gewichtung aufgeführt. In der darauf folgenden Tabelle 5-6

sind Einflussgrößen und Hilfsgrößen zur Bereinigung dargestellt, die den energetischen Aspekt widerspiegeln. Ebenfalls ist dort als Bewertungsgröße die Differenz zwischen den jeweiligen Jahressystemnutzungsgraden (Nutz_Sys_Heiz_WW_oS) aufgetragen, dabei ist die Anlage GWP 08 mit dem niedrigsten Jahressystemnutzungsgrad die Bezugsgröße. Damit eine Vergleichbarkeit der Anlagen gewährleistet bleibt, auch wenn die Datenlage zum Teil unvollständig ist, sind die Heizwärmebedarfe durch das Verfahren der Heizgradtage bereinigt. Dabei wurde der gemessene Heizwärmebedarf auf die Summe der Heizgradtage desselben Zeitintervalls bezogen und schlussendlich linear auf die gesamten Heizgradtage der Periode extrapoliert (siehe Gleichung 1). Aus gleichem Grund ist die durchschnittliche monatliche Brauchwasserenergie als einheitliche Größe eingeführt worden.

$$Q_{bereinigt} = \frac{Q_{gemessen}}{G_{15,gemessen}} \cdot G_{15,Periode} \quad \text{Gl.1}$$

- $Q_{bereinigt}$: *bereinigte Heizwärme*
- $Q_{gemessen}$: *gemessene Heizwärme der vollständig gemessenen Monate*
- $G_{15,gemessen}$: *Heizgradtage der vollständig gemessenen Monate*
- $G_{15,Periode}$: *Heizgradtage der gesamten Auswerteperiode*

Tabelle 5-5: Einflussgrößen und Anlagenparameter

GWP	Kollektoren	Heizkreis-temperaturen	Heizungsart	Zirkulation	Baujahr	Beheizte Wohnfläche	Dach-Neigung	Dach-Ausrichtung
GWP 01	3x Solar	40/30	FB	Ja	2010	130	28°	S
GWP 02	3x Solar	40/30	FB	Ja	2010 Saniert	106	50°	S
GWP 08	2x Solar 1x Luft		Rad + FB	Ja	1986	125	24°	W
GWP 11	3x Solar	40/30	FB	Ja	2009	180	22	S
GWP 21	3x Solar	40/30	FB	Ja	2009	137	24°	SSO
GWP 22	2x Solar 1x Luft	40/30	FB	Ja	2009	137	24°	SSO
GWP 23	3x Solar	40/30	FB	Ja	2009	100	35	S
GWP 26	3x Solar		Rad+ FB	Ja	2006	180	45°	S
GWP 39	3x Solar	40/30	FB	Nein	2011	130	45	S

Tabelle 5-6: Einflussgrößen und Anlagenparameter

GWP	IWU Theta Außen °C	Heizgradtage		Heizwärme bereinigt		Solare Strahlung kWh/(m ² *a)	Bruchwasser Energie kWh/Monat	Delta Systemnutzungsgrad Sys_Heiz_WW_o5 bezogen auf GWP 08 % -Punkte
		gesamt	bereinigt	absolut	spezifisch			
GWP 01	4,8	2982	2622	7881	61	1111	57	26%
GWP 02	4,9	2482	2178	7951	75	1071	71	15%
GWP 08	5,9	2392	2392	10123	81	1071	68	0%
GWP 11	5,8	2307	2307	11026	61	1111	179	23%
GWP 21	6,1	2044	1535	7569	55	1051	114	33%
GWP 22	6,1	2044	1167	7136	52	1051	92	25%
GWP 23	6,0	2045	1991	6538	65	1091	178	37%
GWP 26	6,1	2044	2044	16928	94	1031	138	21%
GWP 39	6,1	2044	2044			1031		

Die Differenzen der Systemnutzungsgrade aus Tabelle 5-6 bezogen auf die GWP 08 liegen zwischen 15°% und 37 %-Punkten. Die Abweichungen setzen sich aus einer Fortpflanzung und gegenseitiger Beeinflussung der aufgeführten Größen zusammen. Die solare Strahlung als Einflussgröße ist standortabhängig. Als Übersicht sind die Anlagenstandorte in Abbildung 5-7 in die Jahresstrahlungskarte des Deutschen Wetterdienstes eingetragen. Neben diesen Einflussgrößen tragen die Einstellungen der Gaswärmepumpen zu einer Veränderung der Betriebsweise und folglich zu einer Veränderung der Nutzungsgrade bei.

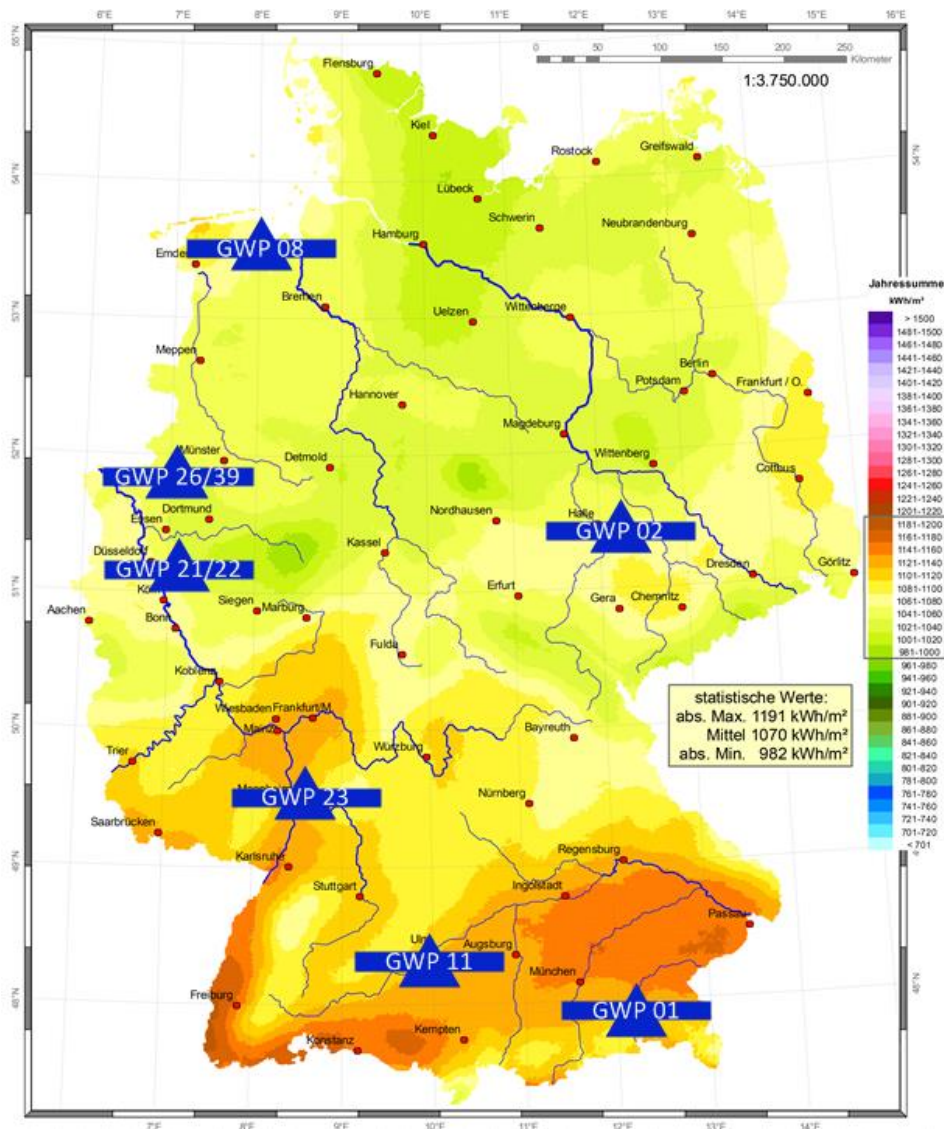


Abbildung 5-7: Standorte der GWP auf der Jahresstrahlungskarte

Bevor eine Betrachtung der Nutzungsgrade erfolgt, werden die Betriebsweisen der Gaswärmepumpen untersucht, um Korrelationen zu den Nutzungsgraden herstellen zu können. Eine Übersicht der Vorgehensweise zur Untersuchung der Gaswärmepumpen geben unter anderem Diagramme, wie in Abbildung 5-8 exemplarisch für die Gaswärmepumpe 11 dargestellt. Dabei sind die Energien nach Herkunft und Verwendung getrennt und in monatlicher Abstufung summiert aufgetragen. Verläufe der wesentlichen Systemtemperaturen sind ebenfalls als Monatsmittel über die Periode dargestellt.

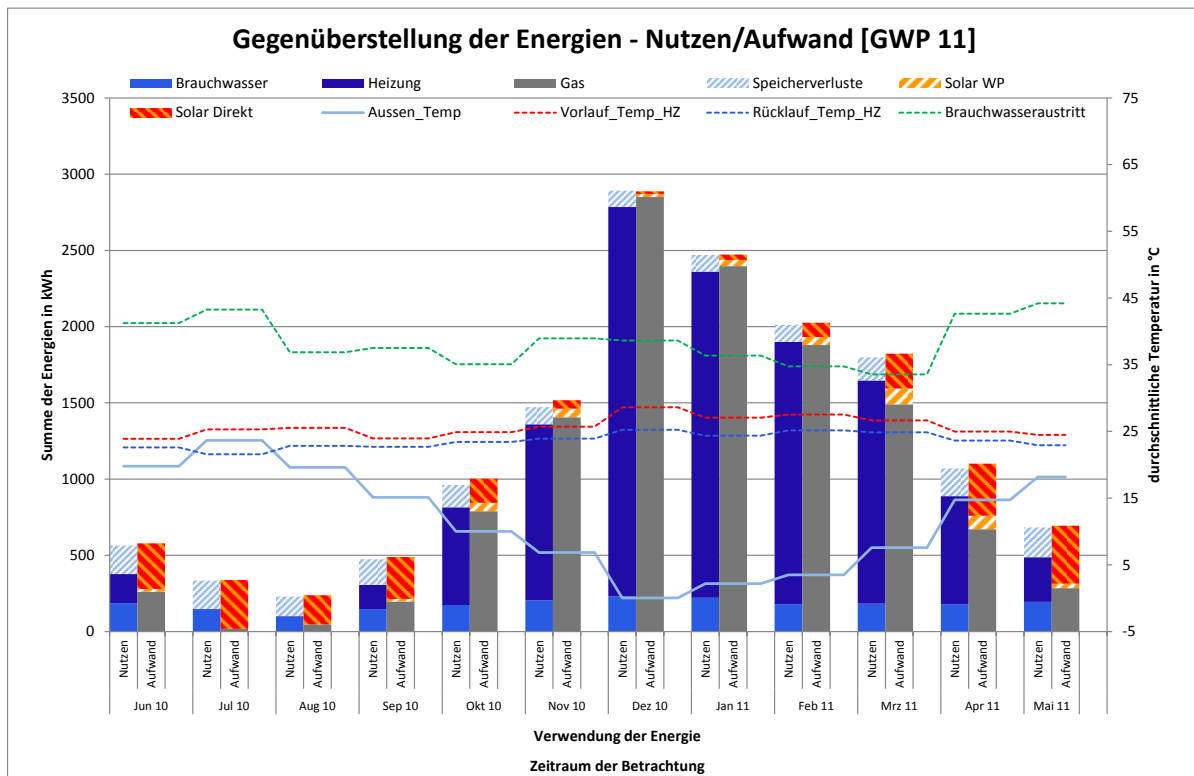


Abbildung 5-8: Summe der Energien und Verläufe der Temperaturen über die Periode; GWP 11

Eine eindeutige Differenzierung der Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Anlageneffizienz ließ sich aufgrund der großen Anzahl an Einflussgrößen nicht definieren. Die Gegenüberstellung der Energien verdeutlicht jedoch den systembedingten Zusammenhang, dass mit sinkender Außentemperatur und folglich steigendem Heizwärmebedarf sowie zeitlich begründet sinkendem Eintrag der solaren Strahlung der Anteil der solaren Direktnutzung stärker abnimmt als der in der Wärmepumpe genutzte solare Anteil.

Aus den Betrachtungen wurde die Komplexität der Zusammenhänge deutlich. Die einzelnen Faktoren beeinflussen sich gegenseitig in unterschiedlich starkem Maß, deren Abhängigkeiten und Auswirkungen auf die Anlageneffizienz lassen sich durch Simulationen besser abbilden als durch eine Verknüpfung der Ergebnisse aus den Felduntersuchungen. Zusammenfassend gilt zu sagen, dass grundsätzlich eine breite Streuung der Systemnutzungsgrade besteht und eine Reduktion der Streuungsbreite erzielt wird, sobald der Speicher aus dem Bilanzkreis entfällt. Daran ist zu erkennen, dass das Nutzerverhalten und die Verzögerungsfähigkeit des Speichers großen Einfluss auf die Nutzungsgrade aufweisen. Für einen Vergleich der Anlagen ist der Anlagennutzungsgrad zu bevorzugen.

Systeme mit einem Luftkollektor und zwei Solarkollektoren bieten nicht die erwarteten Verbesserungen im Vergleich zu den Systemen mit drei Solarkollektoren. Der dritte Solarkollektor sorgt sogar für eine verbesserte solare Brauchwasserbereitung.

Mit steigendem solarem Anteil an der Energiebereitstellung der Anlage sind hohe Anlagennutzungsgrade erzielbar. Diese stammen in der dritten Generation der Gaswärmepumpe größten Teils aus der Brauchwasserbereitung. In der vierten Generation sind weitere Steigerungen in diesen Bereichen zu erwarten, da eine zusätzliche solare Heizungsunterstützung zum Einsatz kommt.

Aus dem Vergleich der theoretisch und praktisch ermittelten Anlagennutzungsgrade ist ein qualitativ zutreffender Verlauf ermittelt worden. Damit erweist sich das System als relativ robust und auch durch Einflüsse im Feld kann das System eine gute Effizienz erzielen. Zusammen mit der Tatsache, dass während des gesamten Feldtest über zwei Jahre nur wenige Störungen auftraten, bestätigt sich die Betriebssicherheit des Systems.

Vergleich System- und Anlagennutzungsgrad

In Betrachtung der Nutzungsgrade der ausgewählten Anlagen lassen sich jedoch Parallelitäten erkennen. In folgender Abbildung 5-10 sind jeweils die täglichen Anlagennutzungsgrade (Nutz_HG_Solar_oS, Vergleich Tabelle 5-4) der Gaswärmepumpen über den Gasanteil am gesamten Energieeintrag exklusive Strom aufgetragen. Auffällig sind der geordnete Verlauf der Anlagennutzungsgrade und der deutliche Anstieg in Richtung eines geringeren Gasanteils. Dabei ist zu beachten dass hierbei der Solareintrag zu hohen Nutzungsgraden führen kann. Bei einer Nutzung der solaren Warmwasserbereitung ohne Heizwärmebedarf, kann der Energiebedarf durch Umweltwärme gedeckt werden und der Nutzungsgrad geht gegen unendlich.

$$\eta_{HGSoS} = \frac{\dot{Q}_{SP} + \dot{Q}_{WW} + \dot{Q}_{HZ}}{\dot{m}_B H_i}$$

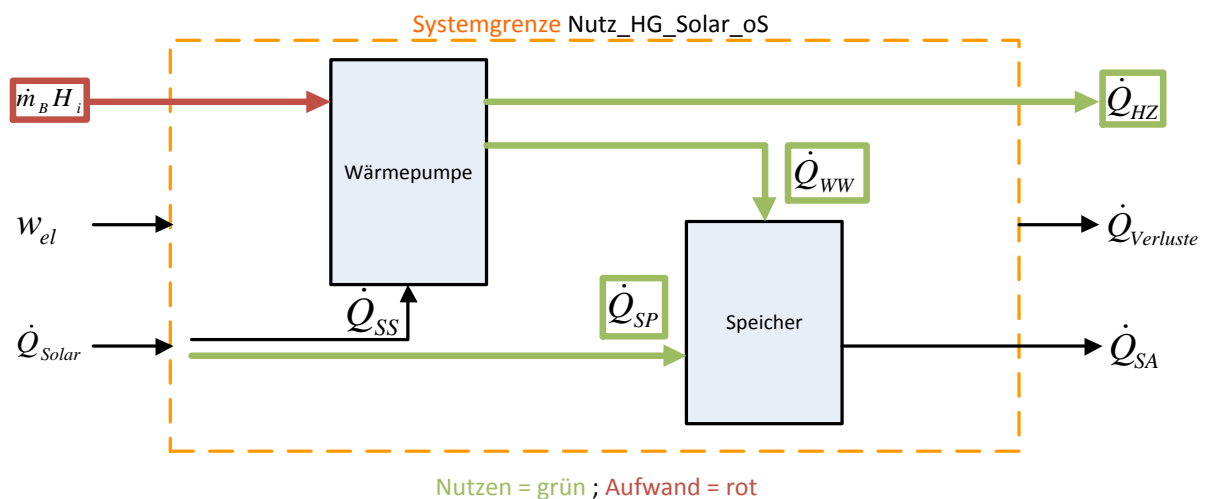


Abbildung 5-9: Visualisierung zum Anlagennutzungsgrad „Nutz_HG_Solar_oS“

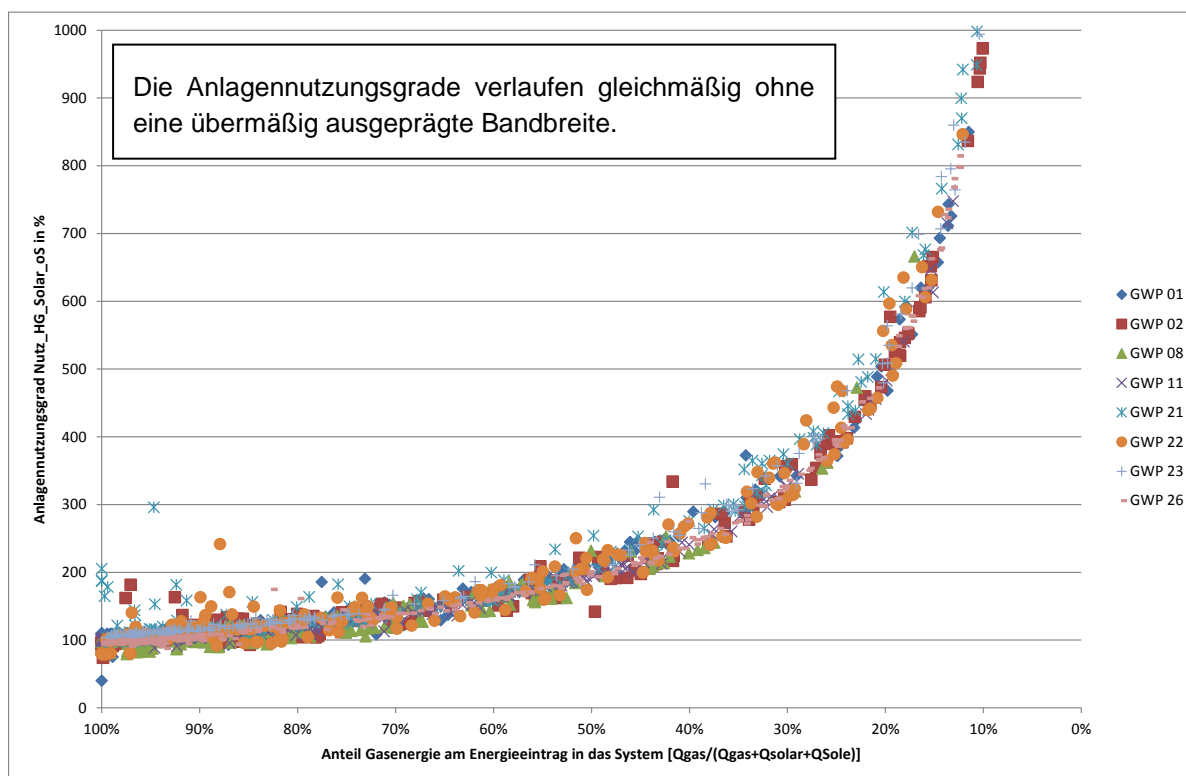


Abbildung 5-10: Tageswerte der Anlagennutzungsgrade "Nutz_HG_Solar_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie

In folgender Abbildung 5-12 ist in gleicher Weise der Systemnutzungsgrad aufgetragen (Nutz_Sys_Heiz_WW_oS, Vergleich Tabelle 5-4). Auffällig ist hierbei eine deutlich vergrößerte Streuung der gemessenen Nutzungsgrade im Vergleich zu dem zuvor in Abbildung 10 dargestellten Anlagennutzungsgrad der Heizgeräte inklusive der solaren Direktnutzung. Dadurch, dass in dem Systemnutzungsgrad der Speicher mit berücksichtigt wird, ist sowohl das Nutzerverhalten als auch die zeitliche Verschiebung von Nutzen und Aufwand inbegriffen. Ebenso ist der Anstieg der Systemnutzungsgrade in Richtung geringerer Gasanteile schwächer ausgeprägt, da die solare Direktnutzung nur indirekt über die Brauchwasser Zapfung in der Berechnung des Systemnutzungsgrades berücksichtigt wird. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die Erweiterung der Systemgrenzen zu einer verstärkten Unordnung der Nutzungsgrade führt.

$$\eta_{SysoS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{SA}}{\dot{m}_B H_i}$$

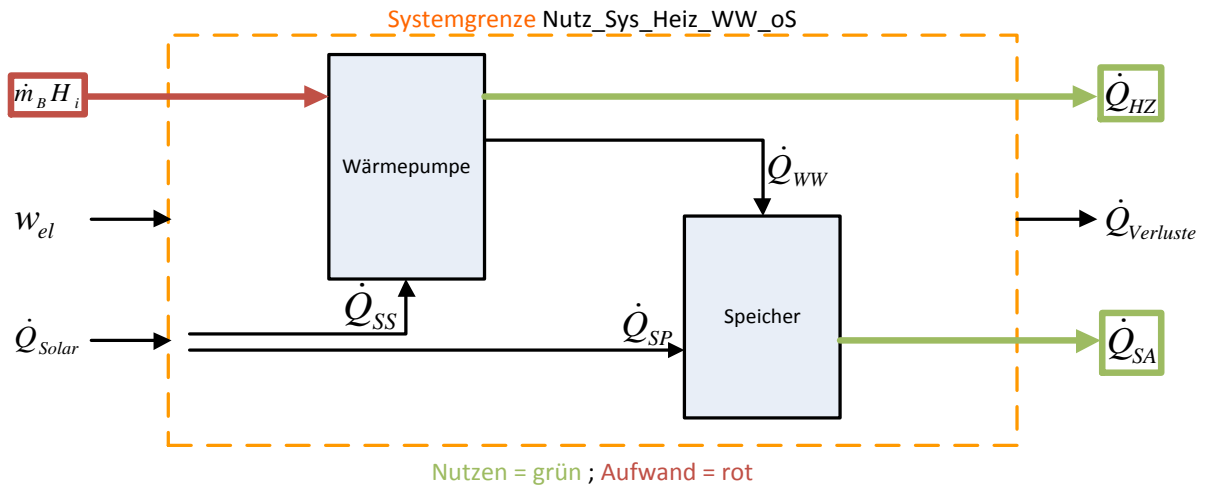


Abbildung 5-11: Visualisierung zum Systemnutzungsgrad „Nutz_Sys_Heiz_WW_oS“

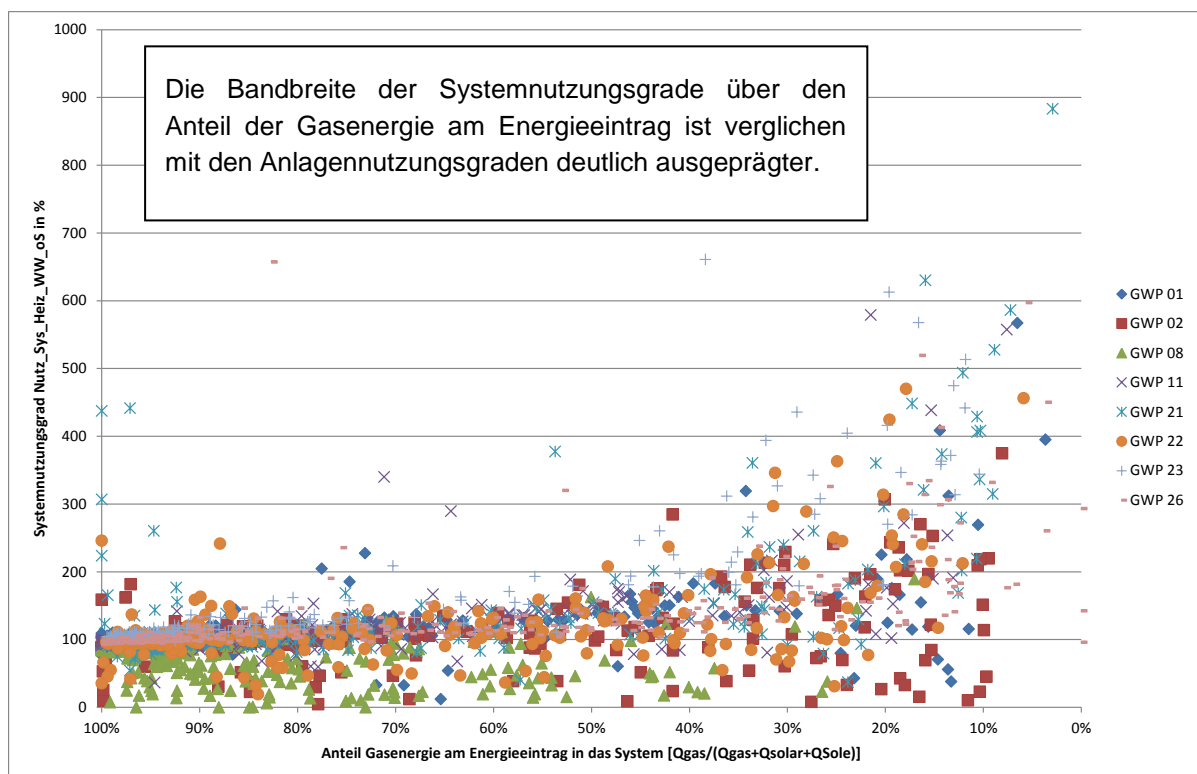


Abbildung 5-12: Tageswerte der Systemnutzungsgrade "Nutz_Sys_Heiz_WW_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie

Die breite Streuung der Systemnutzungsgrade kann reduziert werden, indem der Speicher aus dem Bilanzkreis entfernt wird. Für weitere Betrachtungen ist daher der Anlagennutzungsgrad zu bevorzugen.

Vergleich Anlagen- und Heizgerätenutzungsgrad

Vergleicht man den Verlauf aus Abbildung 5-10 (Anlagennutzungsgrad; Nutz_HG_Solar_oS) mit dem reinen Heizgerätenutzungsgrad siehe Abbildung 5-14, wird der Anteil der solaren Brauchwasserbereitung deutlich. Die Differenz zwischen diesen Nutzungsgraden wird in der dritten Generation der Wärmepumpe ausschließlich durch die solare Brauchwasserbereitung erzeugt. Mit sinkendem Gasanteil an dem gesamten Energieeintrag in das System exklusiv elektrischer Energie steigen die Anlagennutzungsgrade unter Berücksichtigung der solaren Strahlungsenergie deutlich steiler an. In der neuesten Generation vier der Gaswärmepumpen ist mit einem zusätzlichen Nutzen in diesem Bereich zu rechnen, da anteilig die solare Strahlung für die Heizungsunterstützung verwendet wird. Zu beachten ist, dass die zeitliche Auflösung zu Ausreißern in der Darstellung führen kann. Energie, die am Vortag zugeführt wurde, kann unter Umständen am Folgetag genutzt werden, so dass auch bei einem normalen Betrieb höhere Nutzungsgrade auftreten können. Bei den folgenden Grafiken soll der Verlauf im Vordergrund stehen, einzelne Punkte können durch die zeitliche Auflösung oder Fehler in der Messdatenerfassung über oder unterhalb liegen.

$$\eta_{HGoS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{WW}}{\dot{m}_B H_i}$$

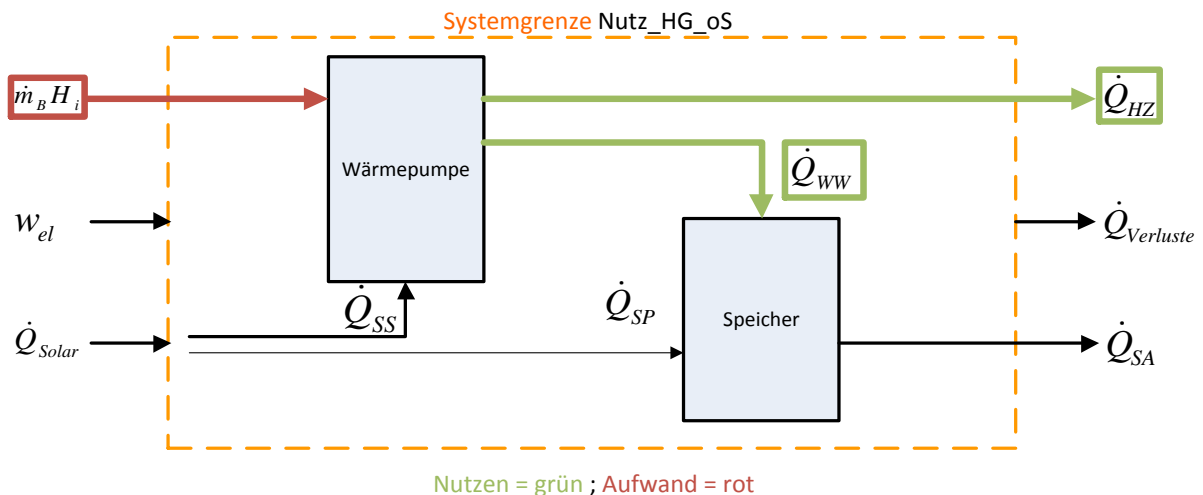


Abbildung 5-13: Visualisierung zum Heizgerätenutzungsgrad „Nutz_HG_oS“

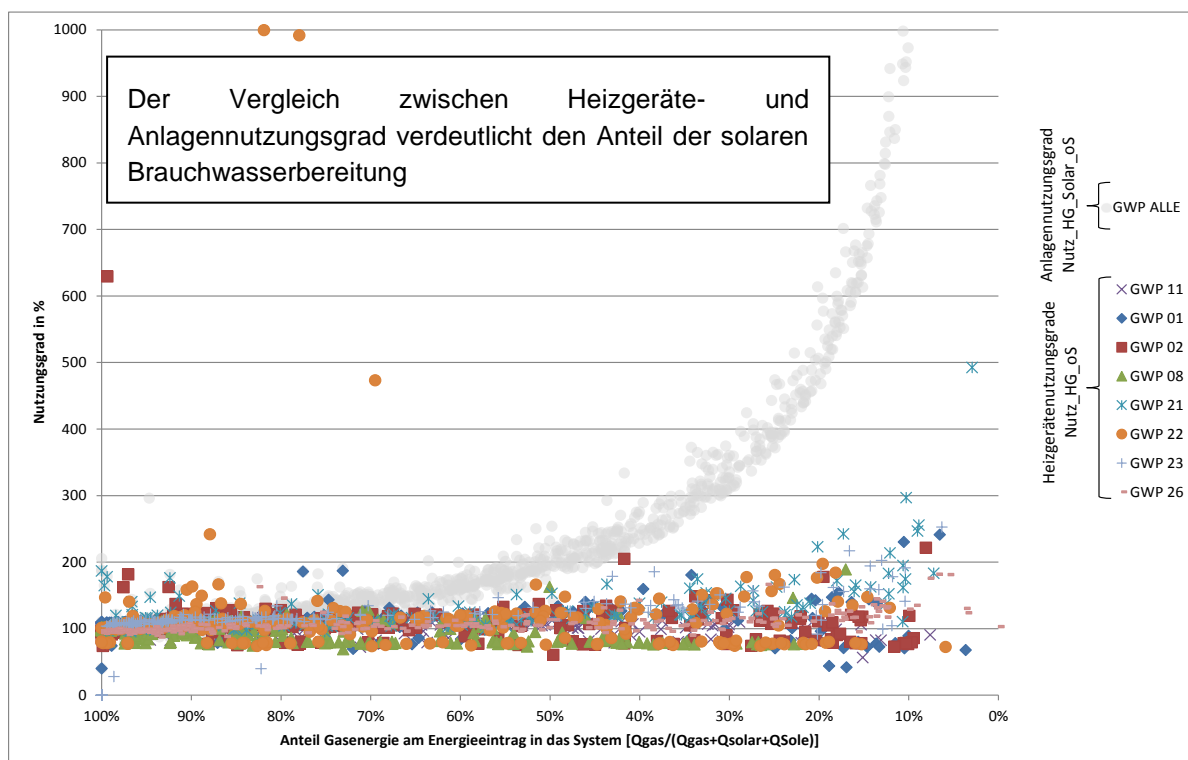


Abbildung 5-14: Tageswerte der Heizgerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie

Zudem ist zu erkennen, dass trotz der reinen Betrachtung des Heizgerätes die Heizgerätenutzungsgrade mit sinkendem Anteil der Gasenergie ansteigen. Dazu dient verdeutlichend Abbildung 5-15, die eine Vergrößerung der Abbildung 5-14 darstellt.

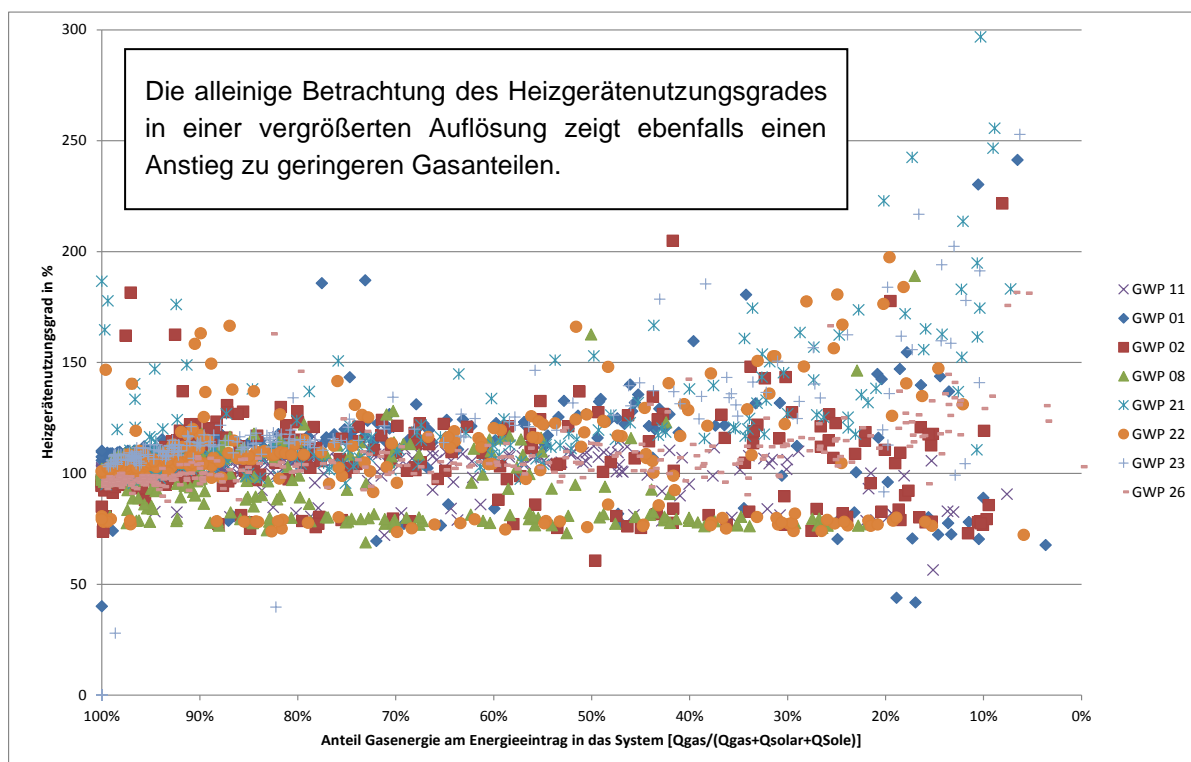


Abbildung 5-15: Tageswerte der Heizgerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie (vergrößert)

Mit steigendem solaren Anteil an der Energiebereitstellung sind hohe Anlagennutzungsgrade erzielbar, diese werden größten Teils durch die solare Brauchwasserbereitung erzeugt.

Vergleich Luft- und Solarkollektoren

Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17 stellen die Systeme mit unterschiedlichen Kollektortypen dar. In der erstgenannten sind zwei Anlagen mit drei Solarkollektoren dargestellt und in der folgenden Darstellung zwei Anlagen mit jeweils zwei Solar- und einem Luftkollektor. In dem direkten Vergleich dieser zwei Abbildungen fällt auf, dass in den Bereichen mit verstärktem Gaseinsatz die Verläufe der Anlagennutzungsgrade näherungsweise identisch verlaufen. Die Hauptintention für die Verwendung von Luftkollektoren war es, gerade in diesen Bereichen höhere Soletemperaturen zu strahlungsarmen Tageszeiten zu erreichen und somit eine Verbesserung zu erzielen. Dies kann durch die Ergebnisse dieser Feldtestdaten nicht bestätigt werden. Auffällig ist zudem, dass durch den Verzicht auf einen Solarkollektor der Anlagennutzungsgrad für Bereiche mit überwiegender Brauchwassererwärmung bzw. niedrigeren Gasanteilen niedriger ausfällt.

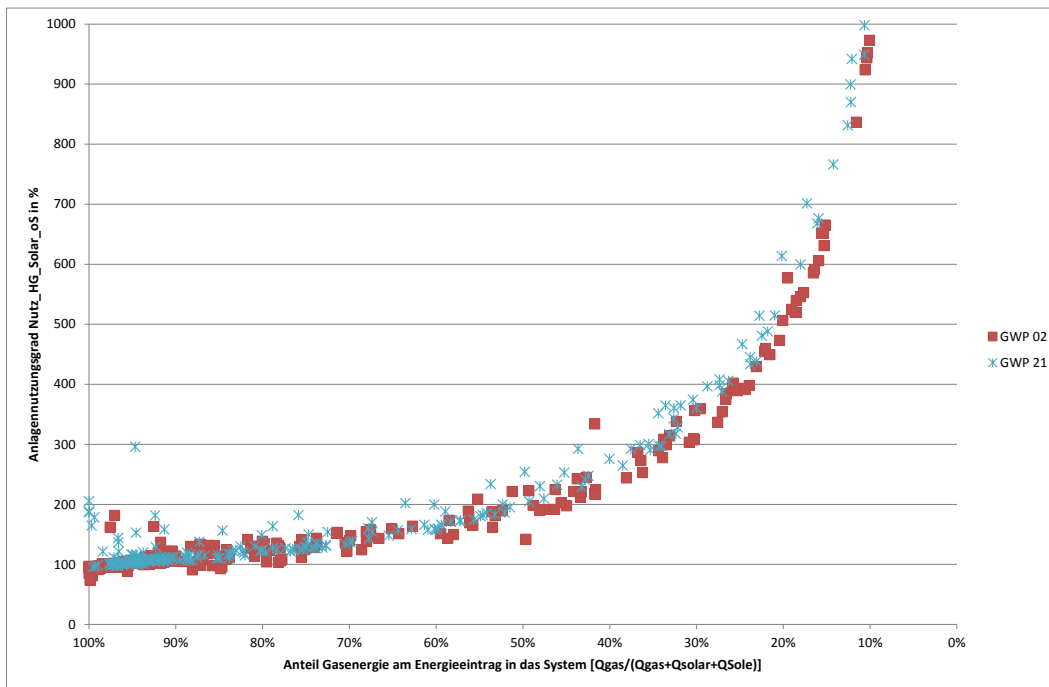


Abbildung 5-16: Tageswerte der Anlagennutzungsgrade "Nutz_HG_Solar_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie — Anlagen mit drei Solarkollektoren

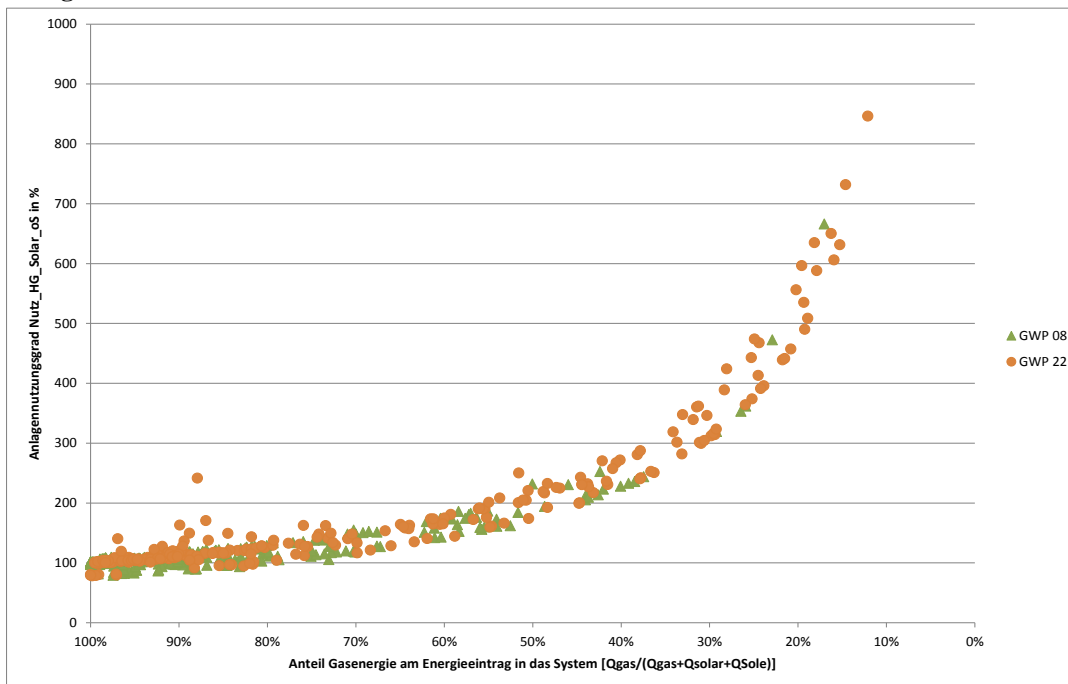


Abbildung 5-17: Tageswerte der Anlagennutzungsgrade "Nutz_HG_Solar_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie — Anlagen mit zwei Solar- und einem Luftkollektor —

Systeme mit einem Luftkollektor und zwei Solarkollektoren bieten nicht die erwarteten Effizienzsteigerungen im Vergleich zu Systemen mit drei Solarkollektoren.

Abhängigkeit der Effizienz von der Gebäudeheizlast

Ein weiterer Aspekt bei der Auswertung der Feldtestdaten ist der Vergleich der Anlagennutzungsgrade aus den Felduntersuchungen mit den theoretisch ermittelten und erwarteten Anlagennutzungsgraden. Eine theoretische Berechnung des Jahresanlagennutzungsgrades der thermisch betriebenen Gaswärmepumpe wird mittels des Verfahrens aus der VDI 4650 Blatt 2 11.2010 durchgeführt und stellt eine Erwartungsgröße für die im Feld betriebenen Anlagen dar. Dazu wird eine Gebäudeheizlast als Referenzgröße herangezogen, um den Einsatz des jeweiligen Gerätes unter diesen Bedingungen mittels eines Jahresanlagennutzungsgrades zu bewerten.

Zur Ermittlung der Gebäudeheizlasten der Feldobjekte wurden die Daten begutachtet, dabei konnten aufgrund der Diskontinuität des Wärmepumpenprozesses keine Aussagen bezüglich der Gebäudeheizlast getroffen werden, da die maximale abgefragte Leistung nicht der Gebäudeheizlast entspricht. Als eine alternative Lösung wurde die verrichtete Arbeit der Periode mit einem Auslastungsfaktor von 20 % versehen, sodass schließlich eine Heizlast überschlägig ermittelt werden konnte¹.

In Abbildung 5-18 ist dieser Vergleich visualisiert. Tendenzen im Vergleich zu den VDI Werten sind zu erkennen. Die Abweichung zwischen den Daten aus dem Feld und den Daten, die durch die VDI 4650 Blatt 2 11.2010 ermittelt wurden, lassen sich nicht eindeutig beziffern, weil die Datenqualität keine eindeutige Aussage über den Betriebsparameter der Gaswärmepumpe liefert². Hervorzuheben ist, dass die Verläufe der Ausgleichsfunktionen qualitativ näherungsweise parallel verlaufen. Gründe für die quantitativen Unterschiede sind unter anderem die unterschiedlichen Systemtemperaturen und der solare Deckungsanteil, sowie die Betriebseinflüsse die durch den Feldbetrieb gegeben sind.

¹ Vgl. Prof. Dr.-Ing. Helmut Burger, Überschlägige Ermittlung der erforderlichen Kesselleistung.

² Die hier betrachtete Gaswärmepumpe arbeitet in vier unterschiedlichen Betriebszuständen bzw. Parametern, dabei wird zwischen dem reinen Wärmepumpenbetrieb und dem reinen Brennwertbetrieb in vier Abstufungen variiert.

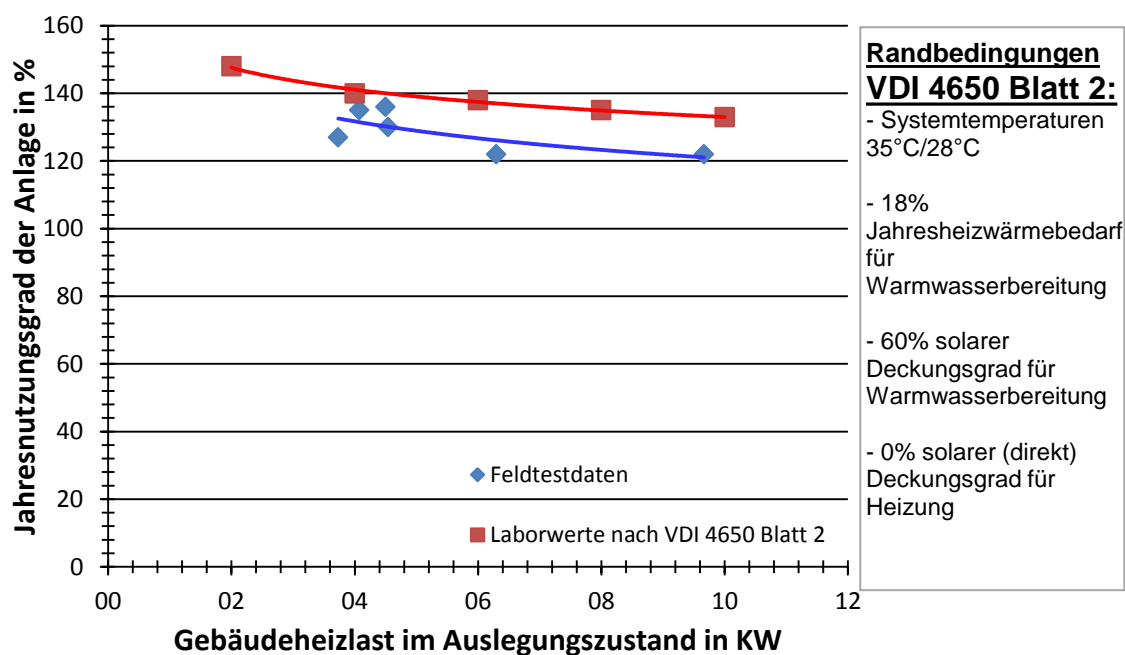


Abbildung 5-18: Gegenüberstellung der Feldtestdaten und der Erwartungswerte

Theorie und Daten aus den Felduntersuchungen stimmen qualitativ überein. Die Abweichungen von circa zehn Prozent sind aufgrund der getroffenen Annahmen und der nicht berücksichtigten Einflussgrößen als gering zu bezeichnen.

Vergleichender Anlagenüberblick

In den folgenden Matrizen (Tabelle 5-8 bis Tabelle 5-14) sind die unterschiedlichen Einflussgrößen jeder Anlage zueinander in Relation gesetzt. Dies stellt eine weitere Übersicht dar, welche die einzelnen Punkte aus Abbildung 5-8 mit beeinflussen und sollen einen weiteren Überblick geben. Für GWP 39 waren für den Auswertungszeitraum keine Daten verfügbar.

Tabelle 5-7: Matrix Nutz_Sys_Heiz_WW_oS

Anlagen aus Spalte X haben einen höheren/geringeren Nutzungsgrad (in Prozent) als Anlagen aus Zeile Y (Bezugsgröße = Y)										
Nutz_Sys_Heiz_WW_oS		Y								
		GWP 01	GWP 02	GWP 08	GWP 11	GWP 21	GWP 22	GWP 23	GWP 26	GWP 39
X	GWP 01	0%	12%	32%	3%	-5%	1%	-8%	5%	
	GWP 02	-10%	0%	18%	-8%	-15%	-9%	-18%	-6%	
	GWP 08	-24%	-15%	0%	-22%	-28%	-23%	-30%	-20%	
	GWP 11	-3%	9%	28%	0%	-8%	-1%	-11%	2%	
	GWP 21	5%	18%	39%	9%	0%	7%	-3%	11%	
	GWP 22	-1%	10%	30%	1%	-7%	0%	-10%	3%	
	GWP 23	9%	22%	44%	12%	4%	11%	0%	15%	
	GWP 26	-5%	6%	25%	-2%	-10%	-3%	-13%	0%	
	GWP 39									

Tabelle 5-8: Matrix beheizte Wohnfläche

Anlagen aus Spalte X haben eine höhere/geringere beheizte Wohnfläche (in Prozent) als Anlagen aus der Zeile Y (Bezugsgröße = Y)										
beheizte WFL		Y								
		GWP 01	GWP 02	GWP 08	GWP 11	GWP 21	GWP 22	GWP 23	GWP 26	GWP 39
X	GWP 01	0%	23%	4%	-28%	-5%	-5%	30%	-28%	0%
	GWP 02		0%	-15%	-41%	-23%	-23%	6%	-41%	-18%
	GWP 08		18%	0%	-31%	-9%	-9%	25%	-31%	-4%
	GWP 11		70%	44%	0%	31%	31%	80%	0%	38%
	GWP 21		29%	10%	-24%	0%	0%	37%	-24%	5%
	GWP 22		29%	10%	-24%	0%	0%	37%	-24%	5%
	GWP 23		-6%	-20%	-44%	-27%	-27%	0%	-44%	-23%
	GWP 26		70%	44%	0%	31%	31%	80%	0%	38%
	GWP 39		23%	4%	-28%	-5%	-5%	30%	-28%	0%

Tabelle 5-9: Matrix Außentemperatur

Anlagen aus Spalte X haben eine höhere/geringere Außentemperatur (in Prozent) als Anlagen aus der Zeile Y (Bezugsgröße = Y)										
Außentemperatur		Y								
		GWP 01	GWP 02	GWP 08	GWP 11	GWP 21	GWP 22	GWP 23	GWP 26	GWP 39
X	GWP 01	0%	-2%	-19%	-17%	-21%	-21%	-20%	-21%	-21%
	GWP 02	2%	0%	-17%	-16%	-20%	-20%	-18%	-20%	-20%
	GWP 08	23%	20%	0%	2%	-3%	-3%	-2%	-3%	-3%
	GWP 11	21%	18%	-2%	0%	-5%	-5%	-3%	-5%	-5%
	GWP 21	27%	24%	3%	5%	0%	0%	2%	0%	0%
	GWP 22	27%	24%	3%	5%	0%	0%	2%	0%	0%
	GWP 23	25%	22%	2%	3%	-2%	-2%	0%	-2%	-2%
	GWP 26	27%	24%	3%	5%	0%	0%	2%	0%	0%
	GWP 39	27%	24%	3%	5%	0%	0%	2%	0%	0%

Tabelle 5-10: Matrix bereinigter Heizwärmebedarf absolut

Anlagen aus Spalte X haben einen höheren/geringeren Heizwärmebedarf (in Prozent) als Anlagen aus der Zeile Y (Bezugsgröße = Y)										
Heizwärme bereinigt absolut		Y								
		GWP 01	GWP 02	GWP 08	GWP 11	GWP 21	GWP 22	GWP 23	GWP 26	GWP 39
X	GWP 01	0%	-1%	-22%	-29%	4%	10%	21%	-53%	
	GWP 02	1%	0%	-21%	-28%	5%	11%	22%	-53%	
	GWP 08	28%	27%	0%	-8%	34%	42%	55%	-40%	
	GWP 11	40%	39%	9%	0%	46%	55%	69%	-35%	
	GWP 21	-4%	-5%	-25%	-31%	0%	6%	16%	-55%	
	GWP 22	-9%	-10%	-30%	-35%	-6%	0%	9%	-58%	
	GWP 23	-17%	-18%	-35%	-41%	-14%	-8%	0%	-61%	
	GWP 26	115%	113%	67%	54%	124%	137%	159%	0%	
	GWP 39									

Tabelle 5-11: Matrix bereinigter Heizwärmebedarf spezifisch

Anlagen aus Spalte X haben einen höheren/geringeren Heizwärmebedarf (in Prozent) als Anlagen aus der Zeile Y (Bezugsgröße = Y)										
Heizwärme bereinigt spezifisch		Y								
		GWP 01	GWP 02	GWP 08	GWP 11	GWP 21	GWP 22	GWP 23	GWP 26	GWP 39
X	GWP 01	0%	-19%	-25%	-1%	10%	16%	-7%	-36%	
	GWP 02		0%	-7%	22%	36%	44%	15%	-20%	
	GWP 08		8%	0%	32%	47%	55%	24%	-14%	
	GWP 11		-18%	-24%	0%	11%	18%	-6%	-35%	
	GWP 21		-26%	-32%	-10%	0%	6%	-15%	-41%	
	GWP 22		-31%	-36%	-15%	-6%	0%	-20%	-45%	
	GWP 23		-13%	-19%	7%	18%	26%	0%	-30%	
	GWP 26		25%	16%	54%	70%	81%	44%	0%	
	GWP 39									

Tabelle 5-12: Matrix solare Strahlung

Anlagen aus Spalte X haben eine höhere/geringere solare Strahlung (in Prozent) als Anlagen aus der Zeile Y (Bezugsgröße = Y)										
solare Strahlung		Y								
		GWP 01	GWP 02	GWP 08	GWP 11	GWP 21	GWP 22	GWP 23	GWP 26	GWP 39
X	GWP 01	0%	4%	4%	0%	6%	6%	2%	8%	8%
	GWP 02	-4%	0%	0%	-4%	2%	2%	-2%	4%	4%
	GWP 08	-4%	0%	0%	-4%	2%	2%	-2%	4%	4%
	GWP 11	0%	4%	4%	0%	6%	6%	2%	8%	8%
	GWP 21	-5%	-2%	-2%	-5%	0%	0%	-4%	2%	2%
	GWP 22	-5%	-2%	-2%	-5%	0%	0%	-4%	2%	2%
	GWP 23	-2%	2%	2%	-2%	4%	4%	0%	6%	6%
	GWP 26	-7%	-4%	-4%	-7%	-2%	-2%	-6%	0%	0%
	GWP 39	-7%	-4%	-4%	-7%	-2%	-2%	-6%	0%	0%

Tabelle 5-13: Matrix Brauchwasserenergie

Anlagen aus Spalte X haben einen höheren/geringeren Brauchwasserenergiebedarf (in Prozent) als Anlagen aus der Zeile Y (Bezugsgröße = Y)										
Brauchwasserenergie		Y								
		GWP 01	GWP 02	GWP 08	GWP 11	GWP 21	GWP 22	GWP 23	GWP 26	GWP 39
X	GWP 01	0%	-19%	-16%	-68%	-50%	-38%	-68%	-59%	
	GWP 02	24%	0%	4%	-61%	-38%	-23%	-60%	-49%	
	GWP 08	19%	-4%	0%	-62%	-40%	-26%	-62%	-51%	
	GWP 11	215%	154%	164%	0%	58%	95%	1%	30%	
	GWP 21	100%	61%	68%	-37%	0%	24%	-36%	-17%	
	GWP 22	62%	30%	36%	-49%	-19%	0%	-48%	-33%	
	GWP 23	212%	152%	162%	-1%	56%	93%	0%	29%	
	GWP 26	142%	95%	103%	-23%	21%	50%	-23%	0%	
	GWP 39									

Fazit

Aus den vorangegangenen Betrachtungen wird die Komplexität der Zusammenhänge nochmals deutlich. Die einzelnen Faktoren beeinflussen sich gegenseitig in unterschiedlich starkem Maß, deren Abhängigkeiten und Auswirkungen auf die Anlageneffizienz lassen sich durch Simulationen besser abbilden als durch eine Verknüpfung der Ergebnisse aus den Felduntersuchungen. Zusammenfassend gilt zu sagen, dass grundsätzlich eine breite Streuung der Systemnutzungsgrade besteht und eine Reduktion der Streubreite erzielt wird, sobald der Speicher aus dem Bilanzkreis entfällt. Daran ist zu erkennen, dass das Nutzerverhalten und die Verzögerungsfähigkeit

des Speichers großen Einfluss auf die Nutzungsgrade aufweisen. Für einen Vergleich der Anlagen ist der Anlagennutzungsgrad zu bevorzugen.

Systeme mit einem Luftkollektor und zwei Solarkollektoren bieten nicht die erwarteten Verbesserungen im Vergleich zu den Systemen mit drei Solarkollektoren. Der dritte Solarkollektor sorgt sogar für eine verbesserte solare Brauchwasserbereitung.

Mit steigendem solaren Anteil an der Energiebereitstellung der Anlage sind hohe Anlagennutzungsgrade erzielbar. Diese stammen in der dritten Generation der Gaswärmepumpe größten Teils aus der Brauchwasserbereitung. In der vierten Generation sind weitere Steigerungen in diesen Bereichen zu erwarten, da eine zusätzliche solare Heizungsunterstützung zum Einsatz kommt.

Aus dem Vergleich der theoretisch und praktisch ermittelten Anlagennutzungsgrade ist ein qualitativ zutreffender Verlauf ermittelt worden. Damit erweist sich das System als relativ robust und auch durch Einflüsse im Feld kann das System eine gute Effizienz erzielen. Zusammen mit der Tatsache, dass während des gesamten Feldtest über zwei Jahre nur wenige Störungen auftraten, bestätigt sich die Betriebssicherheit des Systems

6 Demonstrationszentrum

Das Versuchshaus am Standort Essen wurde im Jahr 1998 fertig gestellt und wird zu Demonstrations- und Experimentierzwecken sowie Schulungen genutzt. Es handelt sich hierbei um ein vollunterkellertes, freistehendes Einfamilienhaus mit 125 m² Wohnfläche im Erd- und Obergeschoss, einem Dachgeschoss und einem Wintergarten. Die Grundfläche beträgt 85 m², die Gebäudenutzfläche liegt bei 297 m², das umbaute Volumen beträgt 930 m³. Das Versuchshaus ist nach dem Wärmedämmstandard WSVO '95 gebaut worden. Es weist einen spezifischen Heizwärmebedarf von 70 kWh/m²a auf. Abbildung 6-1 zeigt eine Außenansicht des Versuchshauses und eine Thermografieaufnahme.

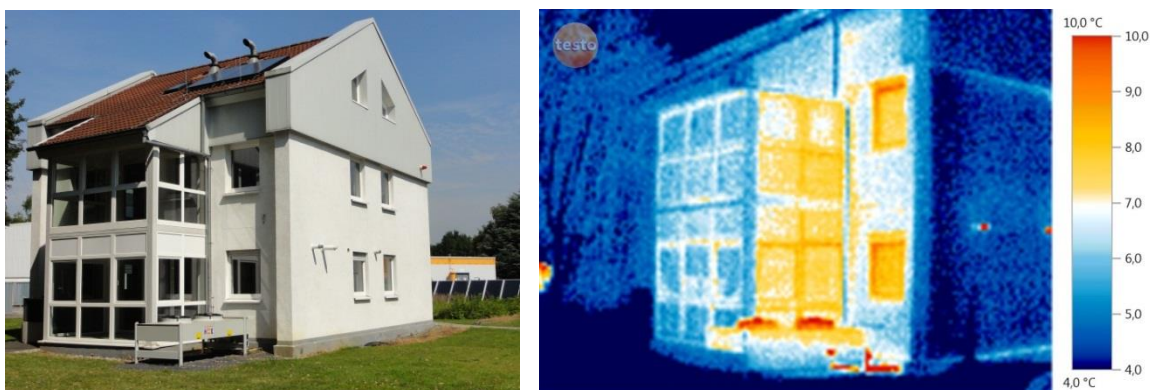


Abbildung 6-1: Versuchshaus mit Solarkollektoren im Hintergrund und Trockenkühler zum gleichzeitigen Betrieb mehrerer Anlagen. Vor dem Haus sind 3 Erdkollektoren für Wärmepumpen installiert.

Damit die im Erdgeschoss installierten Gas-plus-Technologien auch gleichzeitig ohne Einschränkungen betrieben werden können, wird ein Trockenkühler eingesetzt, um die anfallende Wärme regelbar abzuführen. Die schematische Darstellung der Anbindung der Heizungsanlagen an den Trockenkühler ist in Abbildung 6-2 aufgezeigt.

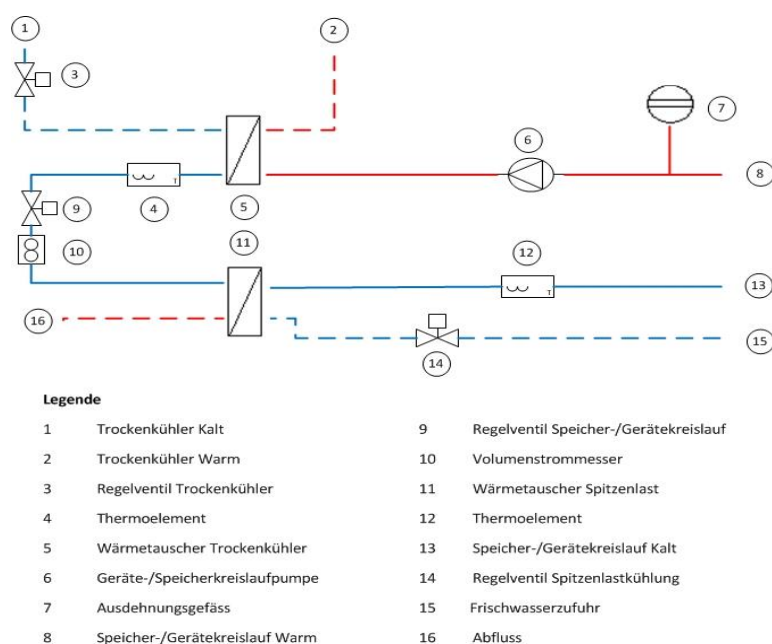


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der Anbindung von Heizungsanlagen im Versuchshaus an den Trockenkühler

Die Anlagen zur Umweltwärmeeinkopplung über Erdbodenflächenkollektoren sind in Abbildung 6-3 abgebildet. Insgesamt sind drei Flächenkollektoren unterschiedlicher Verlegearten und Rohrkombinationen als Wärmequelle für die im

Haus installierte Gaswärmepumpe verlegt. Die in Abbildung 6-3 dargestellte hydraulische Verschaltung erlaubt eine Umschaltung der Kollektoren im Betrieb.

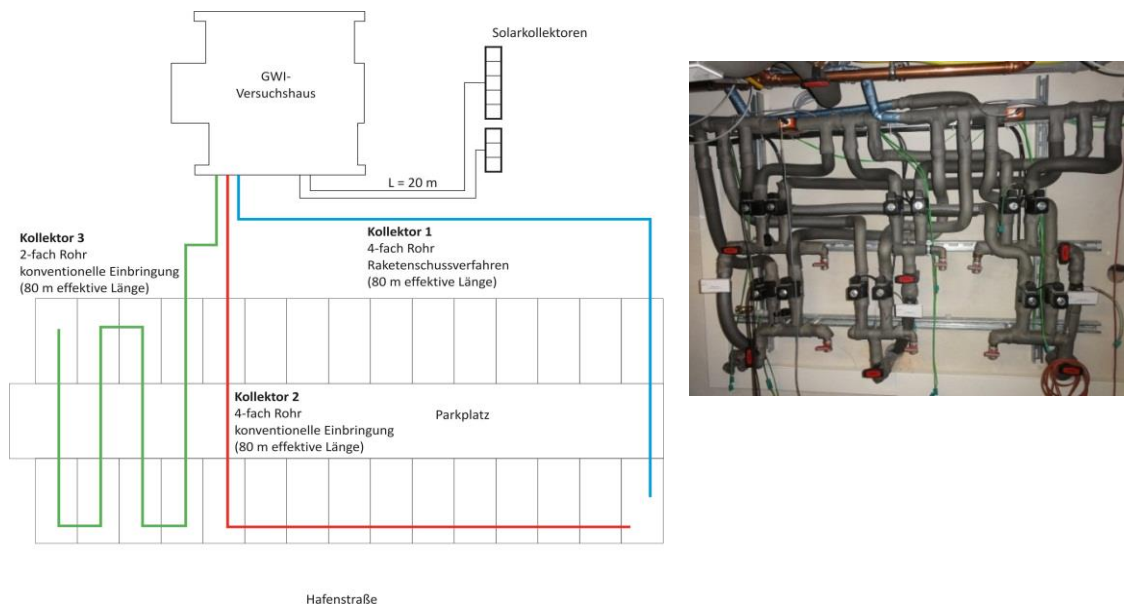


Abbildung 6-3: Vor dem Versuchshaus verlegte Flächenkollektoren und Hydraulik zur Umschaltung der Flächenkollektoren

Die zwei Solarkollektoren (Abbildung 6-4) versorgen das Gasbrennwertgerät und die Gaswärmepumpe (System Vaillant) mit erneuerbarer Energie.



Abbildung 6-4: Solarthermiemodule für die Brennwert plus Solar- und Gaswärmepumpenanlage

Das Technologieangebot in der Gerätetechnik hat sich in den letzten Jahren enorm erweitert. Neben den klassischen Brennwertgeräten stehen hocheffiziente

KWK-Anlagen, Wärmepumpen, Brennstoffzellen unter Einbindung regenerativer Quellen wie Sonnenenergie oder Biogas und unter Berücksichtigung von Speichersystemen bereit. Das Zusammenspiel von Energiebedarfen, Gerätetechnik, Gebäude und Nutzer zu analysieren und zu optimieren ist eine der Kernkompetenzen am GWI. Im Versuchshaus kann das Nutzerverhalten gezielt simuliert und die jeweiligen Auswirkungen mithilfe modernster Messtechnik detailliert erfasst und ausgewertet werden. Neben wissenschaftlichen Untersuchungen ist es zudem möglich, an den installierten Anlagen Schulungen, Demonstrationen und Informationsveranstaltungen durchzuführen.

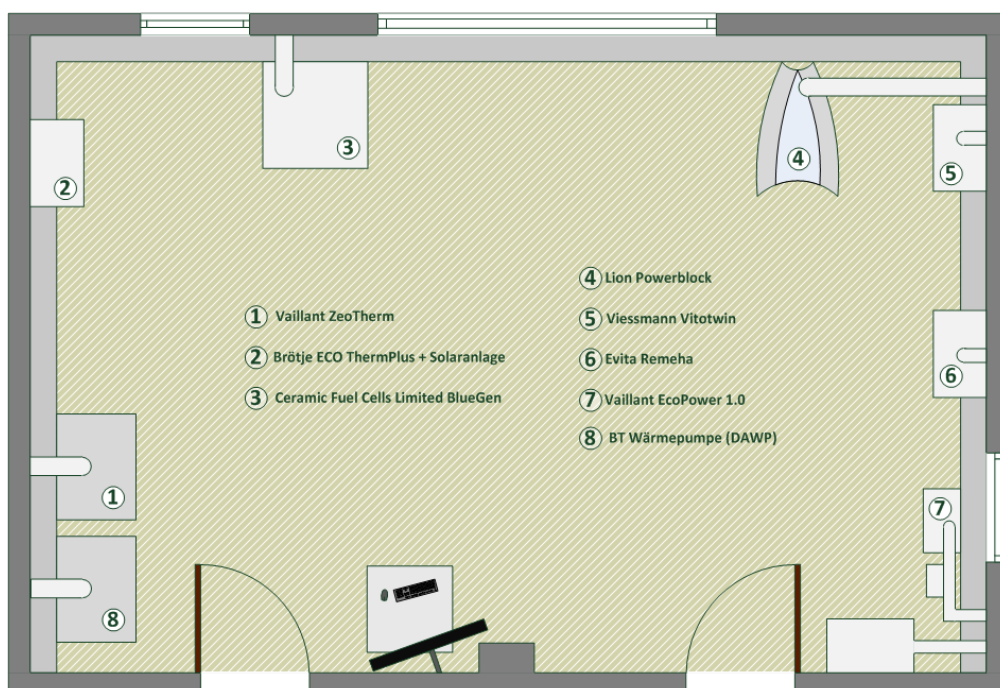


Abbildung 6-5: Aufstellungssituation im Ausstellungsraum (schematisch), nicht eingezeichnet ist die Bosch-Wärmepumpe

In Abbildung 6-5 ist der derzeitige Installationsstatus im Versuchshaus schematisch dargestellt. Es sind Gaswärmepumpen, Mikro-KWK-Geräte sowie Brennstoff plus Solar-Technologien installiert, um einen guten Überblick über den Stand der Technik und innovative Konzepte in der Heizungstechnik darzustellen. Sämtliche Messdaten werden auf einem 46“ LCD-Flachbildschirm mit Energieflüssen bzw. Temperaturen visualisiert, was insbesondere bei Schulungen von großem Vorteil ist. Als Beispiel ist in Abbildung 6-6 die Bildschirmdarstellung der Zeolith-Gaswärmepumpe dargestellt.

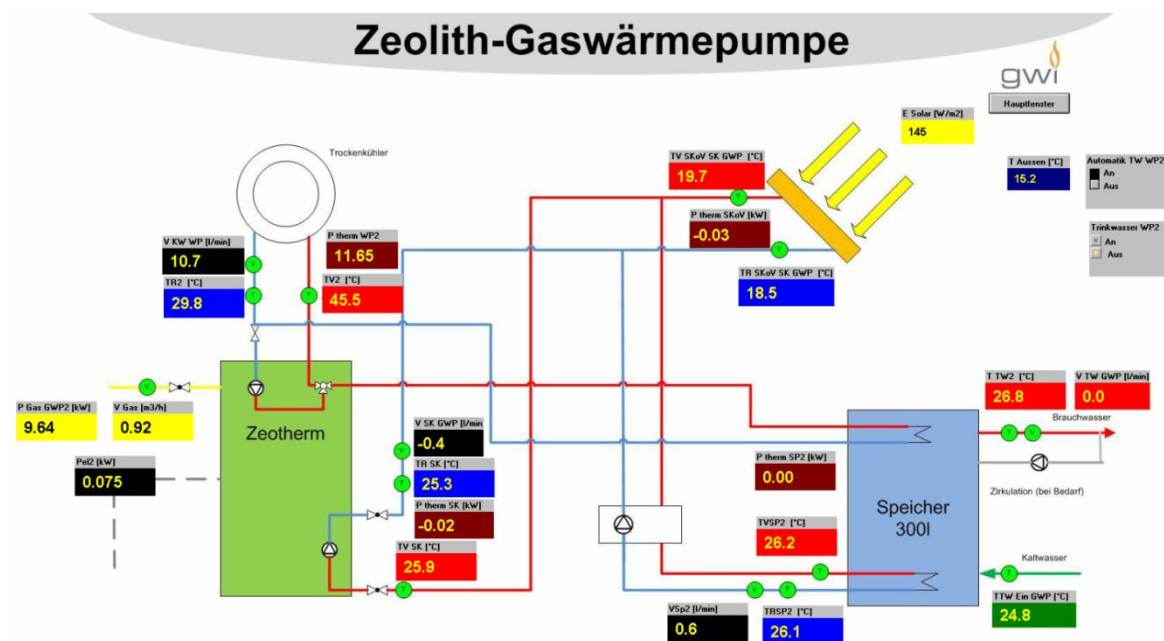


Abbildung 6-6: Visualisierung der Zeolith-Gaswärmepumpen-Technik im Versuchshaus

Die folgenden Fotos aus dem Demonstrationszentrum (Abbildung 6-7) zeigen auf dem linken Foto die Mikro-KWK-Geräte und auf dem rechten Foto die Gaswärmepumpen sowie das Brennwertgerät und die Brennstoffzelle. Die Kombination aus Brennstoffzelle und Brennwertgerät übernehmen die Wärme- und Stromversorgung des Hauses, alle anderen Geräte werden parallel zu diesem Bedarf geführt. Die dabei redundant bereitgestellte Wärme wird über einen Trockenkühler abgeführt. Die Hydraulik ist so angelegt, dass im Prinzip jedes Gerät als „führendes“ Gerät betrieben werden kann. Alle Geräte verfügen über ihre eigene Systemtechnik mit zugehörigem Speicher, wie vom Hersteller ausgelegt. Der damit verbundene Installationsaufwand wird in Abbildung 6-8 deutlich.



Abbildung 6-7: KWK-Geräte (links), Wärmepumpen, Brennwertkessel und Brennstoffzelle (rechts)



Abbildung 6-8: Installationsstationen und Speicher in den Kellerräumen

7 Handlungsempfehlungen

Die Auswertung der Feldtestdaten zeigt deutlich, dass der Nutzer den größten Einfluss auf die Effizienz der Heizungsanlage hat. Die Anlagenparameter sind dem gegenüber von untergeordneter Natur.

Aufgrund der Feldtestdaten konnte weiterhin festgestellt werden, dass für den reinen Wärmepumpenprozess zwei Flachkollektoren ausreichend sind. Wird die Kollektorfläche durch einen dritten Kollektor erhöht, steigt der Systemnutzungsgrad wegen der zusätzlichen solaren Warmwasserbereitung und der verbesserten solaren Heizungsunterstützung. Eine Umrüstung von Flachkollektoren auf Röhrenkollektoren steigert die mittlere Soletemperatur. Die Versuchsergebnisse bestätigen die Herstellervermutung, dass mit einer höheren Soletemperatur der Wirkungsgrad der Wärmepumpe ansteigt. Ein Einsatz von Röhrenkollektoren wird also sowohl den Systemnutzungsgrad als auch den Anlagennutzungsgrad steigern.

Tabelle 7-1: Eignung der zeoTHERM in Abhängigkeit von Solarkollektortyp und Heizkreistemperaturen

	Flachkollektor	Röhrenkollektor
35/28	+	++
55/45	0	+

Gaswärmepumpen eignen sich für Häuser mit niedrigem Energiebedarf und niedrigen Heizkreistemperaturen. Unter Umständen ist es ratsam, dass das Gebäude vor dem Einbau einer Gaswärmepumpe saniert wird oder auch eine gezielte Anpassung der Heizflächen erfolgt. Die Feldtestdaten zeigen, dass Gebäude mit einer geringeren Heizlast durch die Gaswärmepumpe effizienter beheizt werden können.

Nachteilig für eine weitere Marktdurchdringung sind die Kosten des Wärmepumpensystems anzusehen. Eine Kostensenkung kann durch einen erhöhten Geräteabsatz und damit verbundenen geringeren Herstellungskosten erreicht werden. Von dritter Seite aus könnten in diesem Zusammenhang Förderprogramme aufgelegt werden, um so den tatsächlichen Anschaffungspreis der Gaswärmepumpe für den Endkunden zu mindern. Das Marktanreizprogramm der BAFA bezuschusst die Installation von Gaswärmepumpen mit einer Jahresarbeitszahl von mindestens 1,3 Abhängigkeit der Nennwärmeleistung. Als

Beispiel werden Gaswärmepumpen mit entsprechend hoher Jahresarbeitszahl mit einer Nennwärmeleistung bis zu 10 KW mit pauschal 2800€ bezuschusst. Die zeoTHERM der Firma Vaillant erfüllt diese Anforderungen und ist somit im Gebäudebestand förderfähig.

Als Idealsystem kann zurzeit folgendes gelten:

- Heizkreistemperaturen 35/28 °C
- Röhrenkollektoren (2+x¹)
- Südausrichtung

Hinzu kommt, dass die Reglereinstellungen einen möglichst hohen Nutzen der Solarthermie ermöglichen sollten, indem z. B. der Trinkwasserspeicher primär durch den Solarkollektor geladen wird und nur bei akutem Bedarf das Heizgerät verwendet wird. Das System sollte auf möglichst niedrige Warmwasser Temperaturen eingestellt werden. Ebenso sollte aus Effizienzgründen auf eine Warmwasserzirkulation verzichtet werden.

Es ist von Herstellerseite geplant, ein System mit einer Heizleistung von 15 kW einzuführen. Von diesem ist eine bessere Eignung für höhere Heizkreistemperaturen zu erwarten und das Austauschpotential wird in Richtung des Gebäudebestands ausgeweitet.

¹ x ist hier abhängig von dem Warmwasserverbrauch und muss im Einzelfall bestimmt werden

A Anhang

Berechnung der mittleren und maximalen Fehler bei den Messungen zur VDI 4650-2

Die Wärmeleistung wurde bei den Versuchen über die Messung der Temperaturdifferenz, des Massendurchflusses und der spezifischen Wärmekapazität bestimmt. Der Massendurchfluss wurde nicht direkt gemessen, sondern aus der Dichte und dem gemessenen Volumenstrom bestimmt. In dem Messprogramm ist eine Tabelle der Eigenschaften des Wassers in Abhängigkeit der Temperatur hinterlegt, so dass sowohl für die Wärmekapazität die korrekten, temperaturbezogenen Werte verwendet werden.

Die Messung des Wasservolumenstroms wurde mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser der Marke Krohne vorgenommen.

Die Temperaturmessung erfolgte über PT-100-Messfühler aus der gleichen Produktionscharge, wodurch der Fehler untereinander minimiert wird.

Die Wärmeleistung P_{Wasser} lässt sich mit der folgenden Formel berechnen:

$$P_{Wasser} = \left(\frac{\dot{V}}{1000} * 60 \right) * \rho_w * (T_A c_{wa} - T_E c_{we}) * \left(\frac{0,001}{3600} \right)$$

Dabei ist:

ρ_w = Dichte des Wassers

T_A = Temperatur am Austritt

T_E = Temperatur am Eintritt

c_{wa} = Wärmekapazität am Austritt

c_{we} = Wärmekapazität am Eintritt

\dot{V} = Volumenfluss in l/min

Die Temperaturfühler (Pt100) wurden vor den Messungen im Gerät gegeneinander kalibriert und der mittlere Fehler wurde im Messprogramm nachkorrigiert. Der systematische und statistische Fehler wurde auf ein ΔT von 0,035°K beziffert. Um nicht für jeden Punkt eine separate Fehlerbetrachtung durchführen zu müssen wurde eine Fehlerbetrachtung bezogen auf die kleinste Temperaturdifferenz mit einem Wert von 0,04 % durchgeführt.

Für die Durchflussmesser war eine Kalibrierung nicht möglich, aber hier konnte auf die vom Hersteller angegebenen Messfehler zurückgegriffen werden. Der angegebene Fehler beläuft sich auf 0,3 %.

Dichte und Wärmekapazität, die für die Berechnung der thermischen Leistung genutzt werden, sind im Programm mit einem Polynom dritten Grades berechnet und unterliegen somit keinem Messfehler.

Um die Fehlerfortpflanzung berechnen zu können, müsste auf eine Taylorreihenentwicklung bis zum linearen Glied zurückgegriffen werden. Bei kleinen Δx – wie im vorliegenden Fall gegeben – können aber auch die vereinfachten Lösungen benutzt werden.

Bei einer Multiplikation von zwei fehlerbehafteten Größen kann der Gesamtfehler durch Addition der Einzelfehler bestimmt werden.

$$\Delta G = \Delta x + \Delta y$$

daraus folgt: $\Delta P_{\text{Wasser}} = \Delta \dot{V} + \Delta T$ mit $\Delta \dot{V} = 0,3\%$ und $\Delta T = 0,04\%$

$$\Delta P_{\text{Wasser}} = 0,34\%$$

Für die Gasleistung wurde der relative Fehler wie bei der Wärmeleistung berechnet:

$$V_{N, Gas} = \frac{(p_{Luft} + p_{Gas}) * (V_{Gas} * 273,15)}{(1013,25 * (273,15 + T_{Gas}))}$$

$$P_{Gas} = H_i * V_N$$

Dabei sind

$$V_{N, Gas} = \text{Gasnormvolumen}$$

$$p_{Luft} = \text{Luftdruck}$$

$$p_{Gas} = \text{Gasdruck}$$

$$V_{Gas} = \text{(gemessene) Gasvolumen}$$

$$T_{Gas} = \text{Gastemperatur}$$

$$H_i = \text{Heizwert}$$

$$\Delta V_{N, Gas} = (\Delta p_{Luft} + \Delta p_{Gas}) + \Delta V_{Gas} + \Delta T_{Gas} \text{ mit } \Delta p_{Luft} = 0,4\% , \Delta p_{Gas} = 0,5\% , \\ \Delta V_{Gas} = 0,3\% \text{ und } \Delta T_{Gas} = 0,5\%$$

$$\Delta V_{N, Gas} = 1,7\% \text{ und dabei } \Delta p_{Gas} = 1,7\%$$

Der Fehler der elektrischen Leistungsmessung liegt bei 0,2 %.

Aus den gemessenen Werten für die Wärmeleistung, Gasleistung und elektrische Leistung wurde der Mittelwert berechnet.

Der mittlere Fehler berechnet sich nach:

$$\Delta G = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial z} \Delta z\right)^2}$$

für die Heizzahl und Nutzungsgrad vereinfacht:

$$\Delta \varepsilon_{h,i} = \frac{1}{Q_i + p_{iel}} \sqrt{\Delta p_i^2 + \left(\frac{p_i}{Q_i + p_{iel}}\right)^2 [\Delta Q_i^2 + \Delta p_{iel}^2]}$$

$$\Delta n_{h,i} = \frac{1}{Q_i} \sqrt{\Delta p_i^2 + \left(\frac{p_i}{Q_i}\right)^2 [\Delta Q_i^2]}$$

Somit kann der mittlere Fehler für die Heizzahl mit 0,7427 % angegeben werden. Das Gleiche für den Nutzungsgrad ergibt 0,7785 %.

Der Maximale Fehler wurde wie folgt berechnet:

$$\Delta G = \left|\frac{\partial G}{\partial x}\right| \Delta x + \left|\frac{\partial G}{\partial y}\right| \Delta y + \left|\frac{\partial G}{\partial z}\right| \Delta z$$

für die Heizzahl und Nutzungsgrad vereinfacht:

$$\Delta \varepsilon_{h,i} = \frac{1}{Q_i + p_{iel}} \left[\Delta p_i + \left(\frac{p_i}{Q_i + p_{iel}}\right) [\Delta Q_i + \Delta p_{iel}] \right]$$

$$\Delta n_{h,i} = \frac{1}{Q_i} \left[p_i + \left(\frac{p_i}{Q_i}\right) [\Delta Q_i] \right]$$

Der maximale Fehler kann somit für die Heizzahl mit 0,95025 % und für den Nutzungsgrad mit 0,9578 % angegeben werden.

Mit dem integrierten Brennwertgerät der zeoTHERM der Firma Vaillant wurde eine Messung zur Energiebilanzierung durchgeführt. Dabei wurde eine Messung bei den Temperaturen 60/50 durchgeführt, so dass kein Brennwerteffekt mehr genutzt wird. Außerdem wurde eine Abgasmessung durchgeführt, um die Abgasverluste mit zu berücksichtigen. Dabei ergab sich ein Nutzungsgrad von 94,2 % und ein relativer thermischer Verlust über das Abgas von 2,7 %. Die Gesamtenergie, die erfasst werden konnte, beläuft sich somit 96,9 % der eingesetzten Brennstoffenergie.

Literaturverzeichnis

- [VDI10] VDI 4640 Blatt 2, Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Stand 2001-09
- [IWU03] Loga, Tobias et al., INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH, Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten – Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung, 15. Juli 2003 Darmstadt
- [IELe09] Quelle: IGWP 2009 Darstellung: IE Leipzig
- [Val] Von Vaillant zur Verfügung gestelltes Material
- [IGWP] Von der IGWP zur Verfügung gestelltes Material
- [ASUE] Die richtige Kombination: Erdgas und Solar, 29.09.2006
<http://www.asue.de>
- [Oli 03] Oliveski, R. et. al., Comparison between models for the simulation of hot water storage tanks, Solar Energy, 2003



Gaswärmepumpe plus Solar im System Gebäude- und Anlagentechnik

G 5-02-10

Stand: 30.10.2012

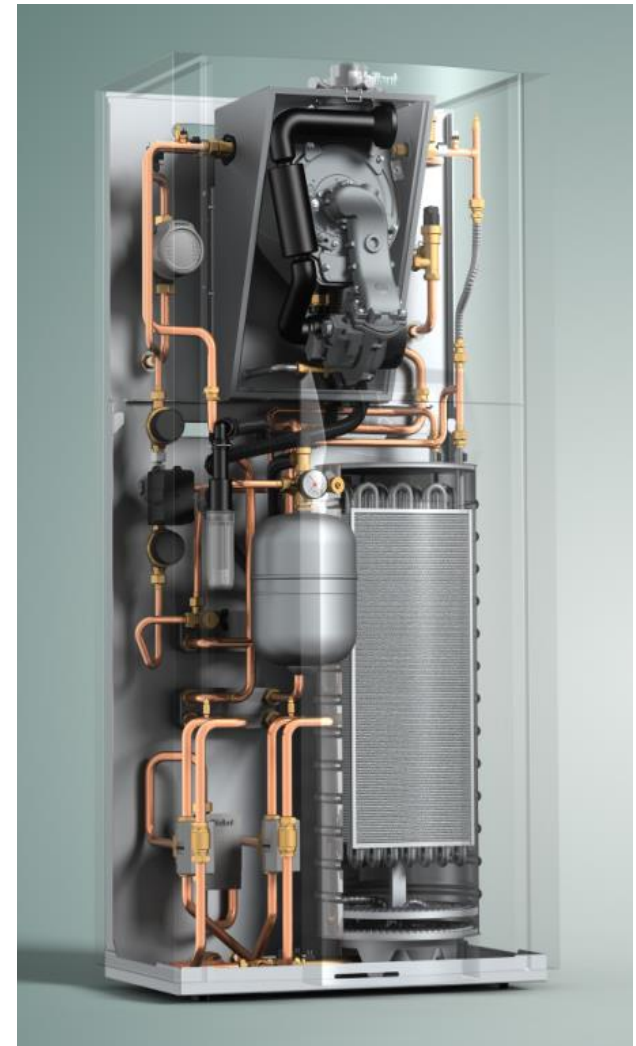
- Hintergrund und Zielsetzung
- Untersuchtes System
- Kollektortemperaturnutzung
- Laborergebnisse
- Feldtestdaten
- Simulation in Modelica
- Empfehlungen für Optimaleinstellungen
- Kernaussagen und Fazit

- Die Einkopplung von „**Solarthermie**“ ermöglicht den Einsatz der Wärmepumpentechnologie auch bei Kunden, die andere Wärmequellen nicht nutzen können oder vorhandene Solar-Kollektoren weiterverwenden wollen.
- Ziel ist die **Bewertung** und **Optimierung** des Technologiekonzepts unter besonderer Berücksichtigung der Solarthermieeinkopplung, die auf die zukünftige Anwendungssituation abgestimmt ist.

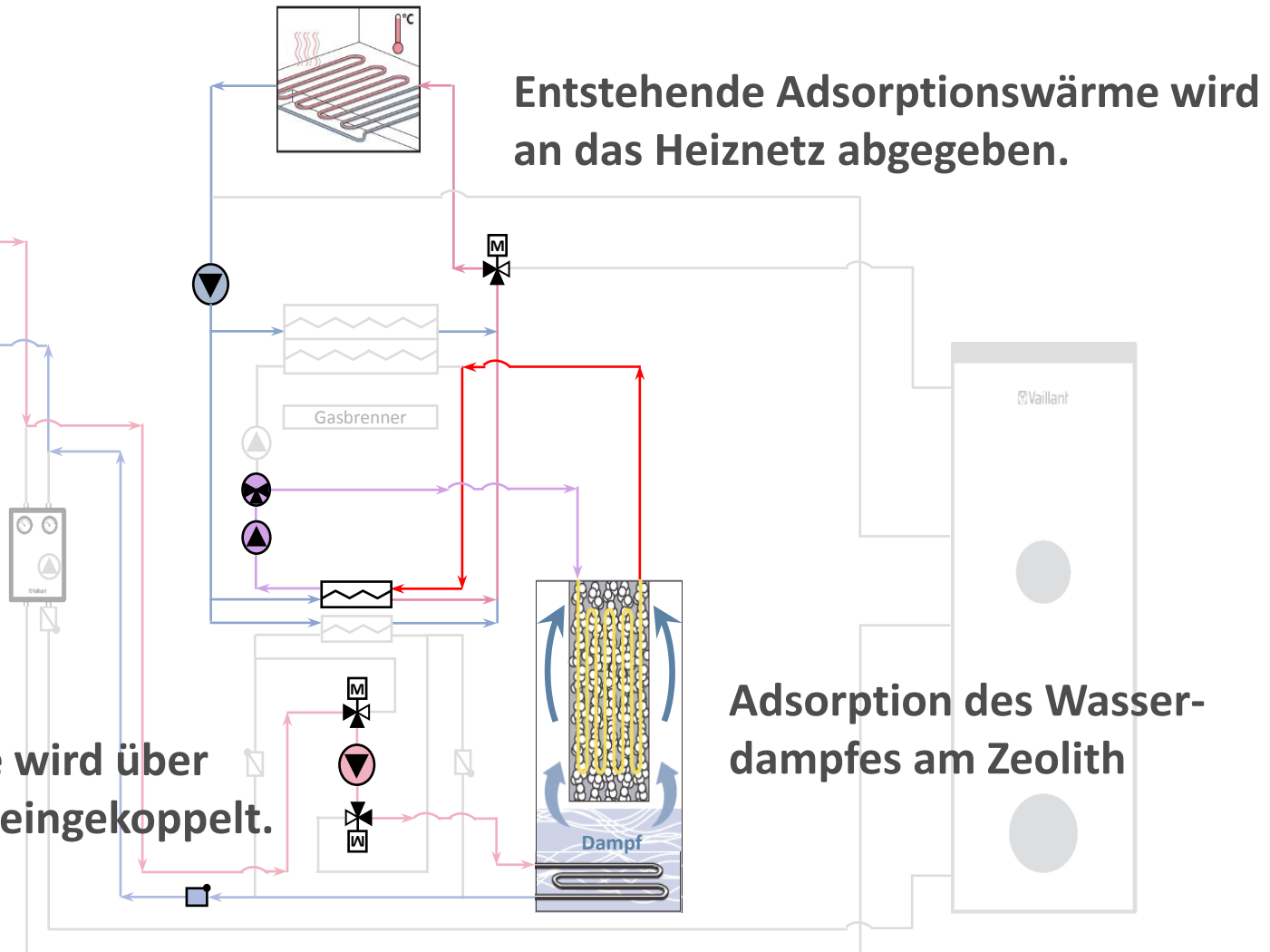
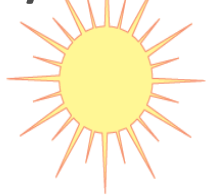
- Hintergrund und Zielsetzung
- **Untersuchtes System**
- Kollektortemperaturnutzung
- Laborergebnisse
- Feldtestdaten
- Simulation in Modelica
- Empfehlungen für Optimaleinstellungen
- Kernaussagen und Fazit

Zeolith-Adsorptionsgaswärmepumpe der Firma Vaillant

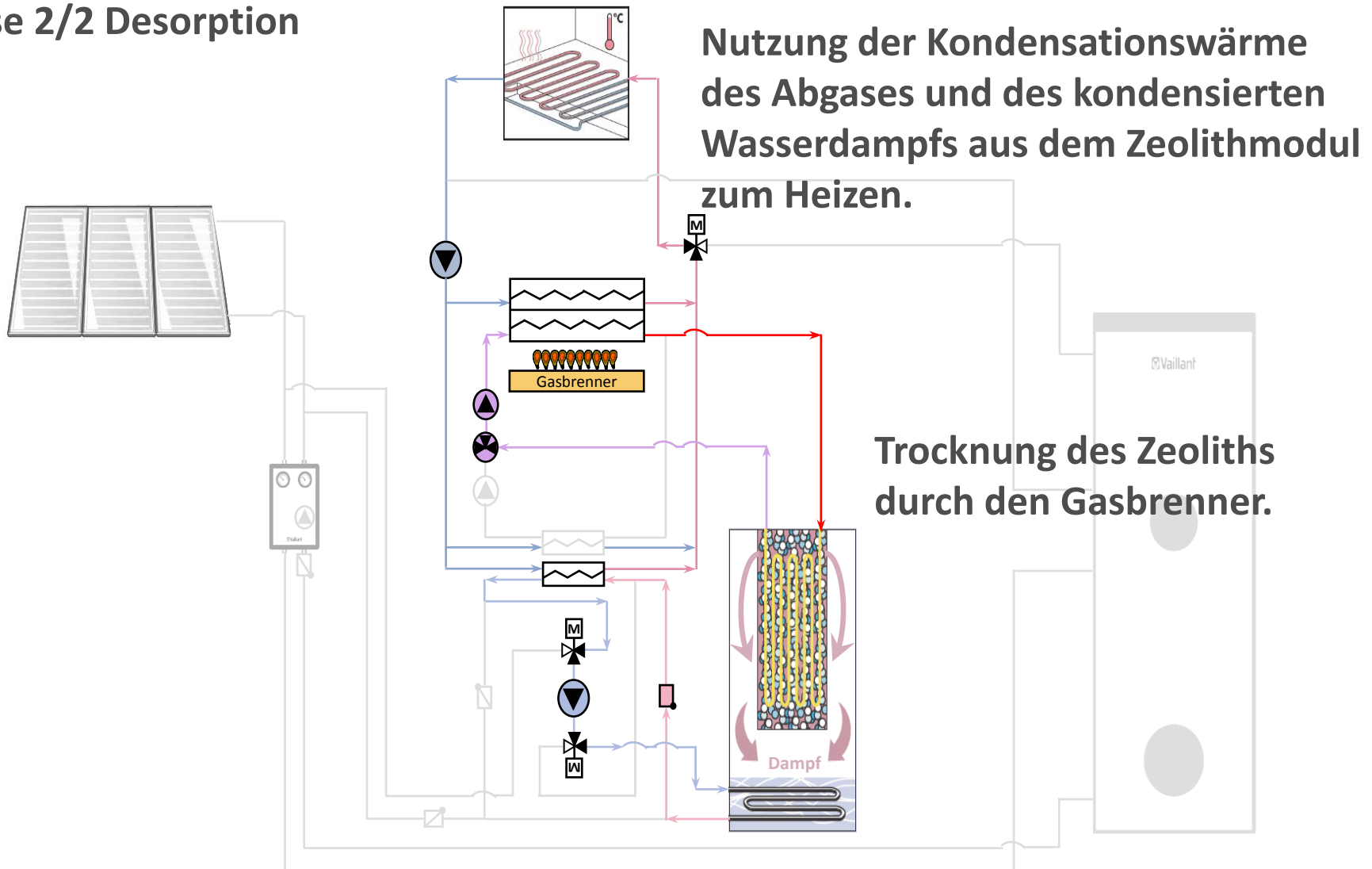
- Nennwärmeleistungsbereich
1,5 - 10 kW
- Integriertes Brennwertgerät
- Umweltwärmequelle Solarthermie
(Röhren- oder Flachkollektor)
- Solare Warmwasserbereitung und
Direktheizung



Phase 1/2 Adsorption



Phase 2/2 Desorption



- Hintergrund und Zielsetzung
- Untersuchtes System
- Kollektortemperaturnutzung
- Laborergebnisse
- Feldtestdaten
- Simulation in Modelica
- Empfehlungen für Optimaleinstellungen
- Kernaussagen und Fazit

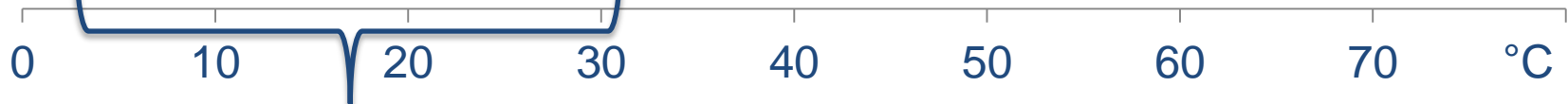
Der Einsatz eines solarthermisch gespeisten Wärmepumpenprozesses erweitert das nutzbare Temperaturspektrum (ab 3 °C) der solaren Strahlungsenergie im Gebäudesektor.



geeignet für
solare Warmwasserbereitung

geeignet für
solare Direktheizung

geeignet für
Sorptionsprozess für Heizwärme



Zusätzlich nutzbarer Temperaturbereich (Solar-Kollektor)
durch den Wärmepumpenprozess.

- Hintergrund und Zielsetzung
- Untersuchtes System
- Kollektortemperaturnutzung
- Laborergebnisse
- Feldtestdaten
- Simulation in Modelica
- Empfehlungen für Optimaleinstellungen
- Kernaussagen und Fazit

Wichtige Bewertungsgrößen für Wärmepumpen:

Nutzungsgrad $\eta = \frac{P_{th}}{P_{Gas}}$

Der Nutzungsgrad bezieht sich ausschließlich auf die dem Brenngas enthaltene Energie.

Heizzahl $\zeta = \frac{P_{th}}{P_{Gas} + P_{el}}$

Die Heizzahl stellt einen vollständigen energetischen Vergleich dar.

Leistungszahl $\varepsilon = \frac{P_{th}}{P_{el}}$

Die Leistungszahl ist die typische Bewertungsgröße für elektrisch betriebene Wärmepumpen.

P_{th} = thermische Leistung

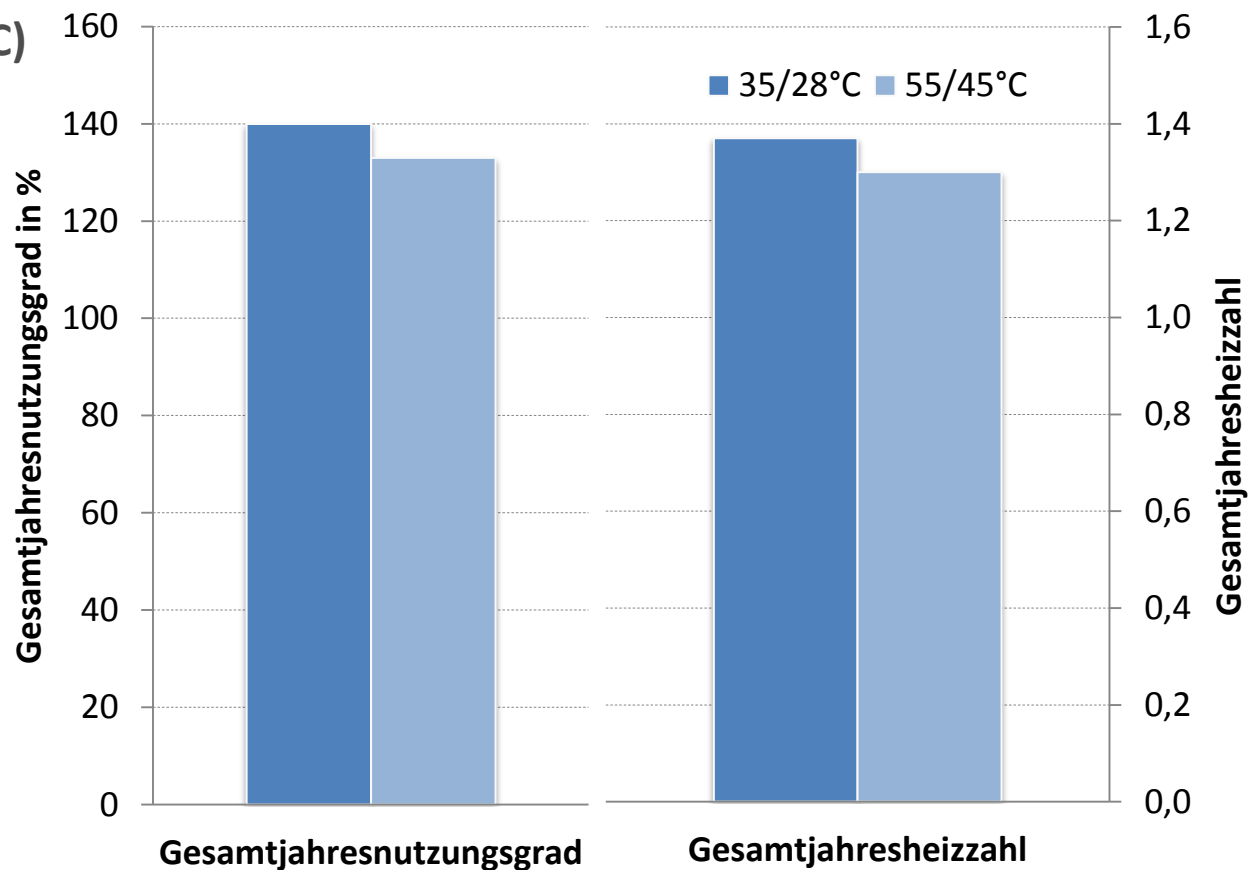
P_{el} = elektrische Leistungsaufnahme

P_{Gas} = Wärmebelastung

Das Gesamtsystem (Heizung incl. solarer Warmwassererwärmung plus solare Direktheizung) erreicht die im Marktanreizprogramm geforderte Gesamtjahresheizzahl von 1,3 in den Heizkreisen:

- Fußbodenheizung (35/28 °C)
- Radiatoren (55/45 °C)
- Für jeden Heizkreis wurden Messungen bei 13, 30, 39, 48 und 63 % der Maximalleistung gemessen, um den entsprechenden Nutzungsgrad zu ermitteln.

*) VDI 4650 Blatt 2:2010-11:
Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresheizzahl und des Jahresnutzungsgrads von Sorptionswärmepumpenanlagen - Gas-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung



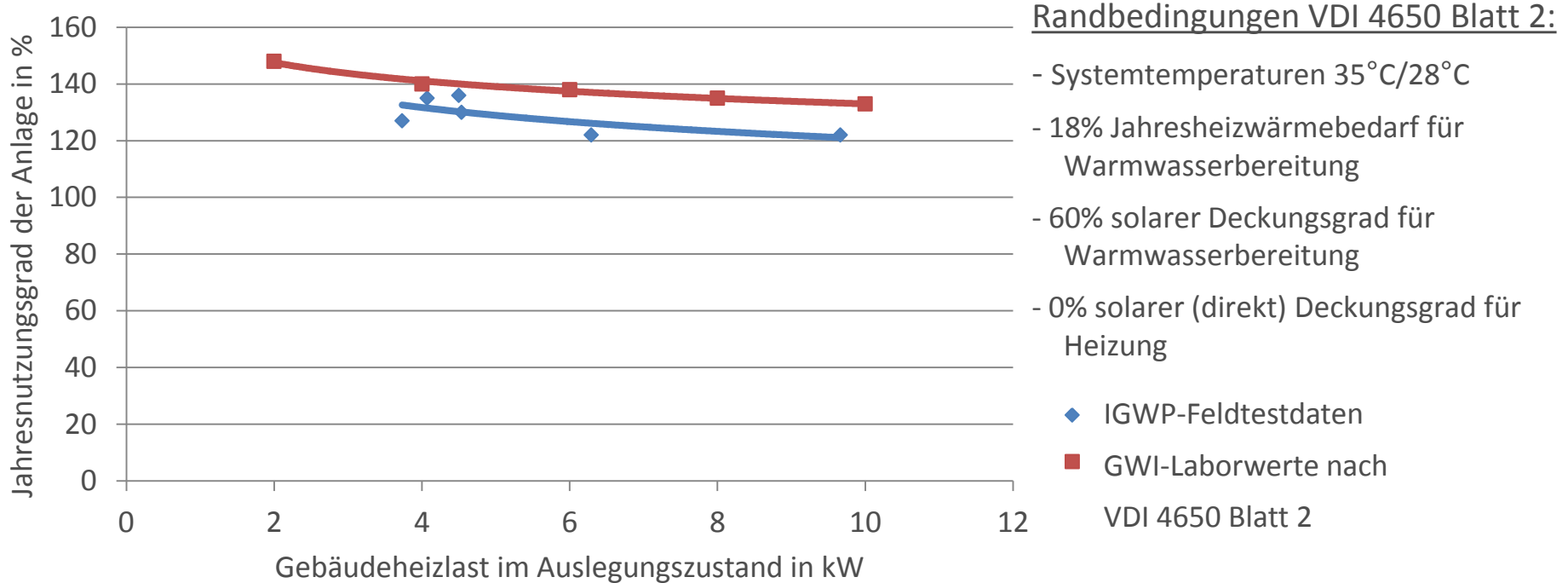
- Hintergrund und Zielsetzung
- Untersuchtes System
- Kollektortemperaturnutzung
- Laborergebnisse
- **Feldtestdaten**
- Simulation in Modelica
- Empfehlungen für Optimaleinstellungen
- Kernaussagen und Fazit

Im Rahmen der Initiative Gaswärmepumpe (IGWP) werden Feldtestuntersuchungen durchgeführt, um auf Basis der Praxiserfahrungen die Technologien zu optimieren.

- **Vaillant-System:** Zum Projektstart lagen Daten von 15 Anlagen zur Auswertung vor.
- **Beispiel Feldtestobjekt:** Feldtest läuft seit Oktober 2009, das Gebäude wurde 2009 gebaut.
- Das Objekt besitzt eine beheizte Wohnfläche von 100 m² und ein Fußbodenheizungssystem.
- 3 Bewohner.
- 3 Flachkollektoren mit einer gesamten Aperturfläche von ca. 7 m².
- Es liegen keine störungs-bedingten Ausfälle vor.



*) IGWP – Die Initiative Gaswärmepumpe ist eine Vereinigung der führenden Energieversorger und Heizungshersteller in Deutschland (E.ON Ruhrgas AG, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Energie Südbayern GmbH, EWE Aktiengesellschaft, GASAG Berliner Gaswerke AG, MVV Energie AG, RWE Rheinland Westfalen Netz AG, Verbundnetz Gas AG, Buderus Deutschland, Junkers Deutschland, ROBUR GmbH, Vaillant GmbH, Viessmann Werke GmbH & Co. KG), um eine Plattform für die erfolgreiche Positionierung und Markteinführung der Zukunftstechnologie Gaswärmepumpe zu schaffen.



- **Der Vergleich von 6 Feldtestanlagen der IGWP*) mit GWI-Laborergebnissen nach VDI 4650-2 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung** (insgesamt lagen Daten von 15 Anlagen aus ganz Deutschland vor, 9 Datensätze wurden ausgewertet, 6 Datensätze waren verwertbar. Gründe: zum Teil unterschiedliche nicht vergleichbare GWP-Entwicklungsgenerationen sowie Kollektorsysteme).
- Eine **Überdimensionierung hat keine negativen Auswirkungen**. Eine Senkung der Gebäudeheizlast führt zu höheren Jahresnutzungsgraden.

Gesamtjahresnutzungsgrade Vaillant GWP23 Generation 4 (Warmwasseranteil 9 %, Heizungsanteil 91 %)

Typ: Vaillant zeoTherm

- Generation 4
- GWP + solare Warmwasserbereitung sowie Heizungsunterstützung

Wärmequelle:

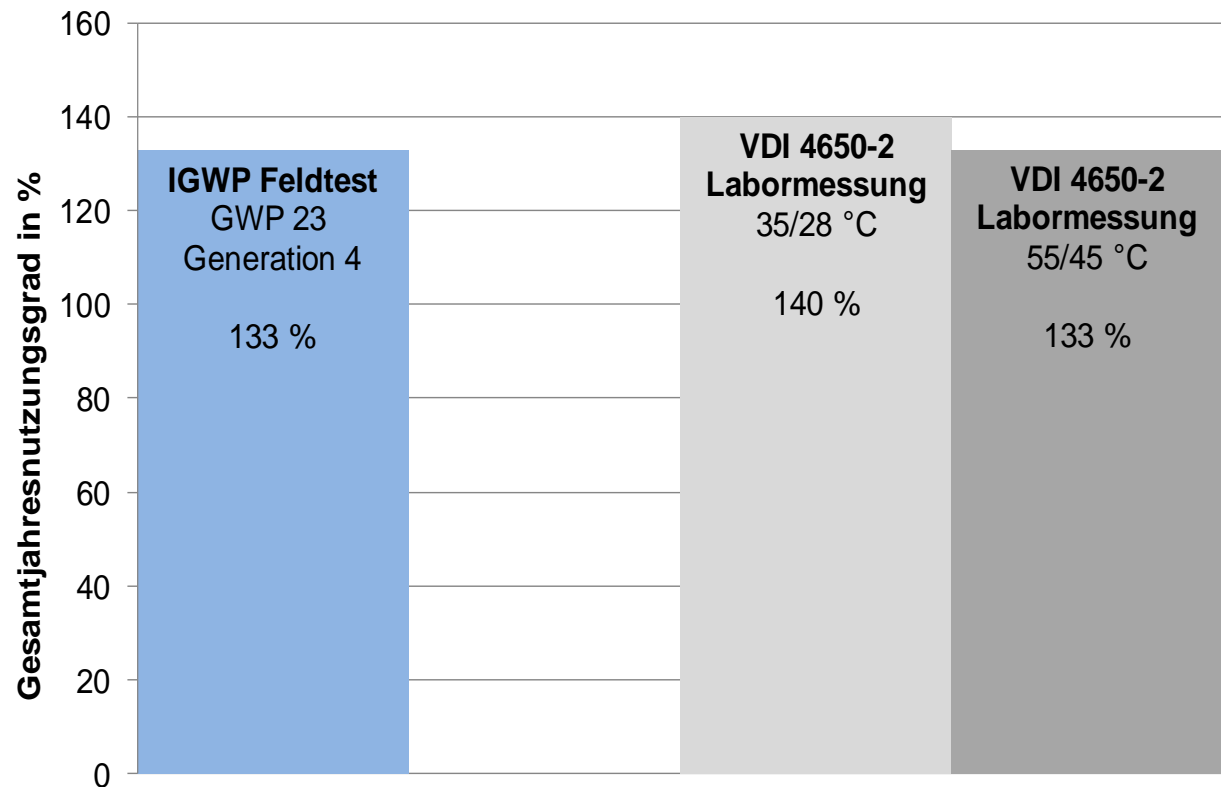
- Solar (3 Kollektoren)

Heizsystem:

- Fußbodenheizung

Warmwasserbereitung:

- 300l Speicher + solare WW-Unterstützung
- Zirkulation: ja



Vergleich

1. VDI-Gesamtjahresnutzungsgrade

Die Gesamtjahresnutzungsgradunterschiede treten auf Grund der unterschiedlichen mittleren Heizkreistemperaturen in den Systemen 35/28°C zu 55/45°C auf.

2. VDI-Gesamtjahresnutzungsgrad zu Gesamtjahresnutzungsgrad (Feldtest)

In der Praxis werden nicht die Heizkreistemperaturen sowie die Lastverteilung gemäß VDI erreicht. Die Bereitschaftsverluste reduzieren nochmals den Gesamtjahresnutzungsgrad.

Fazit

Die aufgeführten Gesamtjahresnutzungsgrade zeigen das hohe Potenzial der Gaswärmepumpentechnik auf.

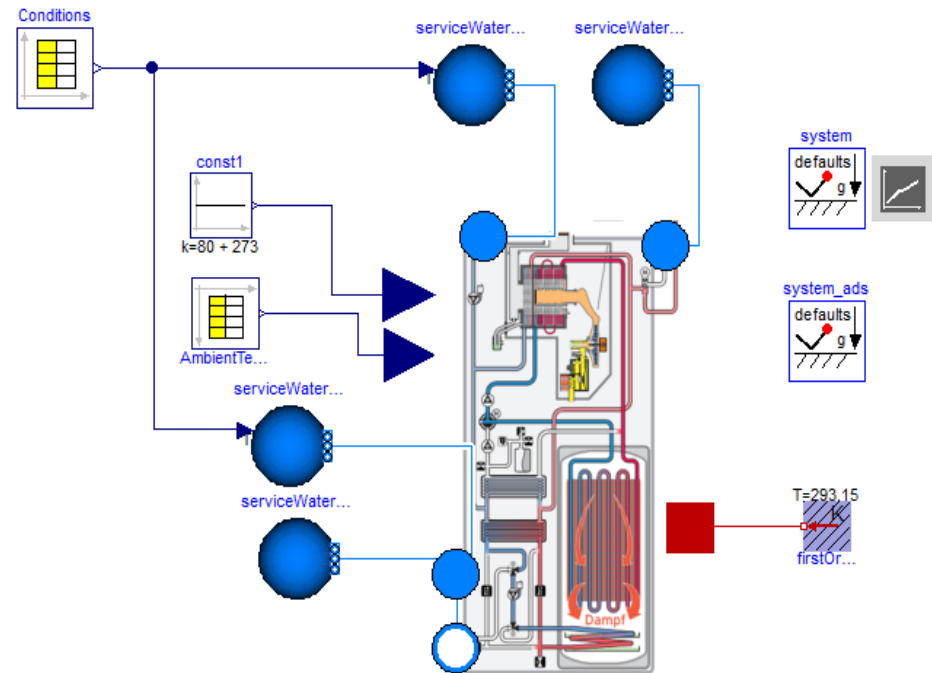
- Hintergrund und Zielsetzung
- Untersuchtes System
- Kollektortemperaturnutzung
- Laborergebnisse
- Feldtestdaten
- Simulation in Modelica
- Empfehlungen für Optimaleinstellungen
- Kernaussagen und Fazit

Die Komplexität des Systems „Gaswärmepumpe mit der Umweltwärmequelle Solar“ erfordert für weitergehende Untersuchungen z. B. bei der Integration in die Hausenergieversorgung den Einsatz von dynamischen Simulationsmodellen.

- Die Simulationsumgebung in Modelica und das Zeolith-WP-Modul wurden vom GWI, XRG und dem E.ON Research Center erstellt, getestet und **validiert**.

Validierungsbeispiel

Parameter I *			
	Vorlauf	Rücklauf	Gasverbrauch
Messung	22,5°C	21,3°C	1,78 KW
Simulation	22,3°C	20,8°C	2,20 KW
Abweichung	< 1 %	~ 3 %	20 %
Parameter II *			
	Vorlauf	Rücklauf	Gasverbrauch
Messung	23,5°C	22,8°C	3,05 KW
Simulation	22,3°C	20,8°C	3,46 KW
Abweichung	~ 5 %	~ 10 %	~ 12 %



* Die Zeolith-WP arbeitet in vier Parametern, (Parameter I und II GWP-Betrieb, III Mischbetrieb, IV reiner Brennwertbetrieb)

Die Parametervariationen haben die Anwendbarkeit des Simulationsmodells bestätigt.

Die wesentlichen Systemdaten wurden zur Parametervariation variiert:

- Änderungen der Temperaturen (Heizkreis, Umweltwärmequelle, Umgebungstemperatur),
- Kesselleistung,
- Zeolith-Masse,
- Speichervolumen (300 l bis 1000 l) und Speicherverluste,
- Kollektorfläche und
- Gebäudeparameter.

Beispiel für Standard Gebäudeparameter	
Typ	Einfamilienhaus
Heizkreistemperaturen	35/28°C (Fußbodenheizung)
Personen	4
Wohnfläche	100 m ²
Spez. Heizwärmebedarf	50 W/m ²
Solarkollektor	3 Röhrenkollektoren (~7,05 m ²)
Speicher	300 l



Mit den im GWI-Versuchshaus installierten Praxisanlagen werden zurzeit Messdaten erfasst, die eine weitere Verfeinerung des Simulationsmodells ermöglichen.

- Hintergrund und Zielsetzung
- Untersuchtes System
- Kollektortemperaturnutzung
- Laborergebnisse
- Feldtestdaten
- Simulation in Modelica
- Empfehlungen für Optimaleinstellungen
- Kernaussagen und Fazit

Aus den Untersuchungen und Analysen können folgende Optimaleinstellungen für das System angegeben werden:

- Die untersuchte **Gasadsorptionswärmepumpe** eignet sich auch für die Versorgung von **höheren Heiznetztemperaturen** (Radiatoren), die Temperaturniveaus sollten nur so hoch wie nötig gewählt werden. Bei einer **Absenkung um 1K** ist mit einer **Nutzungsgradverbesserung von 1 %** zu rechnen.
- Der Einsatz eines **Röhrenkollektors** liefert höhere Umweltwärmequellen-temperaturen. Bei gleicher Flächendimensionierung im Vergleich zu Flachkollektoren ergibt sich eine Verbesserung der Jahresheizzahl von 4 – 5 %.
- Niedrige Heizlasten im Verhältnis zur Nennleistung der Gasadsorptionswärmepumpe erhöhen den regenerativen Anteil in der Wärmeversorgung.

- Hintergrund und Zielsetzung
- Untersuchtes System
- Kollektortemperaturnutzung
- Laborergebnisse
- Feldtestdaten
- Simulation in Modelica
- Empfehlungen für Optimaleinstellungen
- Kernaussagen und Fazit

- **Gute Ergebnisse in der Praxis** (Feldtesterfahrungen der IGWP) bestätigen die Robustheit des Systems mit
 - einer hohen Verfügbarkeit und
 - sehr guten Effizienz.
- **Gute Übereinstimmung** zwischen Feldtestdaten und Laboruntersuchungen.
- Die **MAP-Anforderungen** an die **Gesamtjahresheizzahl > 1,3** werden erfüllt.
- **Anforderungen des EEWärmeG** an die Erneuerbaren Energien (> 15 %) werden erfüllt.
- Die untersuchte **Gasadsorptionswärmepumpe** eignet sich auch für die Versorgung von **höheren Heiznetztemperaturen** (Radiatoren), die Temperaturniveaus sollten nur so hoch wie nötig gewählt werden.
- **Optimaler Einsatz** bei niedrigen Heizkreistemperaturen, hohen Umweltwärmequellentemperaturen und bei niedriger Heizlast.
- Es wurde eine **dynamische Simulationsumgebung in Modelica** erstellt und validiert, um aufgrund der Komplexität des Systems weitergehende Untersuchungen bei der Integration in die Hausenergieversorgung durchführen zu können.



Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.
Hafenstraße 101
45356 Essen
Tel.: +49 (0) 201 3618 - 101
Fax: +49 (0) 201 3618 - 102