

Anwendungspotenziale der Gaswärmepumpe Optimierung der Umweltwärmeeinkopplung mit Sonde/Erdsamlektor/Außenluft-WT im System Gebäude/Anlagentechnik/Nutzer

Management Summary

G 5-03-10

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

ausgeführt durch: Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.,
DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Karlsruhe

Autoren:

Frank Erler, Dr. Hartmut Krause, Dr. Holger Dörr, Dr. Rolf Albus, Benedikt Scherber, Jens Brauner, Eren Tali

Essen, Oktober 2012



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



Hintergrund

Gaswärmepumpen stellen eine hocheffiziente Alternative für die Gebäudebeheizung dar. Eine optimale Integration in das System aus Anlagentechnik mit Umweltwärmeeinkopplung, Gebäude und insbesondere Nutzer ist gerade bei Wärmepumpen besonders wichtig für den effizienten Betrieb. Im Projekt wurden Gaswärmepumpen von 3 Herstellern in den Laboren der Institute DBI, EBI und GWI vermessen und deren Effizienz bewertet. Es wurden ferner Feldtestdaten zu den einzelnen Anlagen ausgewertet, um einen Vergleich zwischen Labordaten und Daten aus der praktischen Anwendung zu ermöglichen sowie Einflussparameter durch Nutzerverhalten und gebäudespezifische Parameter zu studieren. Des Weiteren wurden die Umweltwärmeeinkopplung insbesondere durch Erdsonden und Flächenkollektoren ausführlich behandelt.

Laboruntersuchungen

Um von Nutzereinflüssen bereinigte Aussagen über das System treffen zu können, wurden die Gaswärmepumpen an den Instituten DBI, EBI und GWI nach den Vorgaben der VDI Richtlinie 4650-2 vermessen. Die Wärmequellen wurden für die bessere Reproduzierbarkeit durch ein Kälteaggregat ersetzt. Dabei wurden die Gas-Wärmepumpen bei Heizkreistemperaturpaarungen von 35/28, 55/45 und teilweise bei 75/55 °C vermessen. Die untersuchten Systeme zeigen Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade von bis zu 150 % und weisen damit ihr Potenzial eindrucksvoll aus.

Feldtestdaten

Zur Vervollständigung der Bewertung wurden Feldtestdaten, die von der IGWP¹ Initiative Gaswärmepumpe zur Verfügung gestellt wurden, ausgewertet. Hier wurde das Zusammenspiel von Nutzer, System und Gebäude und deren Beeinflussung in der Praxis in Bezug auf die einzelnen Parameter untersucht. Es wurde deutlich, dass die System-Parameter sich gegenseitig stark beeinflussen und z. B. höhere Vorlauftemperaturen nicht unbedingt eine niedrigere Effizienz bewirken. Der Anteil an Trinkwarmwasser am Gesamtenergiebedarf dagegen zeigt einen erkennbaren Einfluss auf die Systemeffizienz. Bemerkenswert war die gute Übereinstimmung zwischen den Feldtestdaten und den Laborergebnissen. Die Abweichung im Bereich von ca. 10 % ist auch ein Beleg für die Zuverlässigkeit und Effizienz der Technologie.

Umweltwärmequellen

Die Auswahl der Umweltwärmequelle ist generell abhängig von den Randbedingungen des Gebäudes zu treffen. Grundwasser als Wärmequelle verspricht die beste Effizienz über das gesamte Jahr. Allerdings ist die Realisation kostenintensiv und die Genehmigungslage kompliziert. Meistens auf eine Kompromisslösung ausgewichen werden. Da eine Gaswärmepumpe weniger Umweltwärme benötigt als eine Elektrowärmepumpe ist es jedoch möglich, geeignete Lösungen zu finden. Die theoretische Betrachtung von Umweltwärmequellen wurde durch numerische Simulationen von Erdkollektoren mit verschiedenen Parametern unterstützt. Es wurde untersucht, wie sich Änderungen an den Randbedingungen eines Systems aus Kollektor und Erdboden auf den Energieertrag auswirken. Die Ergebnisse zeigen u. a. Entzugsleistungen als Funktion der Wärmeleitfähigkeiten von Rohr und Erdboden sowie Einflüsse von Geometrie und Verlegeart.

¹ 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.

Normen / Richtlinien

Ergänzend wurde ein kompletter Überblick über Richtlinien und Normen zusammengestellt. Auf dem Gebiet der Richtlinien und Normen wurde erheblicher Standardisierungsbedarf identifiziert. Die Einbringung von Kollektoren ist durch jedes Bundesland einzeln geregelt. Gerade auf dem Gebiet der Erschließung von Umweltwärmequellen kann es durch verschiedene Ansprechpartner zu Verwirrung und Verzögerung im Bau kommen.

Optimal-Einstellungen / Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse dieser Studie führen zu Handlungsempfehlungen für einen möglichst effizienten Einsatz von Gaswärmepumpen unter Berücksichtigung der Systemparameter. Durch die kombinierte Betrachtung von Feldtestdaten und Versuchsergebnissen konnten die theoretischen Vorüberlegungen validiert werden.

Anwendungspotenziale der Gaswärmepumpe Optimierung der Umweltwärmeeinkopplung mit Sonde/Erdfeldktor/Außenluft-WT im System Gebäude/Anlagentechnik/Nutzer

Abschlussbericht

G 5-03-10

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

ausgeführt durch: Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.,
DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Karlsruhe

Autoren:

Frank Erler, Dr. Hartmut Krause, Dr. Holger Dörr, Dr. Rolf Albus, Benedikt Scherber, Jens Brauner, Eren Tali

Essen, Oktober 2012

Management Summary

Hintergrund

Gaswärmepumpen stellen eine hocheffiziente Alternative für die Gebäudebeheizung dar. Eine optimale Integration in das System aus Anlagentechnik mit Umweltwärmeeinkopplung, Gebäude und insbesondere Nutzer ist gerade bei Wärmepumpen besonders wichtig für den effizienten Betrieb.

Im Projekt wurden Gaswärmepumpen von 3 Herstellern in den Laboren der Institute DBI, EBI und GWI vermessen und deren Effizienz bewertet. Es wurden ferner Feldtestdaten zu den einzelnen Anlagen ausgewertet, um einen Vergleich zwischen Labordaten und Daten aus der praktischen Anwendung zu ermöglichen sowie Einflussparameter durch Nutzerverhalten und gebäudespezifische Parameter zu studieren. Des Weiteren wurden die Umweltwärmeeinkopplung insbesondere durch Erdsonden und Flächenkollektoren ausführlich behandelt.

LABORUNTERSUCHUNGEN

Um von Nutzereinflüssen bereinigte Aussagen über die Geräte treffen zu können, wurden die Gaswärmepumpen an den Instituten DBI, EBI und GWI nach den Vorgaben der VDI Richtlinie 4650-2 vermessen. Die Wärmequellen wurden für die bessere Reproduzierbarkeit durch einen Kryostaten ersetzt. Dabei wurden die Gas-Wärmepumpen bei Heizkreistemperaturpaarungen von 35/28, 55/45 und teilweise bei 75/55 °C vermessen. Die untersuchten Systeme zeigen Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade von bis zu 150 % und weisen damit ihr Potenzial eindrucksvoll aus.

FELDTTESTDATEN

Zur Vervollständigung der Bewertung wurden Feldtestdaten, die von der IGWP zur Verfügung gestellt wurden, ausgewertet. Hier wurde das Zusammenspiel von Nutzer, System und Gebäude und deren Beeinflussung in der Praxis in Bezug auf die einzelnen Parameter untersucht. Es wurde deutlich, dass die System-Parameter sich gegenseitig stark beeinflussen und z. B. höhere Vorlauftemperaturen zwar eine niedrigere Effizienz bewirken, diese jedoch durch einen sparsamen Umgang mit Trinkwarmwasser kompensiert werden können. Bemerkenswert war die gute Übereinstimmung zwischen den Feldtestdaten und den Laborergebnissen. Die Abweichung im Bereich von ca. 10 % ist auch ein Ausweis für die Zuverlässigkeit und Effizienz der Technologie.

UMWELTWÄRMEQUELLEN

Die Auswahl der Umweltwärmequelle ist generell abhängig von den Randbedingungen des Gebäudes zu treffen. Grundwasser als Wärmequelle verspricht die beste Effizienz über das gesamte Jahr. Allerdings ist die Realisation kostenintensiv und die Genehmigungslage kompliziert. Meistens muss auf eine Kompromisslösung ausgewichen werden. Da eine Gaswärmepumpe weniger Umweltwärme benötigt als eine Elektrowärmepumpe ist es jedoch möglich geeignete Lösungen zu finden.

Die theoretische Betrachtung von Umweltwärmequellen wurde durch numerische Simulationen von Erdkollektoren mit verschiedenen Parametern unterstützt. Es wurde untersucht, wie sich Änderungen an den Randbedingungen eines Systems aus Kollektor und Erdboden auf den Energieertrag auswirken. Die Ergebnisse zeigen u. a. Entzugsleistungen als Funktion der Wärmeleitfähigkeiten von Rohr und Erdboden sowie Einflüsse von Geometrie und Verlegeart.

NORMEN/RICHTLINIEN

Ergänzend wurde ein kompletter Überblick über Richtlinien und Normen zusammengestellt. Auf dem Gebiet der Richtlinien und Normen wurde erheblicher Standardisierungsbedarf identifiziert. Die Einbringung von Kollektoren ist durch jedes Bundesland einzeln geregelt. Gerade auf dem Gebiet der Erschließung von Umweltwärmequellen kann es durch verschiedene Ansprechpartner zu Verwirrung und Verzögerung im Bau kommen.

OPTIMALEINSTELLUNGEN/HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Ergebnisse dieser Studie führen zu Handlungsempfehlungen für einen möglichst effizienten Einsatz von Gaswärmepumpen unter Berücksichtigung der Systemparameter. Durch die kombinierte Betrachtung von Feldtestdaten und Versuchsergebnissen konnten die theoretischen Vorüberlegungen validiert werden.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	I
1 Einleitung	9
2 Systembeschreibung	13
2.1 Die Gasmotorische Wärmepumpe	18
2.2 Die Absorptionswärmepumpe	19
2.3 Die Diffusionsabsorptionswärmepumpe	20
2.4 Die Adsorptionswärmepumpe	22
3 Systemparameter.....	24
3.1 Wärmequelle	24
3.2 Heizkreis.....	25
3.3 Nutzerverhalten	26
3.4 Hilfsenergie	27
3.5 Speicher	28
3.6 Regeneration des Bodens.....	29
4 Versuchs- und Demoanlagen	30
4.1 Diffusionsabsorptionswärmepumpe (Bosch-Nefit).....	30
4.1.1 Systemwirkungsgrad	36
4.1.2 Solare Warmwasserbereitung	38
4.1.3 Gesamtjahresnutzungsgrad	39
4.1.4 Vergleich Labor und Feldtestdaten.....	40
4.1.5 Zwischenfazit	41
4.2 Zeolith-Adsorptionswärmepumpe (Viessmann).....	42
4.2.1 Funktionsprinzip des Zeolith-Hybrid-Heizgerätes	42
4.2.2 Auswertung Anlagenbetrieb	44
4.2.3 Zusammenstellung der Messergebnisse.....	45
4.2.4 Ermittelte Kennzahlen der Wärmequelle Erdreich.....	46
4.2.5 Ermittelte Kennzahlen der Wärmequelle Solar.....	49

4.2.6 Zusammenfassung.....	52
4.3 Sole/Wasser- Gasabsorptionswärmepumpe (Robur)	53
4.4 Luft/Wasser- Gasabsorptionswärmepumpe (Bosch Thermotechnik)	56
5 Auswertung der Feldtestdaten	60
5.1 Feldtestdaten der Gaswärmepumpen der Firma Bosch-Nefit.....	60
5.1.1 Vergleich des System- und Anlagennutzungsgrades	71
5.1.2 Einfluss der Brauchwasserbereitung auf die Effizienz.....	75
5.1.3 Einfluss der Systemtemperaturen auf die Effizienz	76
5.1.4 Abhängigkeit der Effizienz von der Gebäudeheizlast	78
5.2 Feldtestdaten der Gasabsorptionswärmepumpen der Firma Robur	79
6 Detailbetrachtung unterschiedlicher Wärmequellen	84
6.1 Grundwasser	84
6.2 Geothermische Energie	85
6.2.1 Erdkollektoren	87
6.2.2 Numerische Simulation von Erdkollektoren	89
6.2.2.1 Allgemeine Informationen zum Simulationsprogramm	89
6.2.2.2 Beschreibung der Strömung in Flächenkollektoren	91
6.2.2.3 Wärmeübertragungsvorgänge	92
6.2.2.4 Randbedingungen, Stoff- und Materialkennwerte	93
6.2.2.5 Simulationsergebnisse der Kollektor-Geometrie 1	94
6.2.2.6 Simulationsergebnisse der Kollektor-Geometrie 2	101
6.2.2.7 Numerische Auslegung verschiedener Kollektorgeometrien bei unterschiedlichen Parametern	110
6.2.3 Sonden und Sondenfelder.....	113
6.2.3.1 Erdwärmesonden	113
6.2.3.2 Sondenfelder	116
6.2.4 Regeneration.....	117
6.3 Luft	119
6.4 Andere Wärmequellen.....	121
6.5 Zwischenfazit.....	121

7	Praktische Auslegung von GWP-Systemen	122
7.1	EED.....	123
7.2	EWS	127
8	Normen- und Regelwerk	131
8.1	Bestimmungen in Deutschland.....	131
8.1.1	Bestimmungen der einzelnen Bundesländer.....	132
8.2	Europaweite Bestimmungen.....	135
8.2.1	Österreich.....	135
8.2.2	Schweiz.....	136
8.2.3	England	139
8.2.4	Schweden	139
8.2.5	Drittländer.....	140
9	Normen und Richtlinien	141
10	Demonstrationszentrum	143
11	Definition von Optimaleinstellungen, Darstellung von Handlungsempfehlungen.....	148
11.1	Optimaleinstellungen.....	148
11.2	Handlungsempfehlungen	150
	Literaturverzeichnis	1
	Anhang A	7

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Wärmepumpenprozess im T-s Diagramm.....	10
Abbildung 1-2:	Temperaturverhältnisse in einem Wärmepumpenprozess	11
Abbildung 2-1:	Vereinfachtes Energieflussbild EWP - GWP	15
Abbildung 2-2:	Beispielhafter Verlauf der primärenergetischen Effizienz bei steigender Temperatur.....	16
Abbildung 2-3:	Schema einer gasmotorischen Wärmepumpe [IELe09]	18
Abbildung 2-4:	Schema einer Absorptionspumpe [IELe09].....	20
Abbildung 2-5:	Schema einer Diffusionsabsorptionswärmepumpe [IELe09]	21
Abbildung 2-6:	Schema einer Zeolith-Adsorptions-Wärmepumpe [IELe09]	23
Abbildung 3-1:	Vergleich unterschiedlicher Nutzertypen in Gebäuden ohne Lüftungsanlage [IWU03].....	27
Abbildung 4-1:	Schematische Darstellung des am GWI eingesetzten Versuchsstandes.....	30
Abbildung 4-2:	GW-Prüfstand (Hydraulik)	31
Abbildung 4-3:	Diffusionsabsorptions-wärmepumpe von Bosch Nefit	33
Abbildung 4-4:	Kennzahlen für die Heizkreise 35/28, 55/45 und 70/55 in %	36
Abbildung 4-5:	Gesamtwirkungsgrade der Bosch-Nefit-Gaswärmepumpe nach VDI 4650-2.....	38
Abbildung 4-6:	Gesamtwirkungsgrade der Bosch-Nefit-Gaswärmepumpe mit solarer Warmwasserbereitung nach VDI 4650-2	40
Abbildung 4-7:	Vergleich von Labordaten und Feldtestdaten.....	41
Abbildung 4-8:	Gesamtkonzept des Zeolith-Hybrid-Heizgerätes [Quelle: Viessmann]	43
Abbildung 4-9:	Standort der VITOSORP 200-F im Demonstrationszentrum.....	45
Abbildung 4-10:	Ermittelte Jahreskennzahlen (Wärmequelle Erdreich)	46
Abbildung 4-11:	Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen (Wärmequelle Erdreich).....	47
Abbildung 4-12:	Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen (Wärmequelle Erdreich).....	48
Abbildung 4-13:	Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen (Wärmequelle Erdreich).....	49
Abbildung 4-14:	Ermittelte Jahreskennzahlen (Wärmequelle Solar)	50
Abbildung 4-15:	Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen (Wärmequelle Solar).....	51

Abbildung 4-16:	Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen (Wärmequelle Solar).....	52
Abbildung 4-18:	GAHP-GS Gasabsorptionswärmepumpe (Sole/Wasser); Quelle Robur	53
Abbildung 4-18:	Teillastmessungen nach VDI 4650 Blatt 2 für die Sole/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpe, bei 0 % Last Jahresheizzahlen und Jahresnutzungsgrade, 100 % Lastmessungen fanden keinen Eingang in die Kennzahlenberechnungen, * tatsächlich 37,1 °C/ 28 °C	55
Abbildung 4-20:	Bosch Thermotechnik Logatherm GWPL-41 (Luft/Wasser); Quelle: Bosch Thermotechnik	56
Abbildung 4-20:	Teillastmessungen nach VDI 4650 Blatt 2 für die Luft/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpe, bei 0 % rel. thermische Leistung sind die Jahresheizzahlen und die Jahresnutzungsgrade aufgetragen, die Messungen bei 100 % fanden keinen Eingang in die Kennzahlenberechnungen	58
Abbildung 5-1:	Standorte der Feldtestanlagen der Gaswärmepumpe der Firma Bosch-Nefit (Quelle ERG)	60
Abbildung 5-2:	Feldtestanlage GWP 12	61
Abbildung 5-3:	Feldtestanlage GWP 09	62
Abbildung 5-4:	Einflussgrößen für das System Gaswärmepumpe	63
Abbildung 5-5:	Schaltschema der Bosch-Nefit GWP nach IGWP (Quelle: IGWP)	64
Abbildung 5-6:	Schematische Systemdarstellung	66
Abbildung 5-7:	Summe der Energien und Verläufe der Temperaturen über die Periode; GWP 03	69
Abbildung 5-8:	Summe der Energien und Verläufe der Temperaturen über die Periode; GWP 31	70
Abbildung 5-9:	Visualisierung zum Anlagennutzungsgrad „Nutz_HG_oS“	71
Abbildung 5-10:	Tageswerte der Anlagennutzungsgrade "Nutz_HG_oS" aufgetragen über den Quotienten aus dem gesamten Energieeintrag exklusiv Strom und der Gasenergie	72
Abbildung 5-11:	Visualisierung zum Systemnutzungsgrad „Nutz_Sys_Heiz_WW_oS“	73

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	73
Abbildung 5-13:	Tageswerte der Systemnutzungsgrade "Nutz_Sys_Heiz_WW_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie für Anlagen ohne Solarkollektor	74
Abbildung 5-14:	Tageswerte der Gerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS" aufgetragen über den Anteil Brauchwasser am Gesamtenergiebedarf	75
Abbildung 5-15:	Tageswerte der Vorlauftemperaturen aufgetragen über die Gerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS"	76
Abbildung 5-16:	Tageswerte der Soletemperaturen aufgetragen über die Gerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS"	77
Abbildung 5-17:	Gegenüberstellung der Feldtestdaten und der Erwartungswerte	79
Abbildung 5-18:	Gasabsorptionswärmepumpen der Reihe Robur GAHP Pro, links GAHP-GS/WS Pro (Sole/Wasser), rechts GAHP-A Pro (Luft/Wasser); Quelle: Robur	80
Abbildung 5-19:	Nutzungsgrade, Heizzahlen und Warmwasseranteile am Wärmebedarf über den jeweiligen Beobachtungszeitraum in Monaten, Anlagen mit Zirkulation sind mit einem (Z) gekennzeichnet	82
Abbildung 5-20:	Nutzungsgrade als Funktion der monatlichen Wärmeabgabe, * kennzeichnet Anlagen mit teilweise interpolierten Monatswerten	83
Abbildung 6-1:	Wärmepumpe mit Grundwassernutzung [HeVi12]	84
Abbildung 6-2:	Jahreszeitlicher Einfluss auf die Temperatur der obersten Erdschichten [ETI]	86
Abbildung 6-3:	Wärmepumpe mit Erd-Flachkollektoren [HeVi12a]	87
Abbildung 6-4:	Mögliche Entzugsleistungen für Erdwärmekollektoren für 1800 bis 2400 Jahresbetriebsstunden [VDI01]	88
Abbildung 6-5:	Fluent Programmstruktur	90
Abbildung 6-6:	Vorgehensweise bei der mathematischen Modellierung mit FLUENT [Ha01]	91
Abbildung 6-7:	Geometrie von Kollektor 1	95

Abbildung 6-8:	Wärmeleitfähigkeit und Soleaustrittstemperatur bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten (Kollektor 1)	96
Abbildung 6-9:	Kollektorleistung, Soleaustrittstemperatur und Druckverlust bei verschiedenen Volumenströmen (Kollektor 1)	97
Abbildung 6-10:	Kollektorleistung bei verschiedenen Rohrdurchmesser und vier verschiedenen Temperaturszenarien (Kollektor 1)	98
Abbildung 6-11:	Kollektorleistung und Soletemperaturdifferenz bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten des Rohres (Kollektor 1)	99
Abbildung 6-12:	Kollektorleistung bei anteiliger Umhüllung mit Luft (Kollektor 1)	100
Abbildung 6-13:	Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messergebnissen (Kollektor 1).....	101
Abbildung 6-14:	Geometrie von Kollektor 2.....	102
Abbildung 6-15:	Wärmeleitfähigkeit und Soleaustrittstemperatur bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten (Kollektor 2)	103
Abbildung 6-16:	Kollektorleistung, Soleaustrittstemperatur und Druckverlust bei verschiedenen Volumenströmen (Kollektor 2)	104
Abbildung 6-17:	Kollektorleistung bei verschiedenen Rohrdurchmesser und vier verschiedenen Temperaturszenarien (Kollektor 2)	105
Abbildung 6-18:	Kollektorleistung und Soletemperaturdifferenz bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten des Rohres (Kollektor 2)	106
Abbildung 6-19:	Kollektorleistung bei anteiliger Umhüllung mit Luft (Kollektor 2)	107
Abbildung 6-20:	Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messergebnissen (Kollektor 2).....	108
Abbildung 6-21:	Vergleich der Leistung von Kollektor 1 und Kollektor 2 bei fünf Temperaturszenarien	109
Abbildung 6-22:	Leistung von Kollektor 1 und Kollektor 2 bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten.....	110
Abbildung 6-23:	Vergleich der Kollektorleistung in Abhängigkeit der Bodenwärmeleitfähigkeit und Rohrwärmeleitfähigkeit.....	112
Abbildung 6-24:	Soletemperaturdifferenz in Abhängigkeit der Bodenwärmeleitfähigkeit und Rohrwärmeleitfähigkeit.....	112
Abbildung 6-25:	Modell einer Wärmepumpenheizung mit Erdwärmesonde [BWP]	113

Abbildung 6-26:	Prinzipskizze Erdwärmesonde [Quelle: geoENERGIE Konzept GmbH].....	115
Abbildung 6-27:	Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Kollektors bei einer Wärmeeinspeisung im Sommer im 2. Jahr [Glü].....	118
Abbildung 6-28:	Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Kollektors ohne Wärmeeinspeisung im Sommer im 2. Jahr [Glü].....	119
Abbildung 6-29:	Wärmepumpe mit Luftkollektor [HeVi12c].....	120
Abbildung 7-1:	Einstellmöglichkeiten des Programms EED.....	123
Abbildung 7-2:	Ergebnisgrafik des Programms EED.....	124
Abbildung 7-3:	Ergebnisgrafik des Programms EED.....	125
Abbildung 7-4:	Mögliche Sondenarrordnungen des Programms EED.....	126
Abbildung 7-5:	Einstellmöglichkeiten des Programms EWS bei der Sondenbeschaffenheit	127
Abbildung 7-6:	Einstellmöglichkeiten des Programms EWS bei der Bodenbeschaffenheit	128
Abbildung 7-7:	Einstellmöglichkeiten des Programms EWS zum Entzug	129
Abbildung 7-8:	Ergebnisdarstellung des Programms EWS.....	130
Abbildung 10-1:	Versuchshaus mit Solarkollektoren im Hintergrund und Trockenkühler zum gleichzeitigen Betrieb mehrerer Anlagen. Vor dem Haus sind 3 Erdkollektoren für Wärmepumpen installiert..	143
Abbildung 10-2:	Schematische Darstellung der Anbindung von Heizungsanlagen im Versuchshaus an den Trockenkühler	144
Abbildung 10-3:	Vor dem Versuchshaus verlegte Flächenkollektoren und Hydraulik zur Umschaltung der Flächenkollektoren	144
Abbildung 10-4:	Solarthermiemodule für die Brennwert plus Solar- und Gaswärmepumpenanlage	145
Abbildung 10-5:	Aufstellsituation im Ausstellungsraum (schematisch), nicht eingezeichnet ist die Bosch-Wärmepumpe	146
Abbildung 10-6:	KWK-Geräte (links), Wärmepumpen, Brennwertkessel und Brennstoffzelle (rechts)	147
Abbildung 10-7:	Installationsstationen und Speicher in den Kellerräumen.....	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Heiznetztemperaturen in Abhängigkeit der Leistung nach VDI 4650-2	33
Tabelle 4-2:	Umweltwärmequellentemperatur in Abhängigkeit der Leistung nach VDI 4650-2	34
Tabelle 4-3:	Kennzahlen für die Heizkreise 35/28, 55/45 und 70/55°C in % ...	35
Tabelle 4-4:	Gesamtwirkungsgrade (in Klammern ohne Taktung) der Bosch-Nefit-Gaswärmepumpe nach VDI 4650-2	37
Tabelle 4-5:	Gesamtwirkungsgrade (in Klammern ohne Taktung) der Bosch-Nefit-Gaswärmepumpe nach VDI 4650-2	39
Tabelle 4-6:	Ermittelte Jahreskennzahlen für Raumheizung	46
Tabelle 4-7:	Gesamt-Jahreskennzahlen der VITOSORP 200 (Erdsonde)	47
Tabelle 4-8:	Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen mit solarunterstützter Warmwasserbereitung	48
Tabelle 4-9:	Gesamtjahreskennzahlen bei solarunterstützter Raumheizung und WW-Bereitung	49
Tabelle 4-10:	Ermittelte Jahreskennzahlen für Raumheizung (Solar)	50
Tabelle 4-11:	Gesamt-Jahreskennzahlen mit solar unterstützter Warmwasserbereitung	51
Tabelle 4-12:	Gesamtjahreskennzahlen bei solar unterstützter Raumheizung und WW-Bereitung	52
Tabelle 4-13:	Jahresnutzungsgrade und Jahresheizzahlen für die Sole/Wasser- und Jahresnutzungsgrade für die Wasser/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpen nach VDI 4650 Blatt 2	55
Tabelle 4-14:	Jahresnutzungsgrade und Jahresheizzahlen nach VDI 4650 Blatt 2 für die Luft/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpe	58
Tabelle 5-1:	Übersicht der Gerätestandorte der Gaswärmepumpe der Firma Bosch-Nefit	61
Tabelle 5-2:	Zeichen und Operatoren	65
Tabelle 5-3:	Nomenklatur Nutzungsgrade und Berechnungsgrundlagen	66
Tabelle 5-4:	Einflussgrößen und Anlagenparameter	67
Tabelle 5-5:	Übersichtstabelle zu den Anlagen	81
Tabelle 6-1:	Stoffwerte für die Sole	93

Tabelle 6-2:	Stoffwerte für Luft.....	94
Tabelle 6-3:	Stoffwerte Boden.....	94
Tabelle 6-4:	Materialeigenschaften der Kollektorrohre.....	94
Tabelle 6-5:	Bewertung unterschiedlicher Wärmequellen nach Effizienz, Kosten, Aufwand und Genehmigung.....	121
Tabelle 8-1:	Übersicht über die Leitfäden der einzelne Bundesländer.....	132
Tabelle 8-2:	Übersicht über die Wartungs-/Kontrollintervalle in den verschiedenen Bundesländern.....	134
Tabelle 8-3:	Genehmigungspflicht für versch. Erdkollektoren im Schweizer Recht.....	137
Tabelle 0-1:	Grenzwerte des Schalldruckpegels 0,5 m vor dem Fenster eines schutzbedürftigen Raumes	7

1 Einleitung

Gaswärmepumpen stellen eine hocheffiziente Alternative für die Gebäudebeheizung dar, da diese Systeme hohe Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade aufweisen und zudem erneuerbare Energien einkoppeln. Gaswärmepumpen nutzen – wie elektrisch betriebenen Wärmepumpen auch – Umweltwärme, um Wärme zur Beheizung bereit zu stellen. Die am Markt verfügbaren Systeme verwenden dazu Kollektoren in unterschiedlichsten Ausführungen, die die Umweltwärme aufnehmen und über die Wärmepumpe auf ein zur Beheizung geeignetes Temperaturniveau heben und im Gebäude verfügbar machen. Die Kollektoren können dabei die Wärme des Erdreichs, des Grundwassers oder der Umgebungsluft als Wärmequelle nutzen.

Erdkollektoren und Erdsonden sind mit einem erheblichen baulichen Aufwand verbunden. Dazu kommt, dass Erdkollektoren eine freie, unbebaute Fläche benötigen und Erdsonden nicht in jedem Fall genehmigt werden. Als Alternative sind ferner Luftkollektoren verfügbar, die ohne größeren Aufwand installiert werden können oder bereits im Gerät integriert sind. Da die Effizienz einer Wärmepumpe von der Temperaturspreizung im Wärmepumpenprozess¹ abhängig ist und die Lufttemperatur vergleichsweise stärkeren Schwankungen unterliegt, führt der Einsatz von Luftkollektoren durch die Gegenläufigkeit der Heizungsvorlauf- und der Wärmequellentemperatur besonders zu Zeiten mit hohem Wärmebedarf zu Effizienzeinbußen.

Eine Gaswärmepumpe hat den Vorteil, dass sie prozessbedingt sowohl die Warmwasserbereitung als auch generell höhere Temperaturen primärenergetisch günstiger bereitstellen kann, als eine Elektrowärmepumpe, die teilweise auf einen Elektroheizstab zur Nachheizung zurückgreift.

Gegenüber einer Gasfeuerungsheizung, die die Nutzwärme nur aus Primärenergie bereitstellt, hat die Gaswärmepumpe den Vorteil, dass durch die Nutzung von Umweltwärme (Anergie) die Effizienzkennzahlen größer sind. Dadurch werden Primärenergieeinsatz und die damit verbundenen Kosten und Emissionen reduziert.

¹ Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke

Einleitende Beschreibung der Effizienzkennzahlen

Ein Wärmepumpenprozess mit einem Verdichter kann als Carnot-Kreisprozess angesehen werden. In Abbildung 1-1 ist der linksdrehende Kreisprozess einer Wärmepumpe mit mechanischem Verdichter zur Veranschaulichung des Wärmepumpenprinzips in einem T-s-Diagramm beispielhaft dargestellt.

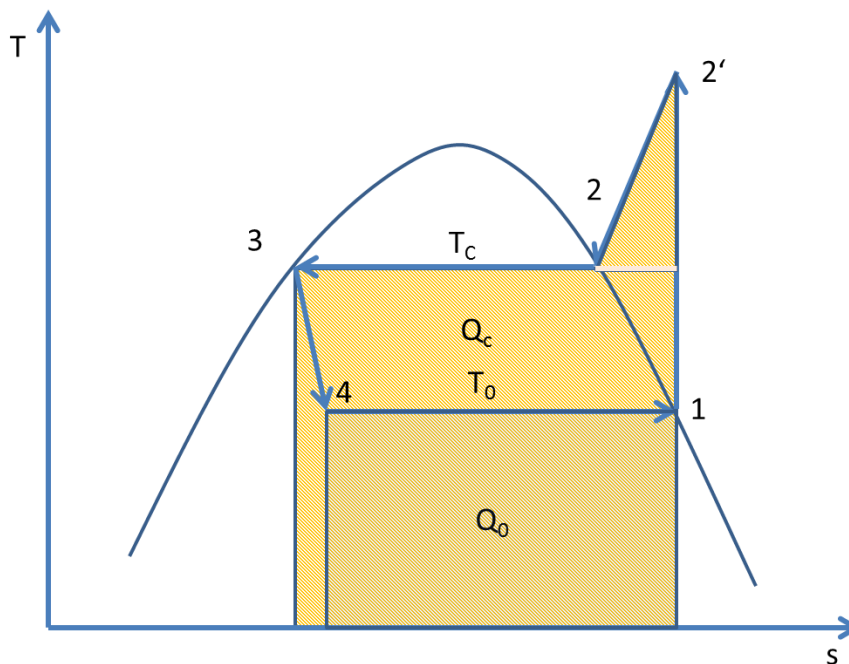


Abbildung 1-1: Wärmepumpenprozess im T-s Diagramm

Das Kältemittel wird durch Wärmezufuhr Q_0 im Verdampfer aus der Umweltwärmequelle verdampft (4–1) und liegt bei Punkt 1 im gasförmigen Zustand vor. Anschließend wird das Kältemittel durch einen Verdichter verdichtet (1–2'). Dies führt zu einem Druck- und Temperaturanstieg. An Punkt 2' liegt das Kältemittel gasförmig mit einer erhöhten Temperatur und Druck vor. Das Kältemittel übergibt die Wärmemenge Q_c in einem Wärmeübertrager (Kondensator) und wird verflüssigt. Die Kondensationsenthalpie, die bei der Kondensation frei wird, wird an das Heiznetz übertragen. An Punkt 3 liegt das Kältemittel flüssig und unter erhöhtem Druck vor. Das unter Druck stehende Kältemittel wird in einer Drossel entspannt (3–4) und die Temperatur auf T_0 abgesenkt.

Entscheidend für die Effizienz einer Wärmepumpe ist die Menge der zuzuführenden Energie, die nötig ist, um das Temperaturniveau der Umweltwärmequelle auf das Temperaturniveau des Heiznetzes zu „heben“. Diese Energie wird über die Verdichterarbeit bzw. Verdichterleistung bei elektrisch betriebenen Verdichtern oder über eine Wärmezufuhr bei thermischen „Verdichtern“ bereitgestellt.

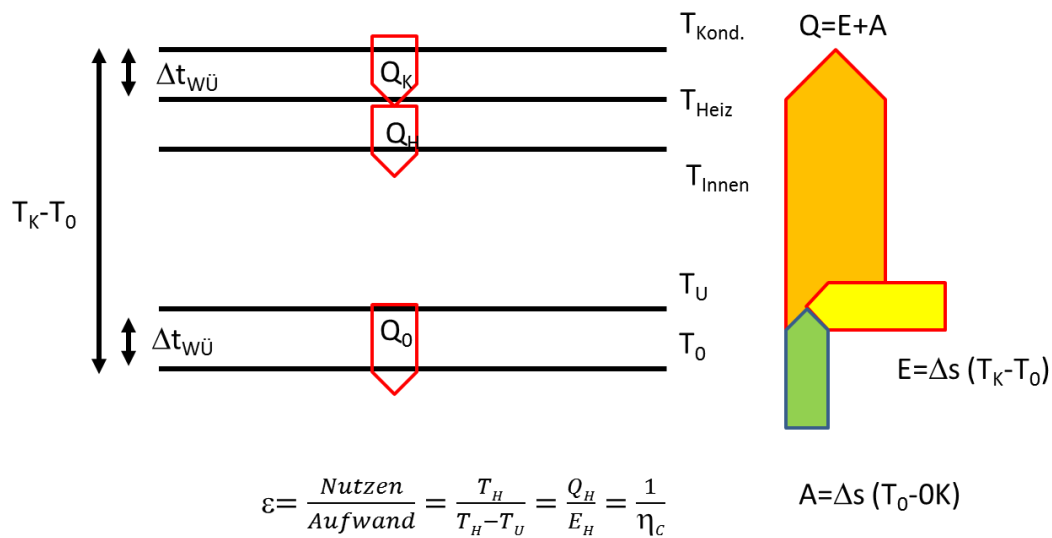


Abbildung 1-2: Temperaturverhältnisse in einem Wärmepumpenprozess

Die Energie (Exergie), die eingesetzt werden muss, um die Umweltwärme (Anergie) nutzbar zu machen, ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen T_H (Nutz/Heiztemperatur) und T_U (Umweltwärmequellentemperatur). T_K bezeichnet 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 (in Abbildung 1-2 zur Verdeutlichung eingezeichnet). 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:

$$WP_{rev} = \frac{T_H}{T_H - T_U}$$

mit

T_H = hohe Prozesstemperatur (Heizungsvorlauf) und

T_U = niedrige Prozesstemperatur (Umweltwärmequellentemperatur).

Die Leistungszahl des irreversiblen Prozesses folgt durch Multiplikation mit dem exergetischen Wirkungsgrad.

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

Der Exergiestrom kann nicht nur in Form von reiner Exergie (elektrische Energie) durch einen mechanischen Verdichter (Elektrowärmepumpe) bereitgestellt werden, sondern auch durch einen Wärmestrom (Gaswärmepumpe). Dem entsprechend wird für diesen Fall anstatt der Leistungszahl ein Wärmeverhältnis aus nutzbarer Heizwärme und zugeführter Wärme aus einem Verbrennungsprozess eingeführt:

$$\zeta = \frac{Q_H}{Q_A}$$

Auch bei der thermischen Verdichtung muss wie zuvor beschrieben die Wärme von der Temperatur T_U auf T_H „gehoben“ werden. Dies erfolgt über die Exergie der Wärme Q_A mit der Temperatur T_A :

$$Q_H \frac{T_H - T_U}{T_H} = Q_A \frac{T_A - T_U}{T_A}$$

Daraus folgt ein Carnot'sches Wärmeverhältnis:

$$\zeta_C = \frac{Q_H}{Q_A} = \frac{\frac{T_A - T_U}{T_A}}{\frac{T_H - T_U}{T_H}}$$

Die Heizzahl bewertet die eingesetzte Primärenergie durch den Bezug auf die eingesetzte Brennstoffenergie und berücksichtigt die Prozessverluste durch einen Wirkungsgrad der Wärmebereitstellung (Kesselwirkungsgrad) und einen Carnot'schen Gütegrad, der das effektive Wärmeverhältnis zum Carnot'schen ins Verhältnis setzt [Ba83].

$$\zeta_H = \frac{Q_H}{Q_{Br}} = \eta_k \eta_{CG} \zeta_C = \eta_k \zeta_{eff}$$

Der Zusammenhang zwischen Leistungs- bzw. Arbeitszahl und der Heizzahl wird weiter unten in Abbildung 2-1 noch einmal erläuternd aufgegriffen.

2 Systembeschreibung

Ein Wärmepumpensystem besteht aus drei Hauptkomponenten: Der Umweltwärmequelle, der Antriebseinheit für den Wärmepumpenprozess und dem Heiznetz, das als Wärmesenke dient.

Wärmequellen sind z. B. der Boden, die Luft oder noch selten genutzte Quellen wie Abluft oder Abwasser. Wichtig bei der Quellenauswahl ist eine eingehaltene Mindesttemperatur über das ganze Jahr und eine entsprechende Verfügbarkeit. Bei Verwendung von Luftkollektoren kann es – je nach Auslegung – vorkommen, dass an einigen Tagen des Jahres nicht genügend Umweltwärme eingekoppelt werden kann, um den Wärmepumpenprozess mit hoher Effizienz betreiben zu können, dafür ist die Verfügbarkeit prinzipiell immer und überall gegeben.

Über die Antriebseinheit wird die Umweltwärme nutzbar gemacht. Dabei kann es sich um einen Verdichter (elektrisch oder gasmotorisch betrieben) oder – wie in dieser Arbeit behandelt – eine Sorptionseinheit mit Gasbrenner für die Desorption handeln. Es existiert sowohl das Prinzip der Adsorption (Anreicherung eines Kältemittels auf einem Feststoff) als auch das der Absorption (Anreicherung eines Kältemittels in einer Flüssigkeit).

Zur Beurteilung von gasbetriebenen Wärmepumpen wird die so genannte Heizzahl bzw. der Nutzungsgrad herangezogen. Die Heizzahl beschreibt das Verhältnis von Nutzenergie zu der gesamten eingesetzten Energie, hierbei wird sowohl die eingesetzte Gasenergie als auch die elektrische Hilfsenergie betrachtet. Im Vergleich zur Leistungszahl ist zu beachten, dass bei einem elektrisch betriebenem Verdichter die zugeführte Energie thermodynamisch hochwertiger (100 % Exergie) ist und zunächst im Kraftwerk mit einem Wirkungsgrad von ca. 0,37 im Mittel erzeugt werden muss, während bei der thermischen Verdichtung der kleinere Exergieanteil der Wärme oder auch Abwärme genutzt wird. Der Anergieanteil wird im Prozess mit transportiert. Es steht demnach weniger „Arbeitsfähigkeit“ für den Prozess zur Verfügung – bzw. ist notwendig. Aufgrund des unterschiedlichen Bezugs sind die Heizzahlen zwangsläufig kleiner als Leistungszahlen. Der Nutzungsgrad ist analog zum Nutzungsgrad eines herkömmlichen Gasheizgerätes und bezieht nur die eingesetzte Brennstoffenergie mit ein.

Die Definition des Nutzungsgrades lautet wie folgt

$$\eta_{h,i} = \frac{P_{i,th}}{Q_i}$$

Dabei ist

$\eta_{h,i}$ der Nutzungsgrad,

$P_{i,th}$ die Wärmeleistung und

Q_i die Brennstoffleistung.

Der Index i drückt aus, dass es sich um Einzelnutzungsgrade in einem Lastpunkt handelt.

Analog dazu lautet die Definition der Heizzahl unter Berücksichtigung der eingesetzten elektrischen Hilfsenergie

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

Dabei ist

$\zeta_{h,i}$ die Heizzahl,

$P_{i,th}$ die Wärmeleistung,

Q_i die Brennstoffleistung und

$P_{i,el}$ die elektrische Leistungsaufnahme.

Bei elektrischen Wärmepumpen wird die Arbeitszahl verwendet. Diese beschreibt das Verhältnis von Heizenergie zu eingesetztem elektrischen Strom. Sie ist wie folgt definiert.

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

Dabei repräsentiert

ε die Arbeitszahl,

P_{th} die thermische Energie und

P_{el} elektrische Energie

Bei dem Vergleich von Arbeitszahl und Heizzahl ist zu beachten, dass der vorgeschaltete Kraftwerksprozess mit seinen Verlusten nicht berücksichtigt wird. Die Umwandlung von Primärenergieträgern elektrische Energie geschieht im Mittel mit

einem Wirkungsgrad von ca. 37 % (2005), diese Verluste müssen bei der Betrachtung mitberücksichtigt werden. In Abbildung 2-1 ist ein primärenergetischer Vergleich der Energieflüsse von Elektrowärmepumpe (EWP) und Gaswärmepumpe (GWP) dargestellt. Als Grundlage zur primärenergetischen Bewertung dienen Primärenergiefaktoren aus der VDI Richtlinie 4701-10 (10.2009).

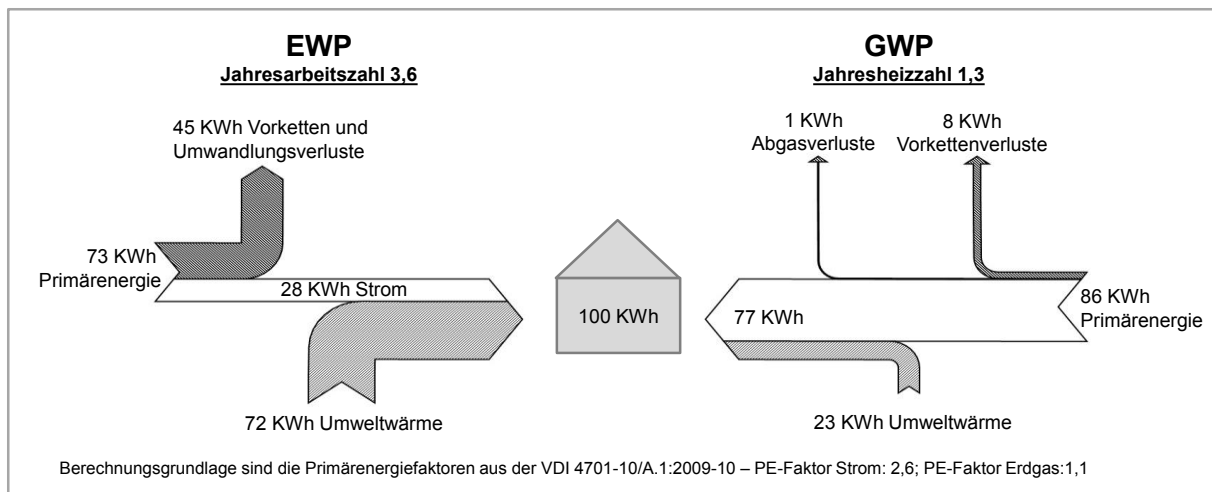


Abbildung 2-1: Vereinfachtes Energieflussbild EWP - GWP

Der primärenergetische Zusammenhang zwischen Arbeitszahl und Heizzahl kann über die Berücksichtigung des gemittelten Wirkungsgrades des Kraftwerksparks wie folgt hergestellt werden.

$$\zeta_{h,i} = \eta_{KW} * \varepsilon_{h,i}$$

Dabei ist

$\zeta_{h,i}$ die Heizzahl,

$\varepsilon_{h,i}$ die Arbeitszahl und

η_{KW} der mittlere Wirkungsgrad des Kraftwerksparks.

Mit einem Wirkungsgrad für den Kraftwerkspark von 0,37 (2005) und einer Arbeitszahl von 3,5 folgt für die Elektrowärmepumpe zum Vergleich eine Heizzahl von 1,295 (streng genommen müssten hier noch die Wirkungsgrade der Wärmeverteilung und des Elektromotors berücksichtigt werden).

Eine Gaswärmepumpe vereint die Vorteile einer Elektrowärmepumpe und eines Gasbrennwertgerätes. In niedrigen Laststufen und bei niedrigen Heizkreistemperaturen zeichnet sich das System durch eine hohe Effizienz wie auch bei Elektrowärmepumpen aus. Ein Nachteil bei Elektrowärmepumpen besteht in der sinkenden Effizienz bei höheren Heizkreistemperaturen und steigenden Lasten. Die Gaswärmepumpe erweist sich hier weniger abhängig von der Quellentemperatur

(Vergl. Abbildung 5-15: Tageswerte der Vorlauftemperaturen aufgetragen über die Gerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS"), auch bei erhöhten Temperaturen kann eine Gaswärmepumpe mit einer guten Effizienz betrieben werden. Sollten noch weitaus höhere Temperaturen wie z. B. bei der Warmwasserbereitung benötigt werden, nähert sich eine Gaswärmepumpe in der Effizienz einem Gasbrennwertgerät an bzw. wird als solches betrieben. In Abbildung 2-2 ist beispielhaft der Verlauf der primärenergetischen Effizienz bei steigender Vorlauftemperatur dargestellt.

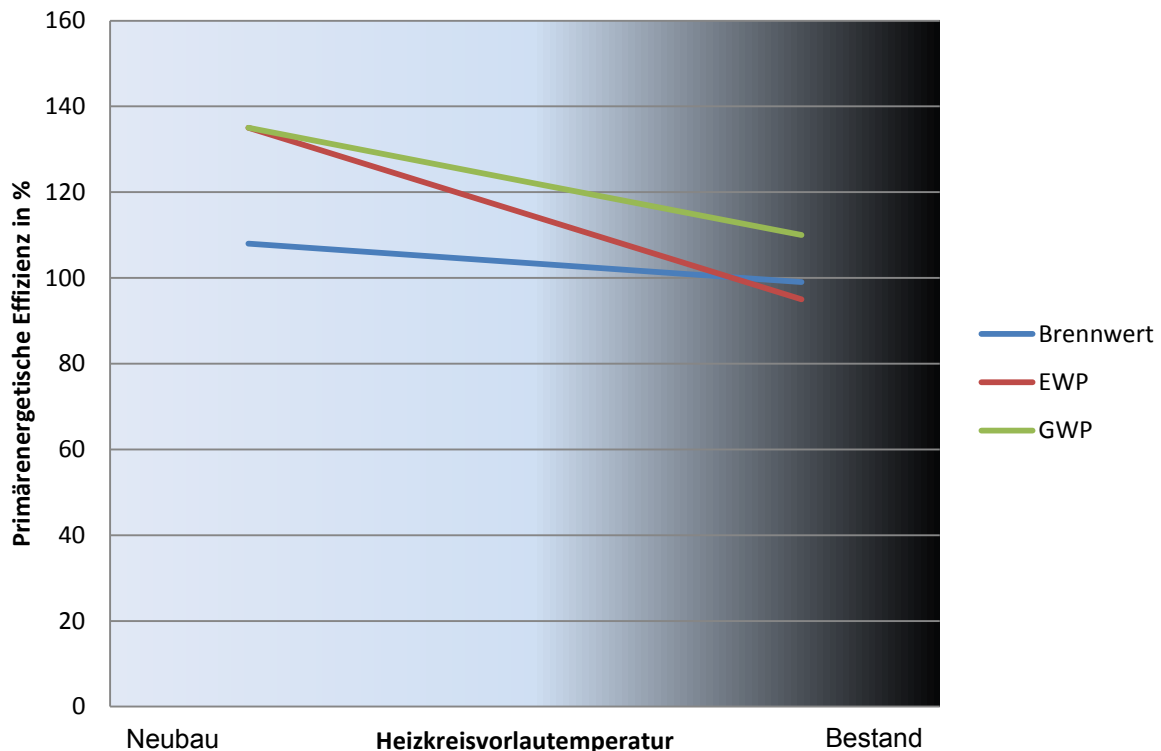


Abbildung 2-2: Beispielhafter Verlauf der primärenergetischen Effizienz bei steigender Temperatur

Als Wärmesenke dient das herkömmliche Heiznetz, dabei gibt es keine Unterschiede zu anderen Heizungsanlagen. Zu beachten ist allerdings, dass Wärmepumpen von niedrigen Heizkreistemperaturen stärker profitieren als andere Heizgeräte. So kann durch niedrige Heizkreistemperaturen bei einem Brennwertgerät eine Effizienzsteigerung von ~10 Prozentpunkten erreicht werden, bei Wärmepumpen allerdings kann eine ähnliche Temperaturabsenkung eine Steigerung von ca. 20 Prozentpunkten im Wirkungsgrad bedeuten.

Die Wärmepumpenanlage mit ihren drei Hauptkomponenten ist immer im Zusammenhang mit dem Gesamtsystem zu betrachten. Dabei sind die Faktoren Gebäude, Nutzer und bei den meisten Umweltwärmequellen das Klima bzw. Wetter ebenfalls zu beachten. Bei Luftkollektoren ist die Auswirkung des Klimas am stärksten zu beobachten, bei anderen Wärmequellen wie z. B. Erdreich müssen längere Kälteperioden auftreten, um eine Auswirkung zu zeigen.

Das Gebäude bzw. die Dämmung, der Nutzer und auch indirekt die Wohnfläche sind entscheidend für den Wärmebedarf. Das im Haus installierte Heizwärmeübertragungssystem bildet die Basis für die Auswahl der Heizkreistemperaturen.

Der Nutzer selbst hat einen starken Einfluss auf die Wärmeanforderung und Heizkreistemperatur, da er durch Einstellungen an der Anlage höhere oder niedrige Temperaturen bzw. Wärmeleistungen anfordern kann, als es die Auslegung vorgesehen hat. Des Weiteren hat der Nutzer über die Warmwasserbereitung einen großen Einfluss auf die Gesamteffizienz. Brauchwasser wird immer bei höheren Temperaturen (ca. 55°C) bereitgestellt, während die Heizkreistemperaturen im Neubausektor meistens bei 30–40 °C oder darunter liegen. Wie bereits erwähnt, wirken sich hohe Temperaturen im Prinzip negativ auf die Effizienz aus. Die Feldtestauswertungen zeigen, dass auch bei höheren Temperaturen eine gute Effizienz erreicht wird. Ein System mit einem hohen Warmwasserverbrauch wird dem zufolge mit einem niedrigeren Gesamtwirkungsgrad arbeiten.

Einige Umweltwärmequellen sind unabhängig von den klimatischen Bedingungen, während andere direkt dadurch beeinflusst werden. Im Idealfall sollte als Wärmequelle auf eine klimaunabhängige, konstante Quelle, wie z. B. Grundwasser, zurückgegriffen werden. Allerdings ist der Genehmigungsprozess aufwendiger, so dass andere Quellen vorgezogen werden. Als Gegenbeispiel ist die Nutzung der Umgebungsluft direkt von den saisonalen und täglichen Klimabedingungen abhängig. Bei niedrigen Temperaturen sinkt die Effizienz des Wärmepumpenprozesses und an Tagen mit sehr großem Wärmebedarf wird unter Umständen zusätzlich auf einen evtl. integrierten Brennwertprozess zurückgegriffen (Fa. Vaillant), weil die Effizienz des Wärmepumpenbetriebes nicht mehr gegeben ist. In Bezug auf die Wetterabhängigkeit liegt der Erdkollektor im Mittelfeld. Er kann auch bei niedrigeren Lufttemperaturen ausreichend Energie aus dem Erdreich ziehen. Wie bei allen Wärmequellen ist auf eine richtige Dimensionierung zu achten. Wird er zu klein ausgelegt, kann mehr Wärme dem Boden entzogen werden, als während der Sommermonate regeneriert werden kann. Dadurch kann der Boden einfrieren und dauerhaft beeinträchtigt werden. Durch die sich bildenden Eisschichten bricht der Boden auf und nach Abschmelzen des Eises bleiben luftgefüllte Hohlräume zurück, die den Wärmeübergang beeinträchtigen.

Die hier angesprochenen Faktoren werden im weiteren Verlauf näher untersucht. Zunächst werden die unterschiedlichen Typen von Gaswärmepumpen rekapituliert.

2.1 Die Gasmotorische Wärmepumpe

Bei motorisch betriebenen Gaswärmepumpen (siehe Abbildung 2-3) wird die Antriebsenergie des Verdichters aus einem Gasmotor gewonnen. Zusätzlich zur Verdichtungsleistung des Gasmotors kann auch die Abwärme des Motors und des Abgases genutzt und dadurch die Ausbeute des Brennstoffes gesteigert werden. Dadurch ist es auch möglich, höhere Temperaturen zu nutzen. Kältemittel wird durch die Einkopplung von Umweltwärme verdampft und in den mechanischen Verdichter geleitet. Das gasförmige Kältemittel wird verdichtet. Es erhöhen sich dabei Druck und Temperatur. Das verdichtete Kältemittel kondensiert in einem nachgeschalteten Kondensator. Dabei wird die entstehende Wärme für das Heiznetz genutzt. Das immer noch unter Druck stehende, jetzt aber flüssig vorliegende Kältemittel wird entspannt und der Kreislauf beginnt von neuem. Gasmotorwärmepumpen erreichen eine Heizzahl von $\sim 1,6$ [StaWo00].

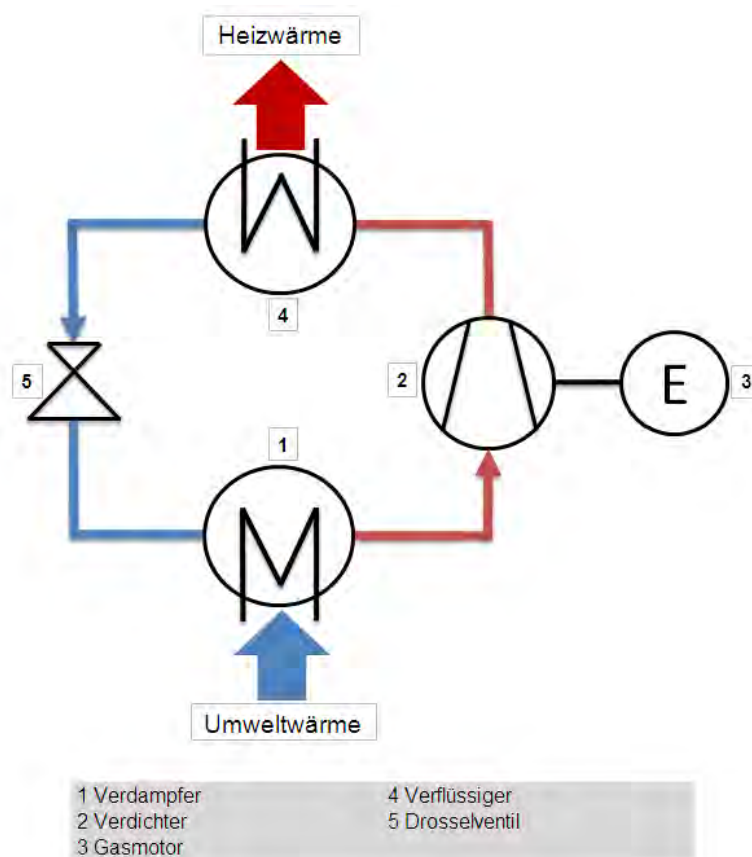


Abbildung 2-3: Schema einer gasmotorischen Wärmepumpe [IELe09]

2.2 Die Absorptionswärmepumpe

Das Prinzip der Absorptionswärmepumpe (AWP) (siehe Abbildung 2-4) basiert auf dem einer Kompressionswärmepumpe (KWP). Der Unterschied besteht in der Art der Verdichtung des Arbeitsstoffes. Die AWP nutzt anders als die KWP, einen so genannten thermischen Verdichter. Dieser besteht aus Absorber, Lösungspumpe, Austreiber und Drosselventil. Der Vorteil liegt hierbei in der verminderten Aufnahme von elektrischer Energie. Die zur Verdichtung des Arbeitsgases in einer KWP nötige Energie ist vielfach höher, als die elektrische Energie zur Kompression des flüssigen Stoffpaares in einer AWP durch die Lösungspumpe. Es wird ein Stoffpaar, meist Ammoniak und Wasser mit Hilfe der Lösungspumpe (3) auf das geforderte Druckniveau gebracht. Im anschließenden Austreiber (4) werden Kälte- und Lösungsmittel durch Zuführen von Wärme durch Gasverbrennung voneinander getrennt. Das nun gasförmige Kältemittel wird zum Kondensator (5) geführt, wobei das flüssige Lösungsmittel zurück zum Absorber strömt. Im Kondensator kann die durch Kondensation gewonnene Wärme zu Heizzwecken genutzt werden. Die nachfolgende Entspannung des Kältemittels im Drosselventil (6) bewirkt die Absenkung auf das untere Druckniveau und die damit verbundene Absenkung der Temperatur. Im Verdampfer (1) wird unter Aufnahme von Umweltwärme das Kältemittel wieder verdampft. Das Kältemittel wird im Absorber über das zum thermischen Verdichter gehörende Drosselventil (6) rückströmende Lösungsmittel absorbiert. Die hier wieder frei werdende Wärme durch Kondensation des Kältemittels wird abgeführt und ebenfalls als Heizwärme genutzt. Das Stoffpaar wird nun wie zu Beginn mit Hilfe der Lösungspumpe (3) auf das obere Druckniveau verdichtet.

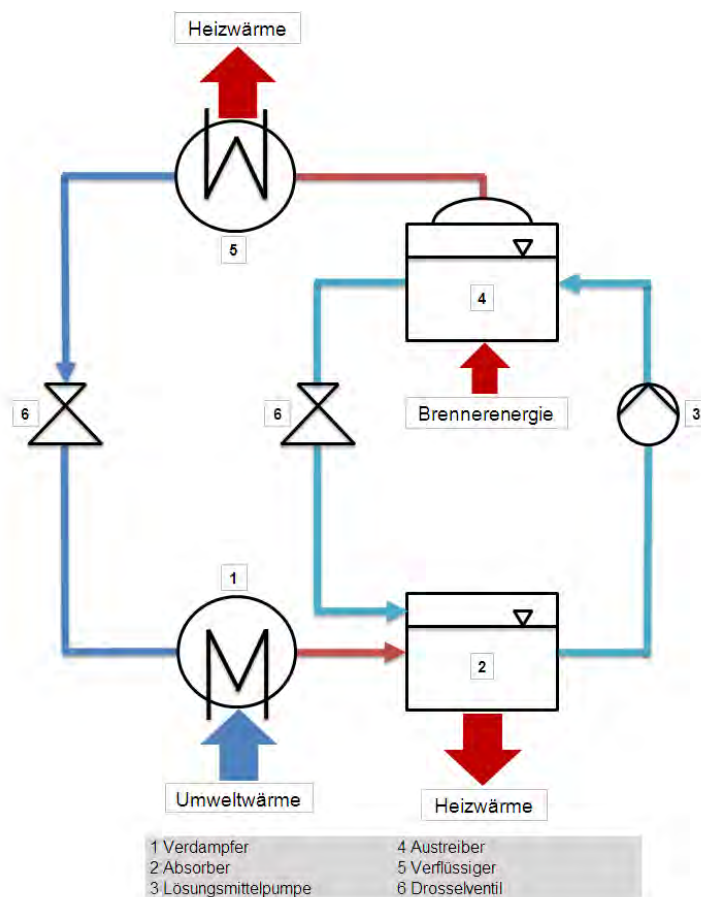


Abbildung 2-4: Schema einer Absorptionspumpe [IELe09]

2.3 Die Diffusionsabsorptionswärmepumpe

Wie auch andere Absorptionswärmepumpen (AWP) verfügt die Diffusionsabsorptionswärmepumpe (DAWP) (siehe Abbildung 2-5) über die Bauteile Absorber, Austreiber, Kondensator und Verdampfer. Anders als zur AWP sind keine Druckerhöhungsanlagen und Drosseleinrichtungen installiert, der Gesamtdruck im System ist überall nahezu gleich. Der Antrieb erfolgt mit einer so genannten Gasblasenpumpe, die zusammen mit dem Austreiber wirkt.

Eine AWP arbeitet mit drei Stoffen, Ammoniak als Kältemittel, Wasser als Lösungsmittel und Helium oder Wasserstoff als druckausgleichendes Hilfsgas. Der Gesamtdruck im System kann unterschiedlich ausgelegt sein, je nach Auslegung und Zweck der DAWP, bzw. den benötigten Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen. Für die weitere Erklärung wird beispielhaft ein Gesamtdruck von 18 bar angenommen. Im Austreiber (4) wird das Ammoniak unter hohen Temperaturen von 120–130°C aus der kältemittelreichen Lösung ausgetrieben. Die gleichzeitig wirkende Gasblasenpumpe fördert kältemittelarme

Lösung und Ammoniakgas durch das System. Der reine Ammoniakdampf steigt zum Kondensator auf und wird in diesem verflüssigt. Die Verdampfungs- bzw. Kondensationstemperatur liegt für Ammoniak bei 45°C (18 bar). Das flüssige Ammoniak strömt nun in den Verdampfer. Dort diffundiert es, bei einem Partialdruck von 4,6 bar mit entsprechender Verdampfungstemperatur von 2°C, in die Heliumatmosphäre ein. Die nötige „Entspannung“ wird hier mit einer Partialdruckverschiebung erreicht. Das Helium sorgt für den Druckausgleich. Die Zirkulation des Ammoniak/Helium-Gasgemisches entsteht dadurch, dass das spezifisch schwerere Ammoniakgas zusammen mit dem Helium in den tief liegenden Absorber absinkt. Die in dem Absorber einfließende kältemittelarme Lösung absorbiert die Ammoniakdämpfe. Freiwerdende Wärme durch den Absorptionsprozess wird über einen Kühlkreislauf abgeführt. Das nun wieder leichte ammoniakarme Hilfgas sammelt sich oberen Teil des Absorbers und strömt zurück zum Verdampfereingang und wird gleichzeitig durch das absinkende ammoniakreiche Gas gekühlt. Durch die Schwerkraft fließt die relativ kalte kältemittelreiche Lösung zum Austreiber. Die vom Austreiber zum Absorber strömende relativ warme kältemittelarme Lösung wärmt im Gegenstrom die kältemittelreiche Lösung vor.

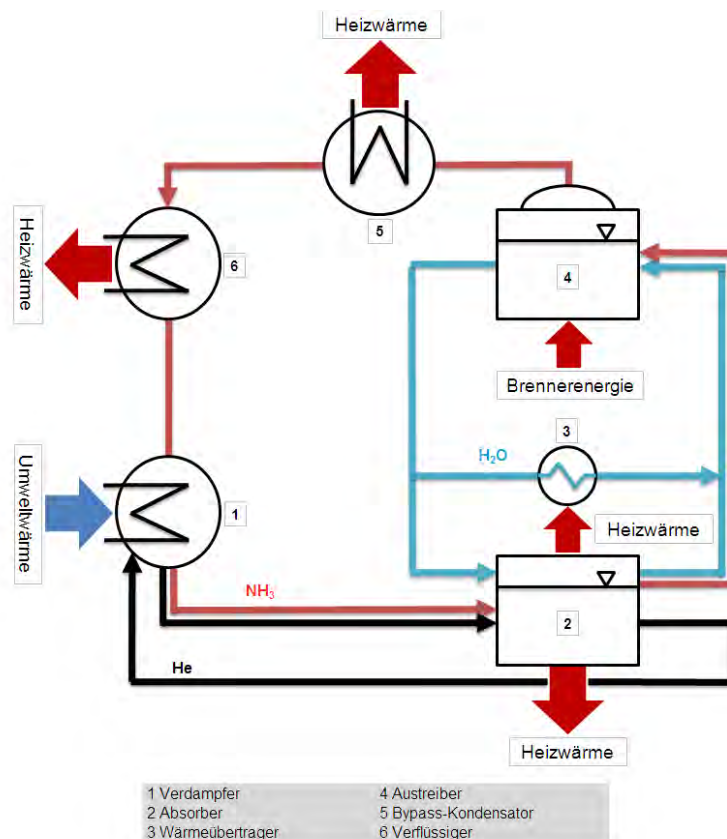


Abbildung 2-5: Schema einer Diffusionsabsorptionswärmepumpe [IELe09]

Die ersten Feldversuche mit Gaswärmepumpen (Diffusionsaggregate) wurden 1992 in der Schweiz durch die Firma DAWP Creatherm begonnen.

Die Firma Buderus hat im Jahre 2001 mit der Loganova GWP die erste serienreife DAWP hergestellt. Das Wärmepumpenaggregat erzielt eine Heizleistung von 3,6 kW. Zur Brauchwassererwärmung und Spitzenlastabdeckung ist ein Gas-Brennwertgerät installiert, so dass die Gesamtheizleistung 11–24 kW beträgt. Die Loganova GWP wurde allerdings nicht in das Verkaufsprogramm aufgenommen. Sie erreichte in Feldversuchen und im Labor hohe Nutzungsgrade von 140 %.

Die sich in der Entwicklung befindenden Geräte der zweiten Generation kommen ohne zusätzliches Gas-Brennwertgerät aus. Durch Verdreifachung der Leistung der Blasenpumpe und bautechnische Veränderungen ist ein modulierender Betrieb zwischen 4 und 10 kW möglich (SBZ 03/10 S.38).

2.4 Die Adsorptionswärmepumpe

Bei der Adsorptionswärmepumpe (siehe Abbildung 2-6) wird die Umweltwärme mit Hilfe eines Adsorptionsprozesses zum Heizen nutzbar gemacht. 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 erforderliche Heizwärme von einem Gasbrenner erzeugt. Durch Erhitzung des Behälters wird das Kältemittel wieder dampfförmig und der Kreislauf beginnt von neuem. Die üblichen Stoffe die eingesetzt werden sind Wasser als Kältemittel und Zeolith als Adsorbens. Damit Wasser bei Umgebungstemperaturen verdampft werden kann, wird der Prozess unter einem Unterdruck durchgeführt.

Eine weitere Eigenschaft, die die Adsorptionspumpe von den anderen Technologien unterscheidet, ist, dass der Prozess kein Kreisprozess ist, sondern ein periodischer Prozess.

Mit einer Adsorptionswärmepumpe wird eine Heizzahl von $> 1,3$ erreicht. Durch stetige Weiterentwicklung der Technologie wird eine weitere Effizienzsteigerung erwartet – dies gilt generell für die anderen Technologien analog.

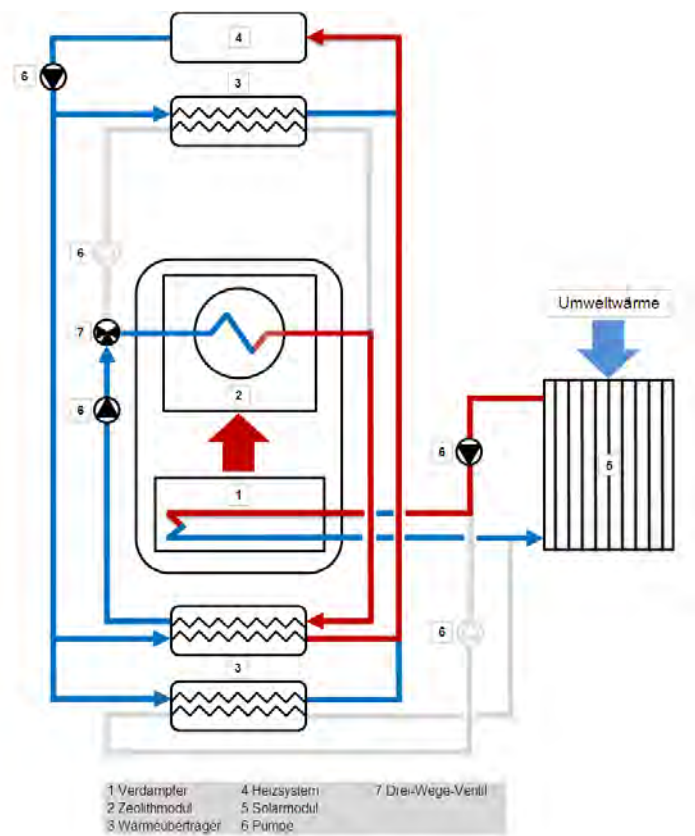


Abbildung 2-6: Schema einer Zeolith-Adsorptions-Wärmepumpe [IELe09]

3 Systemparameter

3.1 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 Umweltwärmetemperatur 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 Quellentemperatur 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 eine 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 eingekoppelt werden kann. Die meisten Systeme nutzen ein Kältemittel mit einem niedrigen Siedepunkt, wie z. B. Ammoniak.

Es sind am Markt auch Systeme erhältlich, die 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.

3.2 Heizkreis

Entscheidend für die Effizienz des Gesamtsystems ist auch die Vor- und Rücklauftemperatur des Heizkreises. Ideal für eine Wärmepumpe ist eine Fußbodenheizung oder ein Heizsystem mit vergleichbar niedrigen Temperaturen. Je niedriger die geforderten Temperaturen sind, umso weniger 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 externer 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 Häuser mit einem geringen Heizwärmebedarf und großen Heizflächen, so dass die Temperaturspreizung im Wärmepumpenprozess möglichst niedrig ist.

Wird auch die Warmwasserbereitung mit einbezogen, so 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 zur Nachheizung verwendet wird, kann bei einer Gaswärmepumpe – wenn sie die höheren Temperaturen nicht im Wärmepumpenprozess erreicht – herstellerabhängig auf ein internes Gasgerät zurückgegriffen werden, welches primärenergietisch effizienter arbeitet. Je nach Anteil der Warmwassersbereitung am gesamten Wärmebedarf des Hauses, wirkt sich der Betrieb bei hohen Systemtemperaturen der in der Berechnung des Nutzungsgrades mehr oder weniger deutlich aus. Dabei wirkt sich sowohl die verbrauchte Warmwassermenge als auch die bereitgestellte Temperatur aus. Die Wassertemperatur aber liegt in fast jedem Haushalt bei mindestens 55°C und somit übt die bereitgestellte Warmwassermenge einen größeren Einfluss auf die Gesamteffizienz aus. Eine zusätzliche Installation eines Solarkollektors, der

die Warmwasserbereitung unterstützt, wirkt sich positiv auf den Systemjahresnutzungsgrad aus.

3.3 Nutzerverhalten

Darüber hinaus ist das Nutzerverhalten für die Bestimmung des Jahresnutzungsgrades bzw. der Jahresheizzahl wesentlich. Je nach Wärmebedarf und Warmwasserverbrauch können die Werte unterschiedlich sein. Dabei gilt, dass eine richtig dimensionierte Anlage die Effizienz im Betrieb steigen lässt. Eine Fußbodenheizung reagiert thermisch „träger“ als Radiatoren, da ein größeres Volumen im Umlauf ist als in Radiatoren. Der Nutzer sollte dies beachten und vorausschauend heizen, um die Anlagenregelung zu unterstützen. Weiterhin ist für den Nutzungsgrad der Warmwasserverbrauch entscheidend. Für Gaswärmepumpen, die zusätzlich auf ein integriertes Brennwertgerät zurückgreifen gilt: Bei Temperaturen $> 55^{\circ}\text{C}$ 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 kann der Anteil des Wärmepumpenbetriebes am Gesamtenergiebedarf ausfallen. Der übrige Anteil muss durch ein Gasbrennwertgerät mit schlechterem Jahresnutzungsgrad bereitgestellt werden. Dadurch verschlechtert sich der Jahresnutzungsgrad.

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 mit einer Raumtemperatur von $\sim 19^{\circ}\text{C}$ zufrieden sind, benötigen andere Nutzer Raumtemperaturen von $\sim 22^{\circ}\text{C}$, 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]. Ein Vergleich von unterschiedlichen Nutzern und die Auswirkung auf den spezifischen Heizwärmebedarf ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

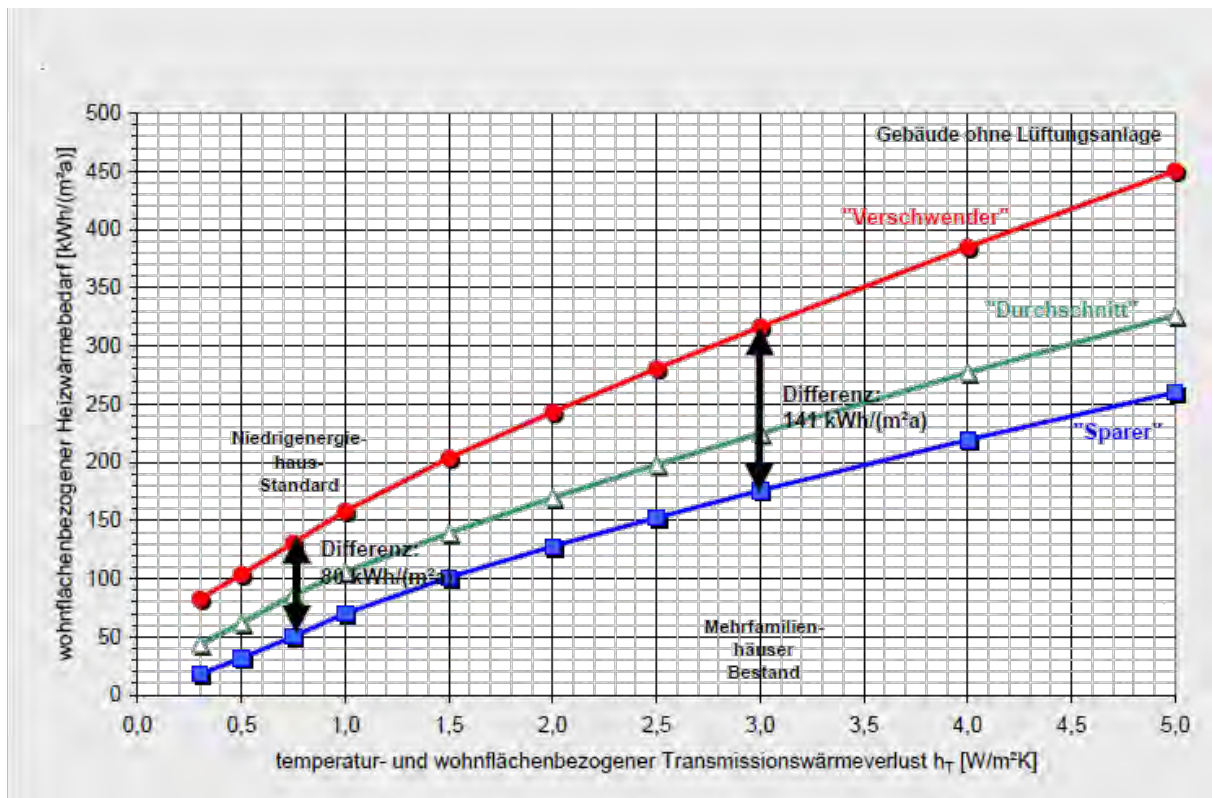


Abbildung 3-1: Vergleich unterschiedlicher Nutzertypen in Gebäuden ohne Lüftungsanlage [IWU03]

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.

3.4 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 für das Wärmeträgermedium als auch Pumpen oder Gebläse in den Kollektoren für die Zirkulation des Wärmeträgermediums. Durch neue Hocheffizienzpumpen kann der Beitrag zum Gesamtenergieverbrauch 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.

3.5 Speicher

Für die Betrachtung des Gesamtsystems und der daraus folgenden Effizienzabschätzung ist auch eine Betrachtung des eingesetzten Speichers notwendig. Um einen gewissen 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 allerdings profitieren je nach Auslegung von einem Teillastbetrieb, weil sie teilweise in niedrigen Laststufen mit einem höheren Wirkungsgrad arbeiten.

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.

3.6 Regeneration des Bodens

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 zugeführt werden. Dies geschieht durch nachströmende Wärme aus dem umliegenden 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.

4 Versuchs- und Demoanlagen

4.1 Diffusionsabsorptionswärmepumpe (Bosch-Nefit)

Die Gaswärmepumpe von Bosch-Nefit (Abbildung 4-3) wurde nach der VDI-Richtlinie 4650-2 [VDI10] auf dem Versuchsstand vermessen. 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 4-1 und Abbildung 4-2 verdeutlichen den schematischen Aufbau sowie eine Ansicht der hydraulischen Verschaltung des eingesetzten Versuchsstandes.

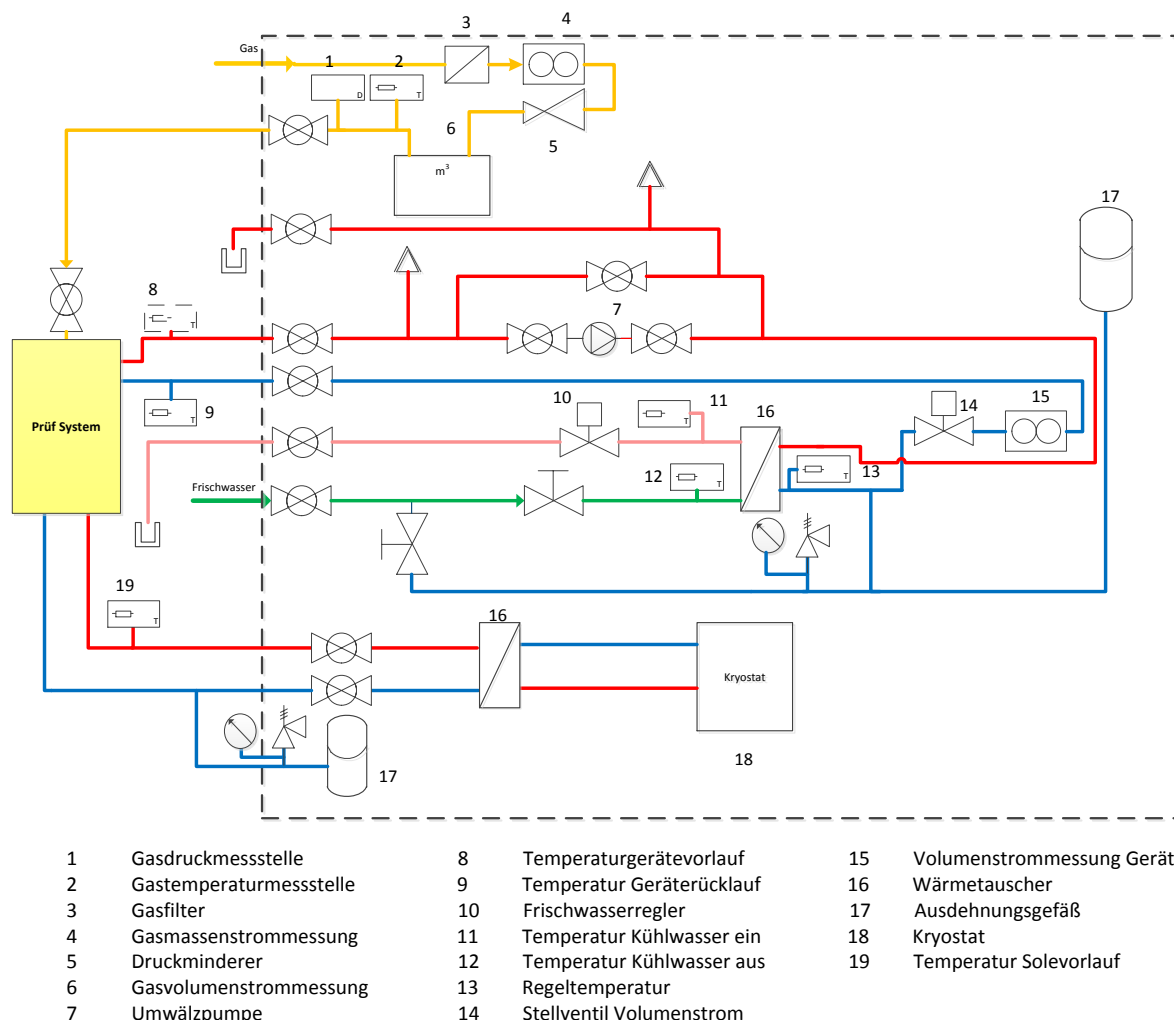


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des am GWI eingesetzten Versuchsstandes

Der Versuchsstand ist größtenteils mit Kupferrohren DN² 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 Stahldraht-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 Volumenstromspektrum. Die 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 4-2: GWI-Prüfstand (Hydraulik)

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,

² Nennweite

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 Balgengaszählers (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 %**



Abbildung 4-3:
Diffusionsabsorptions-
wärmepumpe von Bosch Nefit

Das Heizgerät kann nicht auf eine bestimmte Leistung geregelt werden, sondern es konnte nur die gewünschte Gasleistung eingestellt werden. Als niedrigste Einstellung waren 20 % verfügbar, in den Versuchen kam dabei eine Gasleistung von ~2,4 kW an. Durch die hohe Effizienz lag die thermische Leistung bei 3,5 – 3,6 kW und es war weder möglich den 13 % noch den 30 % Betriebspunkt relativer Leistung im normalen Betrieb zu messen. Diese Punkte wurden im taktenden Betrieb gemessen. Dabei wurde die Anlage in Betrieb genommen und nach der Aufheizphase wieder ausgestellt. Sobald sich Vorlauf- und Rücklauftemperatur einander angenähert hatten, wurde die Wärmepumpe bei den geforderten Temperaturen in Betrieb genommen und die Messaufzeichnung gestartet. Nach Erreichen von 1,3 kWh_{th} bzw. 3,0 kWh_{th} wurde sie ausgestellt und die Aufzeichnung des Wärmestroms bis zur vollen Stunde weitergeführt. Um das Potential der Technologie zu veranschaulichen wurden weiterhin Messungen ohne Taktung durchgeführt. Dabei wurden die in der VDI 4650-2 geforderten Temperaturen mit der kleinstmöglichen Gasbelastung gefahren.

Die Wärmepumpe wurde für die Heizkreistemperaturpaarungen von 35/28, 55/45 und 70/55 °C vermessen. Die Messpunkte nach VDI 4650-2 [VDI10] (Stand Entwurf 2010) sind im Folgenden in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Heiznetztemperaturen in Abhängigkeit der Leistung nach VDI 4650-2

Relative Leistung P/P_N	Heiznetz 35/28		Heiznetz 55/45		Heiznetz 70/55	
	t_{VL} in °C	t_{RL} in °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	29,7	27,8
0,3	24,9	22,8	32,6	29,6	39,2	34,7
0,39	26,2	23,5	35,6	31,7	43,4	37,6
0,48	27,5	24,2	38,5	33,8	47,6	40,4
0,63	29,7	25,3	43,4	37,2	54,3	44,9

Die Temperaturen für die Umweltwärmequelle sind ebenfalls in der VDI-Richtlinie 4650-2 [VDI10] angegeben. Die Temperatur sinkt dabei mit steigender Leistung, die genauen Werte sind in der nachfolgenden Tabelle 4-2 aufgeführt.

Tabelle 4-2: Umweltwärmequellentemperatur in Abhängigkeit der Leistung nach VDI 4650-2

Relative Leistung P/P_N	Umweltwärmequellentemperatur in °C
0,13	9
0,3	8
0,39	7
0,48	6
0,63	5

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 Lastpunkten:

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

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 mit 5 Lastpunkten:

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

mit

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

Dabei sind

$\eta_{h,i}$ Nutzungsgrad

P_i Wärmeleistung

Q_i Brennstoffleistung

Die Gesamtkennzahlen nach VDI 4650-2 [VDI10] (in Klammern ohne taktenden Betrieb (oT)) lauten wie folgt (Tabelle 4-3):

Tabelle 4-3: Kennzahlen für die Heizkreise 35/28, 55/45 und 70/55°C in %

	35/28	55/45	70/55
Nutzungsgrad	133 (137)	128 (131)	119 (123)
Heizzahl	126 (131)	122 (125)	113 (117)

In Abbildung 4-4 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt.

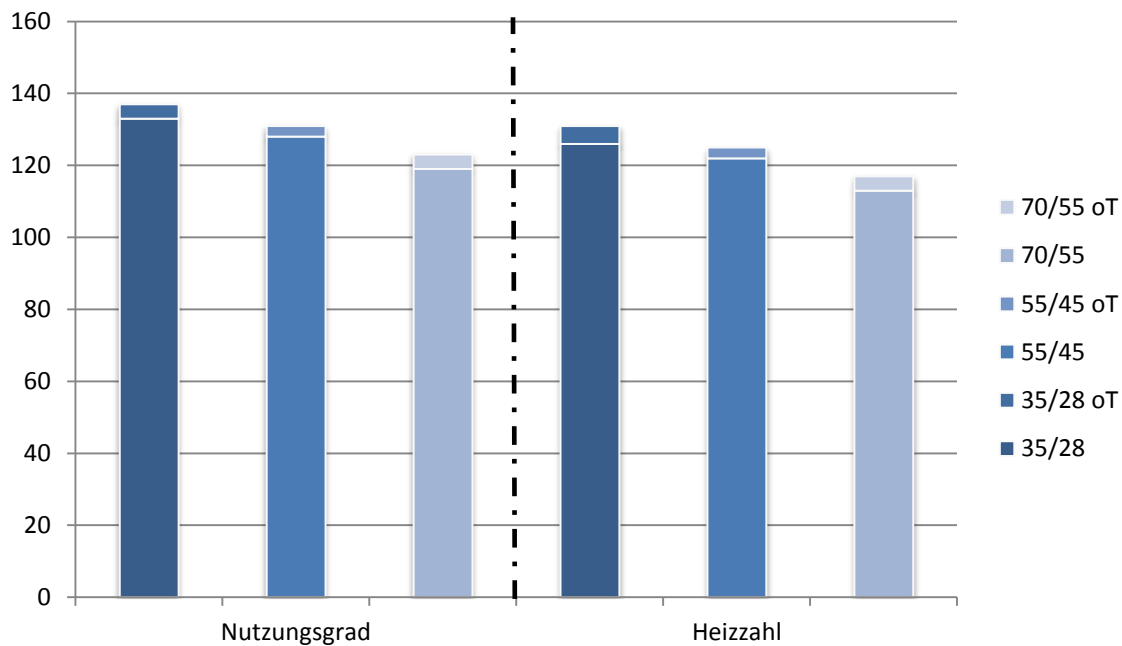


Abbildung 4-4: Kennzahlen für die Heizkreise 35/28, 55/45 und 70/55 in %

4.1.1 Systemwirkungsgrad

Die Warmwasserbereitung durch die Wärmepumpe wird unabhängig von der Speicherladung mit einer Gasleistung von 60 % durchgeführt. Als Umweltwärmequellentemperatur wurde analog zu dem in der Norm geforderten 100 %-Betrieb eine Temperatur von 4°C gewählt. Die Gaswärmepumpe erreichte dabei einen Nutzungsgrad von 103 %.

In der Richtlinie VDI 4650-2 [VDI10] ist für die Berechnung des Systemnutzungsgrades folgende Formel angegeben:

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

Dabei ist

y der Anteil des Warmwasserbedarfs am gesamten Wärmebedarf,

$\eta_{N,h}$ der Jahresnutzungsgrad im Heizbetrieb,

$\eta_{N,w}$ der Jahresnutzungsgrad zur Warmwasserbereitung.

Damit ergibt sich für den Heizkreis 35/28 °C ein Systemnutzungsgrad von 129 %, im Heizkreis 55/45 erreicht das System einen Systemnutzungsgrad von 124 % und bei den Heizkreistemperaturen 70/55 läuft das System mit einem Gesamtnutzungsgrad von 116 % (siehe Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Gesamtwirkungsgrade (in Klammern ohne Taktung) der Bosch-Nefit-Gaswärmepumpe nach VDI 4650-2

	35/28	55/45	70/55
Gesamtjahresnutzungsgrad	129 (132)	124 (126)	116 (117)
Gesamtjahresheizzahl	124 (128)	119 (122)	111 (113)

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-5 grafisch dargestellt

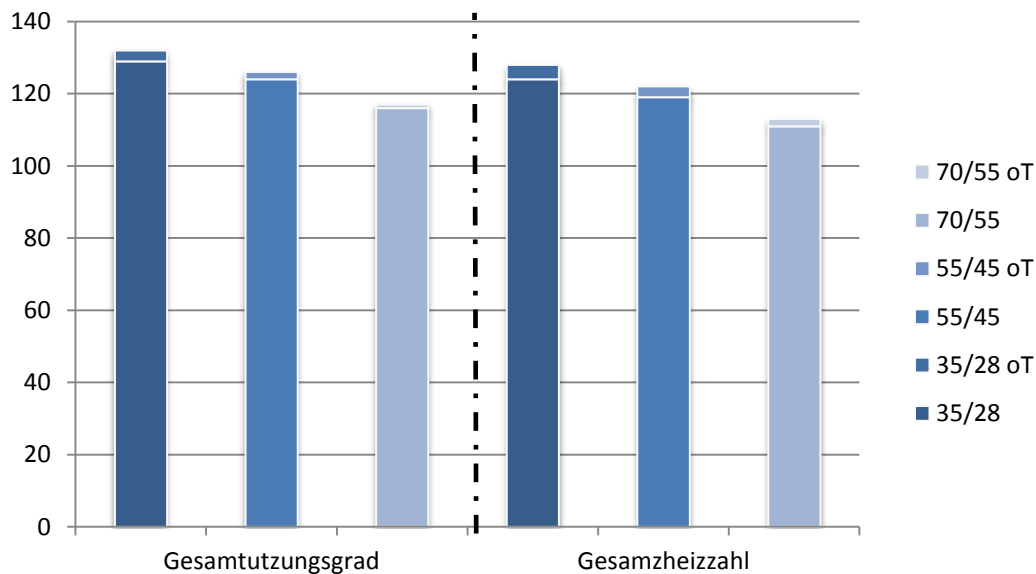


Abbildung 4-5: Gesamtwirkungsgrade der Bosch-Nefit-Gaswärmepumpe nach VDI 4650-2

4.1.2 Solare Warmwasserbereitung

Die Heizungsanlage mit der Gaswärmepumpe kann mit einem Solarkollektor für die Warmwasserbereitung ausgestattet werden. In der VDI 4650-2 [VDI10] ist ein Berechnungsverfahren angegeben, mit dem die Effizienz bestimmt werden kann. Der Nutzungsgrad der solarunterstützten Warmwasserbereitung berechnet sich wie folgt:

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

Dabei ist

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

$\eta_{N,w}$ Jahresnutzungsgrad Warmwasserbereitung

ϕ solarer Deckungsgrad für Warmwasserbereitung

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 257,5 %.

4.1.3 Gesamtjahresnutzungsgrad

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

Dabei ist

η_{WP} Gesamtjahresnutzungsgrad der Gaswärmepumpe

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

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

Die Ergebnisse decken sich mit den Erwartungen des Herstellers. Im Heizkreis 35/28 erreicht das Komplettsystem mit Taktung einen Gesamtjahresnutzungsgrad von 129 % und im Heizkreis 55/45 wird mit Taktung ein Gesamtjahresnutzungsgrad von 124 % erreicht. Im Heizkreis 70/55 wurde mit Taktung ein Gesamtjahresnutzungsgrad von 116 % ermittelt.

Die Ermittlung der Gesamtjahresheizzahl erfolgt analog zur Ermittlung des Gesamtjahresnutzungsgrades, anstelle der Teilnutzungsgrade werden die Teilheizzahlen benutzt. Die Werte sind in Tabelle 4-5 aufgeführt.

Tabelle 4-5: Gesamtwirkungsgrade (in Klammern ohne Taktung) der Bosch-Nefit-Gaswärmepumpe nach VDI 4650-2

	35/28	55/45	70/55
Gesamtjahresnutzungsgrad	129 (132)	124 (126)	116 (117)
Gesamtjahresheizzahl	124 (128)	119 (122)	111 (113)

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-6 grafisch dargestellt.

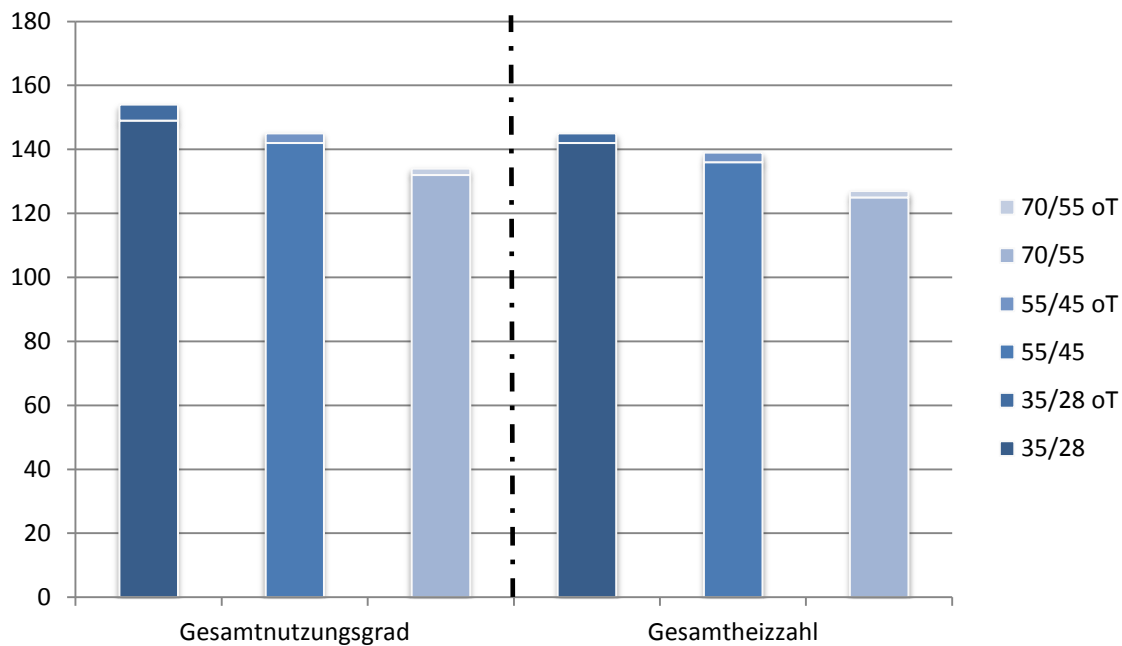


Abbildung 4-6: Gesamtwirkungsgrade der Bosch-Nefit-Gaswärmepumpe mit solarer Warmwasserbereitung nach VDI 4650-2

4.1.4 Vergleich Labor und Feldtestdaten

In Abbildung 4-7 ist der Vergleich von Labordaten mit im Feldtest gewonnenen Daten dargestellt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es sich bei den eingebauten Anlagen um Prototypen handelt, sind die Abweichung mit zwanzig bzw. zwölf Prozentpunkten als gering einzustufen.

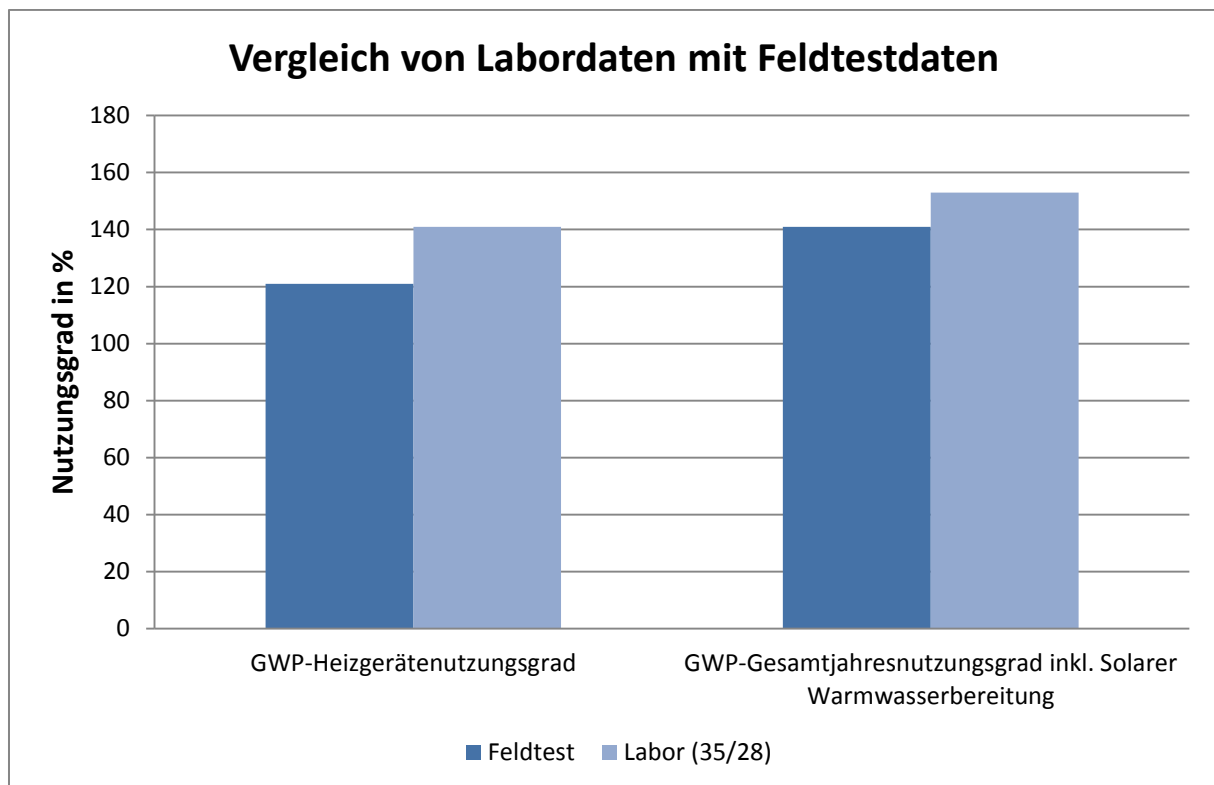


Abbildung 4-7: Vergleich von Labordaten und Feldtestdaten

4.1.5 Zwischenfazit

Die Diffusionsabsorptionsgaswärmepumpe (DAWP) zeichnet sich auch in Heizkreisen mit höheren Temperaturen durch eine gute Effizienz aus. Der Einsatz in einem System mit niedrigeren Temperaturen ist zu bevorzugen, allerdings kann die (DAWP) in allen drei Systemen installiert werden. Dieses System ist allerdings nicht am Markt verfügbar und bei dem hier vermessenen Gerät handelte es sich um einen Prototypen, so dass bei einer Weiterentwicklung mit einer höheren Effizienz zu rechnen ist.

4.2 Zeolith-Adsorptionswärmepumpe (Viessmann)

Im Rahmen der DVGW-Innovationsoffensive Gastechnologie wurden durch das DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg im Projekt Prüfstandsmessungen an 2 Feldtestgenerationen einer Gasadsorptionswärmepumpe durchgeführt. Dabei handelt es sich um das Zeolith-Hybrid-Heizgerät VITOSORP 200-F des Herstellers Viessmann Werke Allendorf GmbH. Durch dieses Projekt soll die Entwicklung von Gaswärmepumpen unterstützt werden, um eine möglichst schnelle Marktreife der Geräte zu erreichen.

In der VDI-Richtlinie 4650-2 (Entwurf) ist ein Kurzverfahren zur Berechnung der energetischen Effektivität von Sorptionswärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung dargestellt. Da die energetische Effektivität dieser Wärmepumpen von vielen Randbedingungen abhängt, werden in dieser Norm neben der Wärmequellentemperatur, der Heizkreistemperaturen und deren Verläufen über die Nutzungsperiode, auch die Energieverbräuche für die Hilfsantriebe der Wärmequellenanlagen und die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf in der Heizungsanlage berücksichtigt [VDI4650-2].

4.2.1 Funktionsprinzip des Zeolith-Hybrid-Heizgerätes

Bei dem Zeolith-Hybrid-Heizgerät VITOSORP 200-F handelt es sich um eine Adsorptionswärmepumpe, die die erforderliche Antriebsenergie aus der Verbrennung von Erdgas bezieht. Der thermisch angetriebene Kreisprozess arbeitet mit einem Zeolith/Wasser-Zweistoffsystem.

Der Keramikwerkstoff Zeolith (griech. Siedestein) wird eingesetzt, da er bei Erwärmung zu kochen beginnt und Wasser abgibt. Außerdem besitzt er sehr gute Adsorptionseigenschaften, die auf der großen inneren Oberfläche und auf den elektrostatischen Adsorptionskräften beruhen. Durch diese Adsorptionskräfte besitzt der Zeolith die Eigenschaft, Wassermoleküle anzuziehen und zu adsorbieren. Das Adsorbieren von dampfförmigen Wassermolekülen ermöglicht die Aufnahme von Umweltwärme beim Verdampfen des Wassers (Niederdruckseite des Wärmepumpenprozesses bei gleichzeitiger Wärmeabgabe (Adsorptionswärme)). Durch Wärmezufuhr mittels Gasverbrennung kann das gebundene Wasser wieder aus dem Zeolith „ausgetrieben“ werden (Hochdruckseite des Wärmepumpenprozesses). Der Prozess läuft in zyklischer Betriebsweise, in zwei Phasen ab.

Das Zeolith-Hybrid-Heizgerät ist im Wesentlichen aus einem Wärmepumpenmodul (bestehend aus Zeolith-Sorber, Kondensator und Verdampfer), einem Gas-

Brennwertgerät und aus einer Anzahl von Wärmeübertragern und Ventilen aufgebaut (s. Abbildung 4-8). Da als Kältemittel Wasser verwendet wird, müssen die Modulkomponenten im Vakuum betrieben werden.

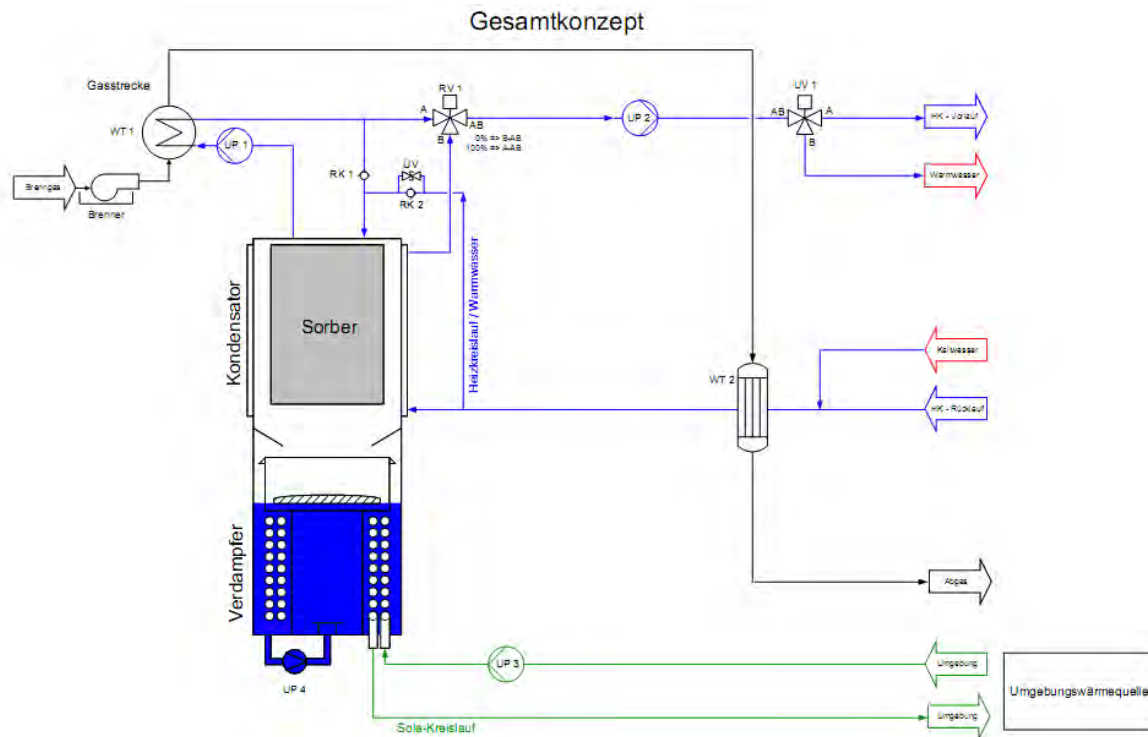


Abbildung 4-8: Gesamtkonzept des Zeolith-Hybrid-Heizgerätes [Quelle: Viessmann]

Das Zeolith-Hybrid-Heizgerät arbeitet prinzipiell in 2 Betriebsphasen, einer Adsorptionsphase und einer Desorptionsphase. In der Adsorptionsphase wird im Verdampfer durch Aufnahme von Umweltwärme Kältemittel verdampft. Dieser Kältemitteldampf wird anschließend vom Zeolith adsorbiert und die dabei frei werdende Adsorptionswärme an das Heizungssystem abgegeben. Durch Wärmezufuhr mittels Gas-Brennwertgerät wird in der Desorptionsphase das im Zeolith gebundene Wasser „ausgetrieben“. Der Dampf kondensiert im Kondensator und gibt die Kondensationswärme an den Heizkreis ab.

Für den Fall, dass durch die vom Heiznetz angeforderte Leistung nicht durch den Wärmepumpenprozess bereitgestellt werden kann, ist die Möglichkeit vorgesehen, im Anschluss an die Adsorptionsphase den Brenner einzuschalten, um so die Vorlauftemperatur zu halten und gleichzeitig noch vom Wärmepumpeneffekt zu profitieren zu können. Diese Betriebsart wird als Mischbetrieb bezeichnet. Bei noch höherem Leistungsbedarf, wie beispielsweise bei der Brauchwassererwärmung kann das Zeolith-Hybrid-Heizgerät auch wie ein Brennwertgerät betrieben werden [Viess1].

4.2.2 Auswertung Anlagenbetrieb

Im Rahmen des DVGW-Projektes „Anwendungspotenziale der Gaswärmepumpe, Optimierung der Umweltwärmeeinkopplung mit Sonde/Erdkollektor/Außenluft-WT im System Gebäude/Anlagentechnik/Nutzer“ wurden am DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg zunächst Prüfstandsmessungen an der 2. Feldtestgeneration des Zeolith-Hybrid-Heizgerätes durchgeführt. Die Messungen erfolgten in allen Teillastpunkten der Heiznetze 35/28 °C und 55/45 °C unter den Prüfbedingungen der Wärmequelle Erdreich im Zeitraum Juni bis September 2011. Mit der Einführung der 3. Generation des Zeolith-Hybrid-Heizgerätes wurde das Gerät ausgetauscht. Die Messungen an der 3. Gerätegeneration erfolgten ebenfalls in allen Teillastpunkten der Heiznetze 35/28 °C und 55/45 °C unter den Prüfbedingungen Erdreich, Luft und Solarstrahlung als Wärmequellen.

Beim Zeolith-Hybrid-Heizgerät erfolgt die Einstellung einer bestimmten Wärmeleistung nicht direkt, sondern durch die Vorgabe von Betriebsparametern. Das betrifft seitens des Heizgerätes die Heizkreisvorlauftemperatur, die über die Außentemperatur und die Einstellung der Heizkennlinie vorgegeben werden kann und seitens des Prüfstandes die Vorgabe der Rücklauftemperatur und des Volumenstromes des Heizkreises. Die Einstellung der Solerücklauftemperatur erfolgt ebenfalls durch den Prüfstand.

Die Messdurchführung ist aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen in der VDI-4650-2 und der zyklischen Betriebsweise des Gerätes etwas aufwändiger als bei herkömmlichen Heiz- bzw. Brennwertgeräten. Es waren pro Prüfpunkt häufig zwei Prüfstandsmessungen erforderlich, um die geforderten Prüfbedingungen einhalten zu können. Der erste Durchlauf war jeweils notwendig um das Verhalten des Gerätes zur Einstellung der korrekten Parameter zu ermitteln.

Während der Labormessungen der 2. und 3. Gerätegeneration erwies sich das Zeolith-Hybrid-Heizgerät als betriebssicher und benutzerfreundlich. Nach der Fertigstellung des Messprogramms erfolgte die Installation des Zeolith-Hybrid-Heizgerätes im DVGW-Demonstrationszentrum „Gastechnologien“ am DBI in Freiberg und steht als Demonstrationsobjekt zur Verfügung (s. Abbildung 4-9).



Abbildung 4-9: Standort der VITOSORP 200-F im Demonstrationszentrum

4.2.3 Zusammenstellung der Messergebnisse

Zur Ermittlung der Kennzahlen in der Betriebsart Raumheizung wurde das Zeolith-Hybrid-Heizgerät in allen Teillastpunkten der Heiznetze 35/28 °C und 55/45 °C gemäß der VDI 4650-2 vermessen. Da das Zeolith-Hybrid-Heizgerät eine thermische Nennleistung im Heizbetrieb von 10 kW besitzt, ergeben sich Wärmeleistungen in den Teillastpunkten von 1,3 kW (unterer Teillastpunkt < 2,0 kW), 3,0 kW, 3,9 kW, 4,8 kW und 6,3 kW. Diese Wärmeleistungen sollen gemäß der VDI 4650-2 durch eine entsprechende Vorgabe von Betriebsparametern im Mittel über eine hinreichende Anzahl von Betriebszyklen erreicht werden. Im Heiznetz 35/28 °C war dazu ein Volumenstrom im Heizkreis von 1230 l/h und im Heiznetz 55/45 °C ein Volumenstrom von 860 l/h einzustellen.

Für die Ermittlung der Kennzahlen in der Betriebsart Warmwasserbereitung wurde zusätzlich ein weiterer Messpunkt vermessen, der auf den Parametern des Heiznetzes 55/45 basiert. Dabei handelte es sich um die Betriebsweise „Booster“, bei der das Gerät mit einer thermischen Leistung von 14,5 kW, einer Vorlauftemperatur von 65 °C und einer Rücklauftemperatur von 50 °C betrieben wurde.

4.2.4 Ermittelte Kennzahlen der Wärmequelle Erdreich

Aus den ermittelten Kennzahlen der Teillastpunkte der Heiznetze 35/28 °C und 55/45 °C für die Wärmequelle Erdreich wurden die Jahreskennzahlen für Raumheizung entsprechend der VDI 4650-2 berechnet und in der Tabelle 4-6 zusammengestellt. Die Abbildung 4-10 zeigt die Jahreskennzahlen der VITOSORP 200-F für Raumheizung in grafischer Darstellung.

Tabelle 4-6: Ermittelte Jahreskennzahlen für Raumheizung

	Jahresheizzahl	Jahresnutzungsgrad
Heiznetz 35/28	1,27	1,33
Heiznetz 55/45	1,20	1,25

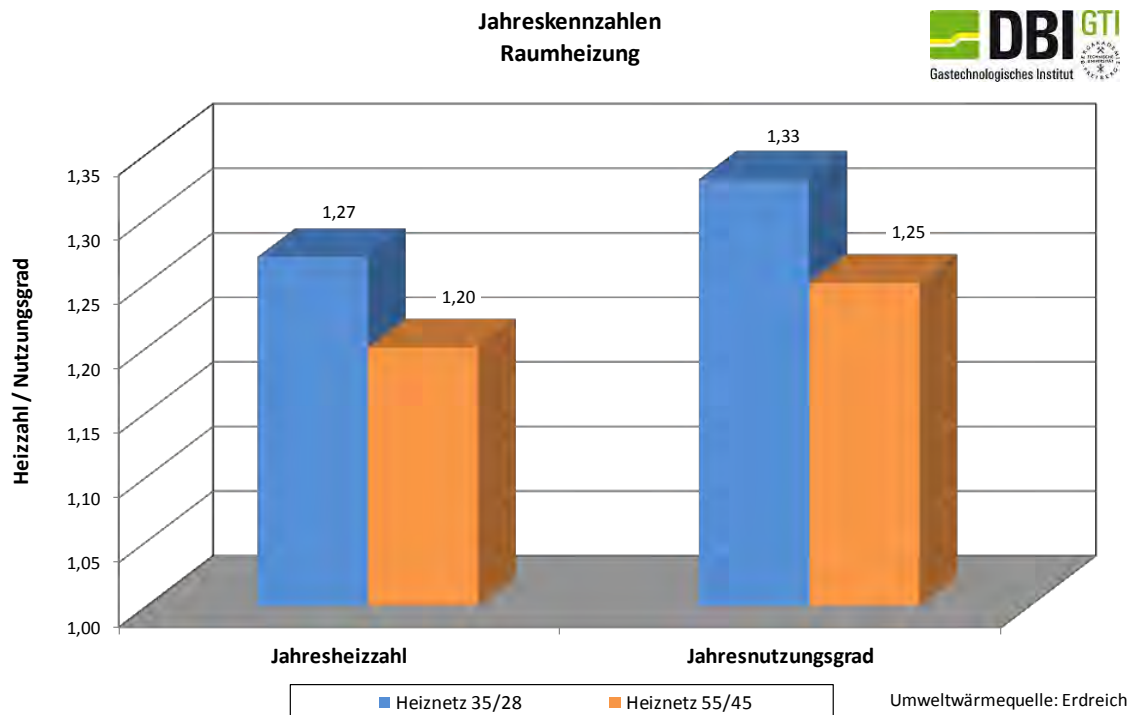


Abbildung 4-10: Ermittelte Jahreskennzahlen (Wärmequelle Erdreich)

Die gemäß der VDI 4650-2 für das Zeolith-Hybrid-Heizgerät berechneten Gesamt-Jahresheizzahlen und Gesamtjahresnutzungsgrade für die Umweltwärmequelle Erdreich sind in der Tabelle 4-7 zusammengestellt. Eine grafische Darstellung dieser Gesamtjahreskennzahlen zeigt die Abbildung 4-11.

Tabelle 4-7: Gesamt-Jahreskennzahlen der VITOSORP 200 (Erdsonde)

	Gesamt-Jahresheizzahl	Gesamt-Jahresnutzungsgrad
Heiznetz 35/28	1,23	1,28
Heiznetz 55/45	1,17	1,21

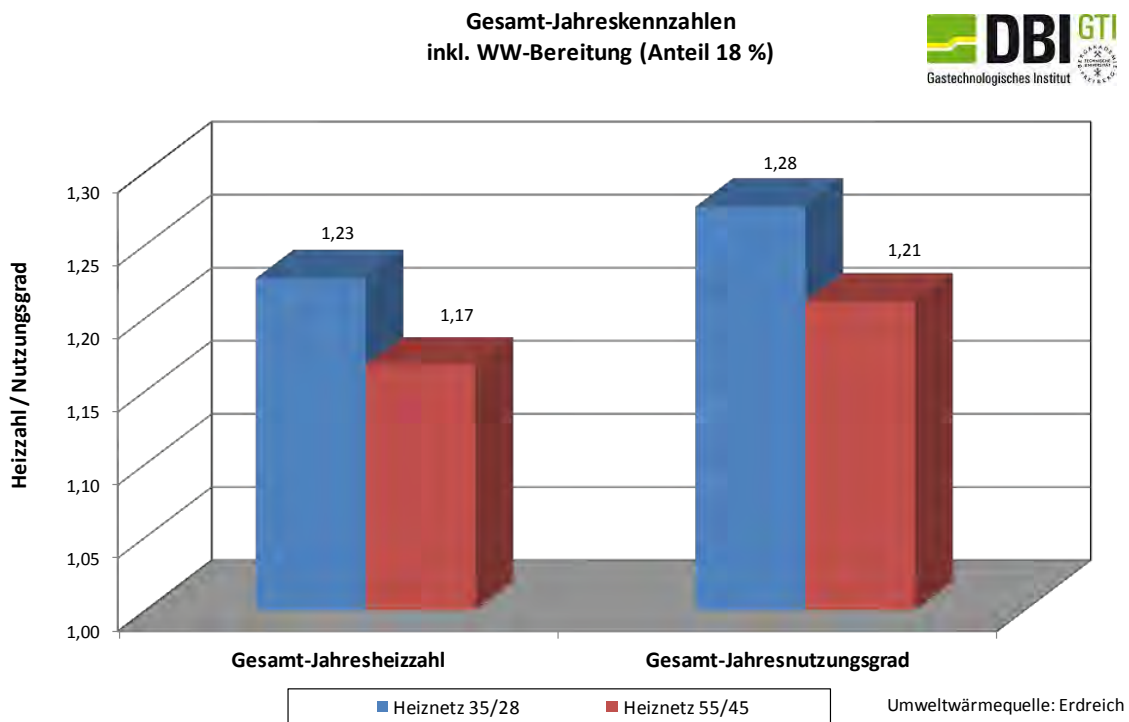


Abbildung 4-11: Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen (Wärmequelle Erdreich)

Für die Berechnungen der Jahresheizzahlen und der Jahresnutzungsgrade für die solarunterstützte Warmwasserbereitung ist entsprechend der VDI 4650-2 ein solarer Deckungsgrad von 60 Prozent zu verwenden. Die für das Zeolith-Hybrid-Heizgerät ermittelten Gesamt-Jahreskennzahlen für solarunterstützte Warmwasserbereitung sind für beide Heiznetze in der Tabelle 4-8 und grafisch in der Abbildung 4-12 dargestellt.

Tabelle 4-8: Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen mit solarunterstützter Warmwasserbereitung

	Gesamt-Jahresheizzahl	Gesamt-Jahresnutzungsgrad
Heiznetz 35/28	1,40	1,46
Heiznetz 55/45	1,33	1,38

Messung und Berechnung nach VDI 4650-2
Annahmen:
Anteil WW: 18 %
solarer Deckungsgrad WW-Bereitung: 60 %

**Gesamt-Jahreskennzahlen
bei solarunterstützter
Warmwassererzeugung**

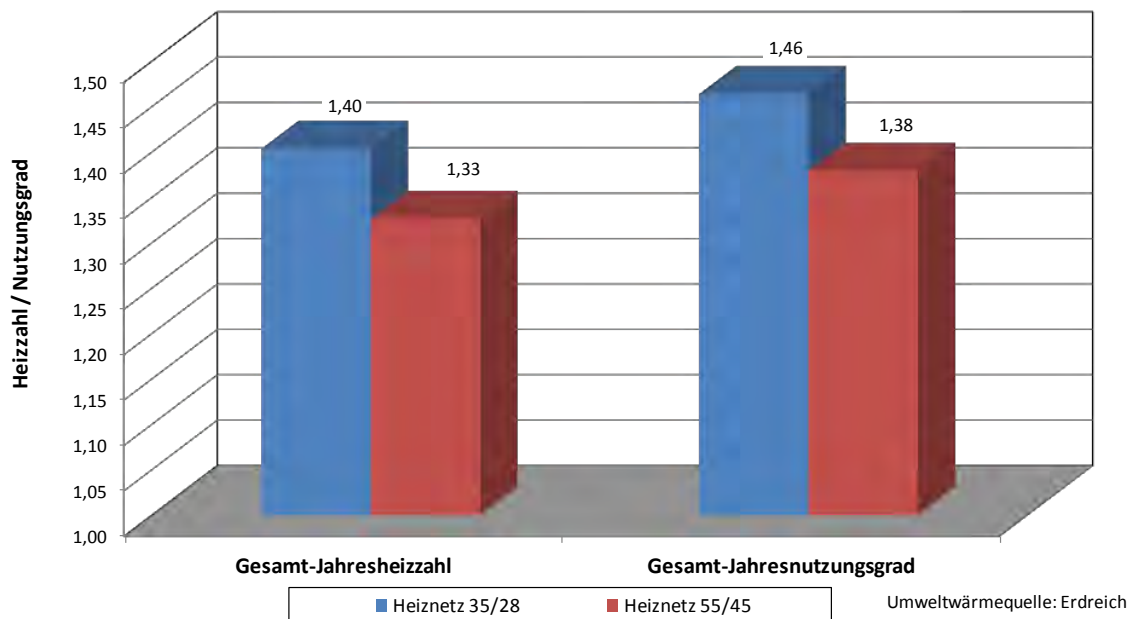


Abbildung 4-12: Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen (Wärmequelle Erdreich)

Erfolgt neben der solarunterstützten Warmwassererzeugung zusätzlich die Raumheizung solarunterstützt (5 Prozent Deckungsanteil gemäß VDI 4650-2), so werden von der Anlage die in der Tabelle 4-9 und der Abbildung 4-13 dargestellten Gesamt-Jahresheizzahlen und Gesamt-Jahresnutzungsgrade erreicht.

Tabelle 4-9: Gesamtjahreskennzahlen bei solarunterstützter Raumheizung und WW-Bereitung

	Gesamt-Jahresheizzahl	Gesamt-Jahresnutzungsgrad
Heiznetz 35/28	1,47	1,53
Heiznetz 55/45	1,39	1,45

Messung und Berechnung nach VDI 4650-2
Annahmen:
Anteil WW: 18 %
solarer Deckungsgrad für Heizungsunterstützung: 5 %
solarer Deckungsgrad WW-Bereitung: 60 %

**Gesamt-Jahreskennzahlen
bei solarunterstützter Raumheizung
und Warmwassererzeugung**

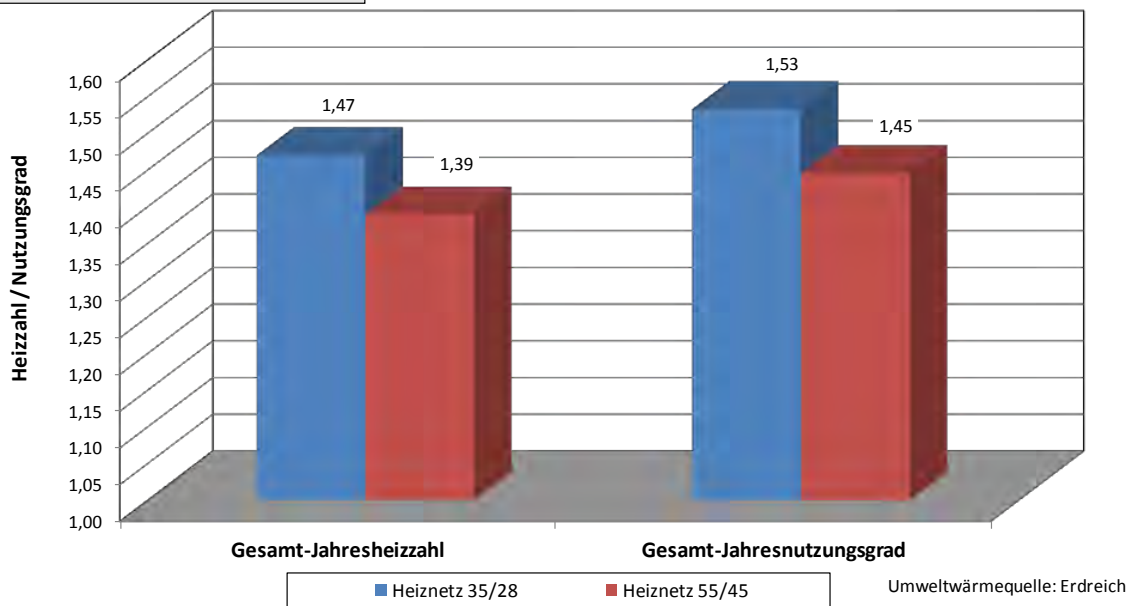


Abbildung 4-13: Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen (Wärmequelle Erdreich)

4.2.5 Ermittelte Kennzahlen der Wärmequelle Solar

Im Rahmen des VITOSORP-Messprogramms erfolgten außerdem Messungen der Umweltwärmequelle Solarstrahlung gemäß den Vorgaben der VDI 4650-2. Es wurde eine Normaußenlufttemperatur von -12 °C, eine Aperturfläche von 6,9 m² und damit eine Temperaturerhöhung von 5,2 °C gegenüber der Außenlufttemperatur verwendet [VDI 4650-2].

Basierend auf den ermittelten Kennzahlen der Teillastpunkte wurden die Jahreskennzahlen für Raumheizung analog der Berechnung der Umweltwärmequelle Erdreich durchgeführt und sind für die Heiznetze 35/28 °C und 55/45 °C in der Tabelle 4-10 zusammengestellt. Eine grafische Darstellung der Jahresheizzahlen und der Jahresnutzungsgrade zeigt die Abbildung 4-14.

Tabelle 4-10: Ermittelte Jahreskennzahlen für Raumheizung (Solar)

	Jahresheizzahl	Jahresnutzungsgrad
Heiznetz 35/28	1,31	1,37
Heiznetz 55/45	1,23	1,28

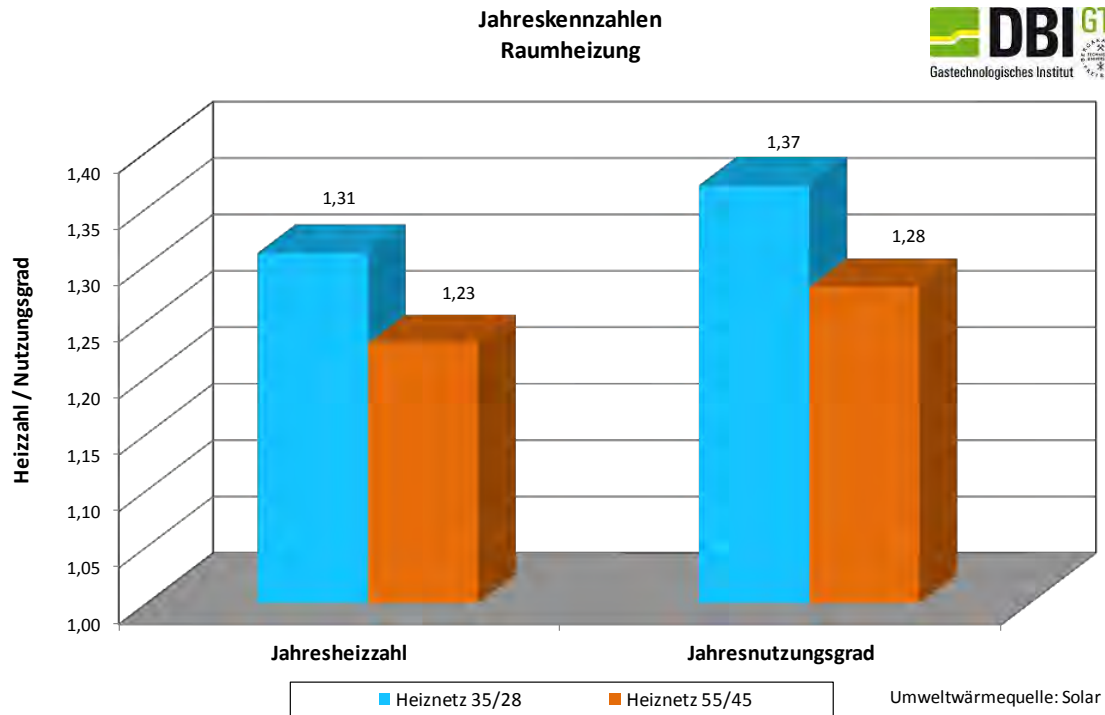


Abbildung 4-14: Ermittelte Jahreskennzahlen (Wärmequelle Solar)

Wenn die Gaswärmepumpe die Umweltwärmequelle Solarstrahlung nutzt, wird diese auch zur Warmwasserbereitung eingesetzt. Die Berechnungen der Gesamt-Jahresheizzahlen und Gesamt-Jahresnutzungsgrade mit zusätzlicher solarer Warmwasserbereitung wurden deshalb für einen Anteil der Warmwasserbereitung von 18 Prozent und einem solaren Deckungsgrad der Warmwasserbereitung von 60 Prozent durchgeführt. Die ermittelten Kennzahlen sind in der Tabelle 4-11 und der Abbildung 4-15 dargestellt.

Tabelle 4-11: Gesamt-Jahreskennzahlen mit solar unterstützter Warmwasserbereitung

	Gesamt-Jahresheizzahl	Gesamt-Jahresnutzungsgrad
Heiznetz 35/28	1,44	1,51
Heiznetz 55/45	1,36	1,41

Messung und Berechnung nach VDI 4650-2
Annahmen:
Anteil WW: 18 %
solarer Deckungsgrad WW-Bereitung: 60 %

**Gesamt-Jahreskennzahlen
bei solarunterstützter
Warmwassererzeugung**

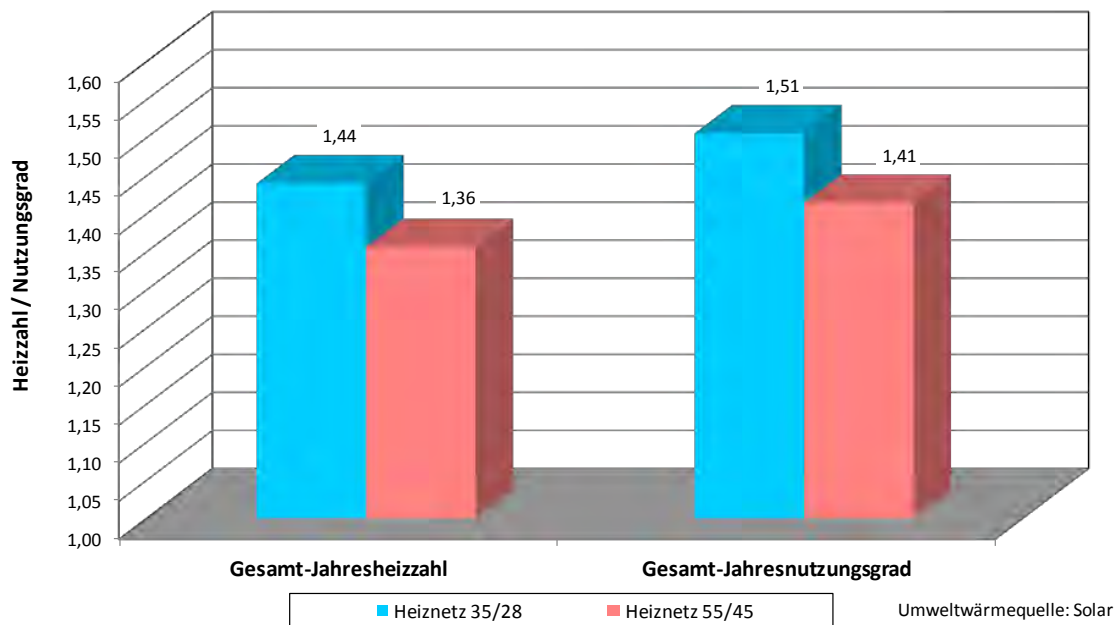


Abbildung 4-15: Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen (Wärmequelle Solar)

Für die Umweltwärmequelle Solarstrahlung erfolgten die Berechnungen der Gesamt-Jahresheizzahlen und der Gesamt-Jahresnutzungsgrade bei solar-unterstützter Raumheizung und Warmwasserbereitung ebenfalls gemäß der VDI 4650-2. Die berechneten Gesamtjahreskennziffern sind für die Heiznetze 35/28 °C und 55/45 °C in der Tabelle 4-12 und der Abbildung 4-16 dargestellt.

Tabelle 4-12: Gesamtjahreskennzahlen bei solar unterstützter Raumheizung und WW-Bereitung

	Gesamt-Jahresheizzahl	Gesamt-Jahresnutzungsgrad
Heiznetz 35/28	1,51	1,58
Heiznetz 55/45	1,42	1,48

Messung und Berechnung nach VDI 4650-2
Annahmen:
Anteil WW: 18 %
solarer Deckungsgrad für Heizungsunterstützung: 5 %
solarer Deckungsgrad WW-Bereitung: 60 %

**Gesamt-Jahreskennzahlen
bei solarunterstützter Raumheizung
und Warmwassererzeugung**

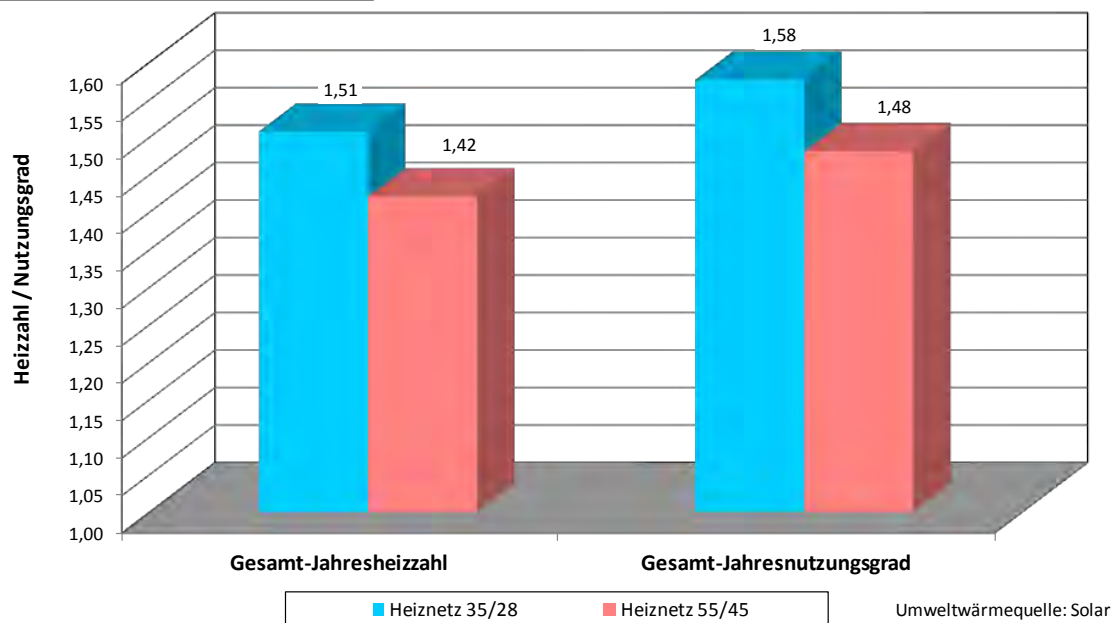


Abbildung 4-16: Ermittelte Gesamtjahreskennzahlen (Wärmequelle Solar)

4.2.6 Zusammenfassung

Bei allen durchgeführten Messungen erwies sich die VITOSORP 200-F als zuverlässig und betriebssicher. Die Messergebnisse zeigen, dass die Anlage insbesondere für Heiznetze mit niedrigen Heizkreistemperaturen geeignet ist. Das betrifft sowohl das Heiznetz 35/28 °C (Fußbodenheizung), aber auch das Heiznetz 55/45 °C (Mitteltemperatur-Radiatoren), bei dem die ermittelten Gesamtjahreskennzahlen um 6 bis 7 % niedriger liegen. Die höchsten Nutzungsgrade konnten bei den niedrigsten Heizkreistemperaturen bzw. Teillastpunkten in beiden Heiznetzen ermittelt werden.

Basierend auf den Erfahrungen bei der Installation und Inbetriebnahme der Anlage kann eingeschätzt werden, dass die Installation einer Gaswärmepumpe keinen höheren Installationsaufwand als die Installation eines Brennwertkessels mit

thermischer Solaranlage erfordert. Die Installation und Inbetriebnahme der VITOSORP 200-F sollte durch speziell geschulte Installateure ohne weitere Schwierigkeiten möglich sein.

4.3 Sole/Wasser- Gasabsorptionswärmepumpe (Robur)

Im Rahmen eines DVGW-Forschungsprojektes wurde durch die DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut (EBI) eine Sole/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpe Robur GAHP-GS Pro (Abbildung 4-18) der Firma Robur nach der Prüfvorschrift VDI 4650 Teil 2 vermessen. Die untersuchte Sole/Wasser- Gasabsorptionswärmepumpe bzw. die Wasser/Wasser-Version sind auch als OEM-Versionen von Bosch Thermotechnik unter dem Namen Logatherm GWPS/W erhältlich.



Abbildung 4-17: GAHP-GS Gasabsorptionswärmepumpe (Sole/Wasser); Quelle Robur

Ziel der in diesem Berichtsteil vorgestellten Laboruntersuchungen ist die Bestimmung von Jahresnutzungsgraden und Jahresheizzahlen als Effizienzkennzahlen nach der Prüfvorschrift VDI 4650 Teil 2. Für eine Förderung nach dem Marktanreizprogramm der BAfA müssen Gaswärmepumpen eine Jahresheizzahl von mindestens 1,3 erreichen.

Der Jahresnutzungsgrad $\eta_{N,h}$ für Heizzwecke berechnet sich wie folgt aus den einzelnen Nutzungsgraden $\eta_{h,i}$ für jede Teillaststufe, die zwischen 13 % und 63 % Teillast verteilt sind. Die Nutzungsgrade $\eta_{h,i}$ sind definiert als das Verhältnis von Wärmeleistung $P_{i,th}$ zur Brennstoffleistung (Belastung) Q_i .

$$\eta_{N,h} = \frac{5}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\eta_{h,i}}} \quad \text{mit} \quad \eta_{h,i} = \frac{P_{i,th}}{Q_i}$$

Wenn die elektrische Leistungsaufnahme $P_{i,el}$ der Gaswärmepumpe ebenfalls berücksichtigt wird, so erhält man die Jahresheizzahl ζ_h wie folgt:

$$\zeta_h = \frac{5}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\zeta_{h,i}}} \quad \text{mit} \quad \zeta_{h,i} = \frac{P_{i,th}}{Q_i + P_{i,el}}$$

Jahresnutzungsgrad- und Jahresheizzahlmessungen nach der Prüfvorschrift VDI 4650 Blatt 2

Die am EBI gemessenen Nutzungsgrad- und Heizzahlverläufe gibt die Abbildung 4-18 wieder, die Jahresnutzungsgrade und Jahresheizzahlen sind in der Tabelle 4-13 soweit definiert für die Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Varianten aufgeführt. Die eingezeichneten 100 % Punkte für die Volllast fließen nicht in die Berechnung der Jahresnutzungsgrade bzw. Jahresheizzahlen ein, sind für die Einschätzung eines optimalen Betriebspunktes nützlich. Aus dem Verlauf der Ergebnisse für die Sole/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpe geht auch ein gutes Teillastverhalten des Systems über den Modulationsbereich bis zur 13 % Teillast im Taktbetrieb hervor, die Gasabsorptionswärmepumpe arbeitet selbst beim niedrigsten Lastpunkt effizienter als ein Brennwertkessel bei Volllast. Zu beachten ist, dass die Messungen beim niedergrädigen Heiznetz entsprechend der maximal zulässigen Durchflussrate von 4 m³/h auf ein Heiznetz 37,1 °C/28 °C gemäß der Berechnungsvorschrift aus der VDI 4650 Teil 2 angepasst wurde.

Die Jahresnutzungsgrade für die Sole-Variante betragen 1,58 für das 37,1 °C/28 °C-Heiznetz und 1,47 für das 55 °C/45 °C-Heiznetz. Die Jahresheizzahlen für Heizzwecke fallen aufgrund der elektrischen Leistungsaufnahme mit 1,48 bzw. 1,38 etwas niedriger aus. Die Jahresnutzungsgrade für die Wasser/Wasser-Version werden über Umrechnungsfaktoren aus der Prüfvorschrift berechnet und sind für zwei unterschiedliche Grundwassertemperaturen in der Tabelle 4-13 mit aufgeführt. Ein allgemeiner Ansatz zur Berücksichtigung der Leistungsaufnahme der Brunnenpumpe für die Wasser/Wasser-Variante wird in der Prüfvorschrift zur Berechnung der Jahresheizzahl nicht angegeben.

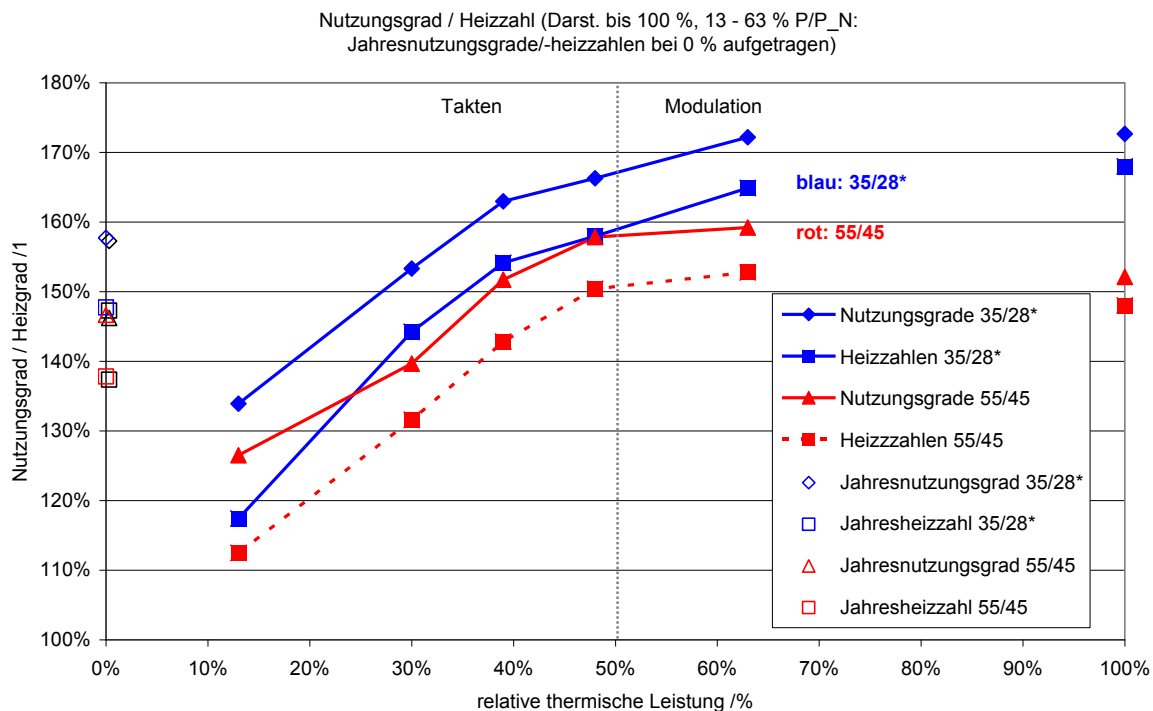


Abbildung 4-18: Teillastmessungen nach VDI 4650 Blatt 2 für die Sole/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpe, bei 0 % Last Jahresheizzahlen und Jahresnutzungsgrade, 100 % Lastmessungen fanden keinen Eingang in die Kennzahlenberechnungen, * tatsächlich 37,1 °C/ 28 °C

Tabelle 4-13: Jahresnutzungsgrade und Jahresheizzahlen für die Sole/Wasser- und Jahresnutzungsgrade für die Wasser/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpen nach VDI 4650 Blatt 2

	35 °C/28 °C*		55 °C/45 °C	
	$\eta_{h,i}$	$\zeta_{h,i} / 1$	$\eta_{h,i}$	$\zeta_{h,i} / 1$
Sole	1,58	1,48	1,47	1,38
Wasser	$\eta_{h,i} / 1$	$\eta_{h,i} / 1$	$\eta_{h,i} / 1$	$\eta_{h,i} / 1$
	7 °C	10 °C	7 °C	10 °C
	1,60	1,64	1,49	1,53

*tatsächlich 37,1 °C/28 °C

Die Laboruntersuchungen am EBI zeigten, dass die Gasabsorptionswärmepumpe GAHP-GS Pro HT ein Förderkriterium in Form der Jahresheizzahl $\zeta_h \geq 1,3$ für Heizzwecke der BAFA vom März 2011 für beide untersuchten Heiznetze erfüllt. Die Ergebnisse gelten auch für die baugleichen Gasabsorptionswärmepumpen Robur GAHP-WS Pro, E³ GS bzw. E³ WS für die Hochtemperaturversionen (HT) und die

OEM-Versionen Logatherm GWPS-41 und Logatherm GWPW-41 der Bosch Thermotechnik GmbH.

4.4 Luft/Wasser- Gasabsorptionswärmepumpe (Bosch Thermotechnik)

Im Rahmen eines DVGW-Forschungsprojektes wurde durch die DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut (EBI) die Untersuchung einer Luft/Wasser-(L/W-) Gasabsorptionswärmepumpe Logatherm GWPL-41 (Abbildung 4-20) der Firma Bosch Thermotechnik betreut. Die im Labor des HLK Stuttgart nach der Prüfvorschrift VDI 4650 Teil 2 untersuchte Luft/Wasser-(L/W-) Gasabsorptionswärmepumpe Logatherm GWPL-41 ist eine Ende 2011 von Bosch Thermotechnik in den Markt eingeführte OEM-Version der Robur GAHP-A Pro HT.



Abbildung 4-19: Bosch Thermotechnik Logatherm GWPL-41 (Luft/Wasser); Quelle: Bosch Thermotechnik

Ziel der in diesem Berichtsteil vorgestellten Laboruntersuchungen ist die Bestimmung von Jahresnutzungsgraden und Jahresheizzahlen als Effizienzkennzahlen nach der Prüfvorschrift VDI 4650 Teil 2. Für eine Förderung nach dem Marktanreizprogramm der BAfA müssen Gaswärmepumpen eine Jahresheizzahl von mindestens 1,3 erreichen.

Der Jahresnutzungsgrad $\eta_{N,h}$ für Heizzwecke berechnet sich wie folgt aus den einzelnen Nutzungsgraden $\eta_{h,i}$ für jede Teillaststufe, die zwischen 13 % und 63 % Teillast verteilt sind. Die Nutzungsgrade $\eta_{h,i}$ sind definiert als das Verhältnis von Wärmeleistung $P_{i,th}$ zur Brennstoffleistung (Belastung) Q_i .

$$\eta_{N,h} = \frac{5}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\eta_{h,i}}} \quad \text{mit} \quad \eta_{h,i} = \frac{P_{i,th}}{Q_i}$$

Wenn die elektrische Leistungsaufnahme $P_{i,el}$ der Gaswärmepumpe ebenfalls berücksichtigt wird, so erhält man die Jahresheizzahl ζ_h wie folgt:

$$\zeta_h = \frac{5}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\zeta_{h,i}}} \quad \text{mit} \quad \zeta_{h,i} = \frac{P_{i,th}}{Q_i + P_{i,el}}$$

Jahresnutzungsgrad- und Jahresheizzahlmessungen nach der Prüfvorschrift VDI 4650 Blatt 2

Die am HLK gemessenen Nutzungsgrad- und Heizzahlverläufe gibt die Abbildung 4-20 wieder, die Jahresnutzungsgrade und Heizzahlen sind in der Tabelle 4-14 aufgeführt. Die eingezeichneten 100 % Punkte für die Volllast fließen nicht in die Berechnung der Jahresnutzungsgrade bzw. Jahresheizzahlen ein, sind für die Einschätzung eines optimalen Betriebspunktes aber wichtig. Aus dem Verlauf der Ergebnisse für die Luft/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpe geht auch ein sehr gutes Teillastverhalten des Systems über den Modulationsbereich bis zu 13 % Teillast im Taktbetrieb hervor. Die Jahresnutzungsgrade betragen 1,49 für das 35 °C/28 °C-Heiznetz und 1,36 für das 55 °C/35 °C-Heiznetz. Die Jahresheizzahlen für Heizzwecke fallen aufgrund der elektrischen Leistungsaufnahme mit 1,39 bzw. 1,29 etwas niedriger aus.

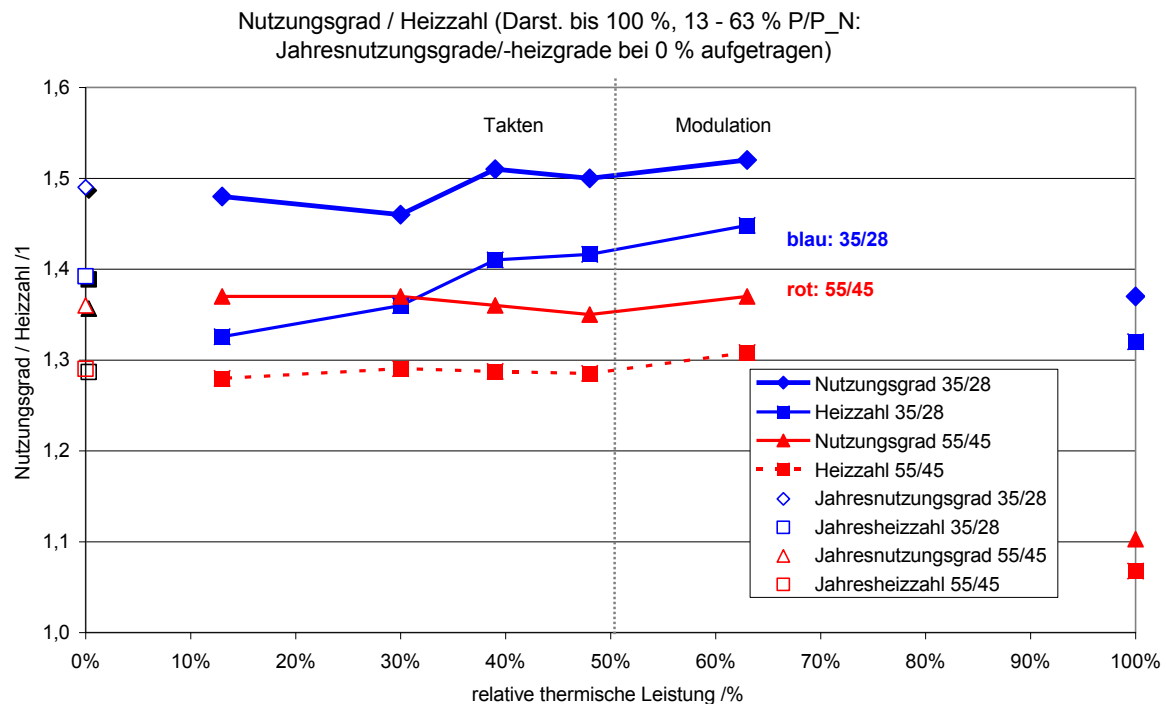


Abbildung 4-20: Teillastmessungen nach VDI 4650 Blatt 2 für die Luft/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpe, bei 0 % rel. thermische Leistung sind die Jahresheizzahlen und die Jahresnutzungsgrade aufgetragen, die Messungen bei 100 % fanden keinen Eingang in die Kennzahlenberechnungen

Tabelle 4-14: Jahresnutzungsgrade und Jahresheizzahlen nach VDI 4650 Blatt 2 für die Luft/Wasser-Gasabsorptionswärmepumpe

35 °C/28 °C		55 °C/45 °C	
$\eta_{h,i} / 1$	$\zeta_{h,i} / 1$	$\eta_{h,i} / 1$	$\zeta_{h,i} / 1$
1,5	1,4	1,4	1,3

Die Laboruntersuchungen am HLK zeigten, dass die Gasabsorptionswärmepumpe Logatherm GWPL-41 bei der gegebenen Luft-Nennaußentemperatur von -10 °C gerundet ein Förderkriterium in Form der Jahresheizzahl $\zeta_h \geq 1,3$ für Heizzwecke der BAFA vom März 2011 für beide untersuchten Heiznetze erfüllt. Die Kooperation von Herstellern, Forschungsinstituten und der IGWP im Rahmen der Untersuchung unterstützte auch die Einführung eines effizienten, geregelten Quellengebläses, das die elektrische Leistungsaufnahme der Gasabsorptionswärmepumpe um ca. 20 %

senkte. Die L/W-Gasabsorptionswärmepumpe zeigte eine sehr gute Teillastfähigkeit. Die Ergebnisse gelten auch für die baugleichen Gasabsorptionswärmepumpen Robur GAHP-A Pro und E³ A für die Hochtemperaturversionen (HT).

5 Auswertung der Feldtestdaten

Im Rahmen der IGWP, die aus den Mitgliedern E.ON Ruhrgas, EnBW, ESB, EWE, GASAG, MVV, RWE, VNG sowie den Geräteherstellern Bosch-Nefit, Vaillant und Viessmann besteht, wurden Feldtestanlagen installiert und betrieben. In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse aus den im Feld gewonnenen Daten vorgestellt und mit den am Versuchsstand gemessenen Daten verglichen.

5.1 Feldtestdaten der Gaswärmepumpen der Firma Bosch-Nefit

Im Rahmen der IGWP wurden sechs Anlagen (DAWP) im Feld installiert, die zur Auswertung betrachtet werden. Die Feldtestanlagenstandorte sind in der Abbildung 5-1 dargestellt und in Tabelle 5-1 aufgeführt. Die dabei gewonnenen Messdaten wurden dem GWI zur Verfügung gestellt.

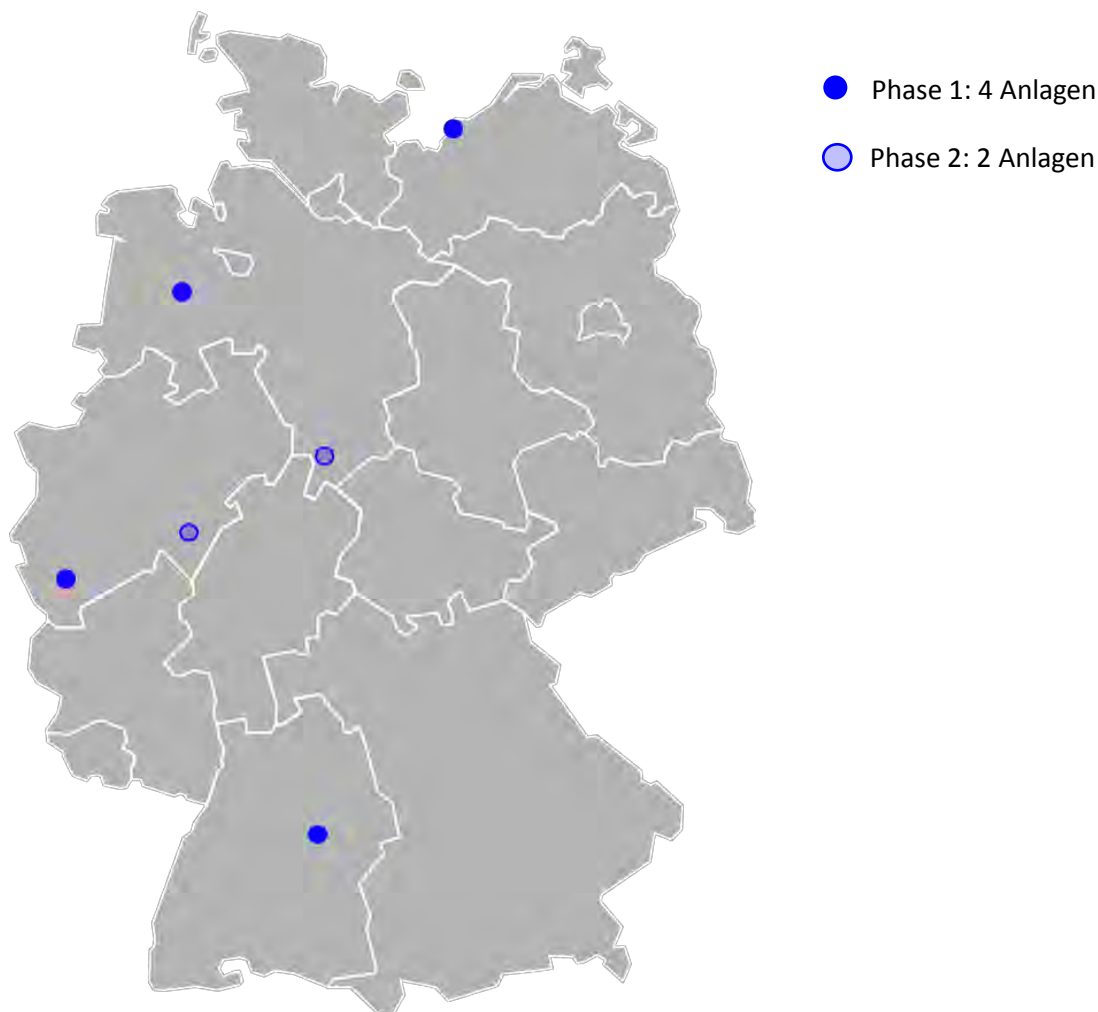


Abbildung 5-1: Standorte der Feldtestanlagen der Gaswärmepumpe der Firma Bosch-Nefit (Quelle ERG)

Tabelle 5-1: Übersicht der Gerätestandorte der Gaswärmepumpe der Firma Bosch-Nefit

GWP-Nr.	Betreiber	Ort	Feldtestphase
3	VNG	Börgerende	1
9	EWE	Emstek	1
12	EnBW/ESW	Stuttgart	1
31	E.ON Ruhrgas	Euskirchen	1
103	E.ON Ruhrgas	Siegen	2
104	E.ON Ruhrgas	Kassel	2
6	EWE	Ovelgönne*	1

* Gerät wurde ausgebaut und durch einen Brennwertkessel ersetzt.

In Abbildung 5-2 ist eine der Feldtestanlagen dargestellt. Diese Anlage befindet sich in Stuttgart und versorgt einen Haushalt von 3-5 Personen und einer Wohnungsfläche von 187 m² mit Heizwärme und Warmwasser. Als Heizungssystem wird eine Kombination aus Fußbodenheizung und NT-Konvektoren eingesetzt, darüber hinaus ist im Haus ein 400 l Pufferspeicher installiert. Zur Unterstützung der Warmwasserbereitung sind ebenfalls Solarkollektoren montiert.

Die Anlage läuft seit Mai 2010 und liefert seit September 2010 Messdaten. Wird die solare Warmwasserbereitung mitberücksichtigt, erreicht die Anlage einen Nutzungsgrad von 141 %. Ohne die solare Warmwasserbereitung ergibt sich immer noch ein guter Nutzungsgrad von 121 %.



Abbildung 5-2: Feldtestanlage GWP 12

In Abbildung 5-3 ist die Feldtestanlage 09 dargestellt. Diese Anlage ist in einem Haus (185 m² Wohnfläche) in Emstek installiert und versorgt einen 4-Personen-Haushalt über eine Fußbodenheizung mit Heizwärme. Als Trinkwasserspeicher ist ein 290 l Speicher installiert. Anders als die vorherige Feldtestanlage ist kein Solarkollektor installiert.

Die Anlage wurde im Frühjahr 2010 in Betrieb genommen und seit April 2010 werden Messdaten übermittelt. Das System erreicht einen Wirkungsgrad von 118 %.



Abbildung 5-3: Feldtestanlage GWP 09

Die Auswertung gestaltete sich aufgrund der geringen Anlagenanzahl und einiger fehlerhafter Aufzeichnungen schwierig. Die aus den theoretischen Überlegungen isolierten Einflussgrößen sind in Abbildung 5-4 dargestellt.

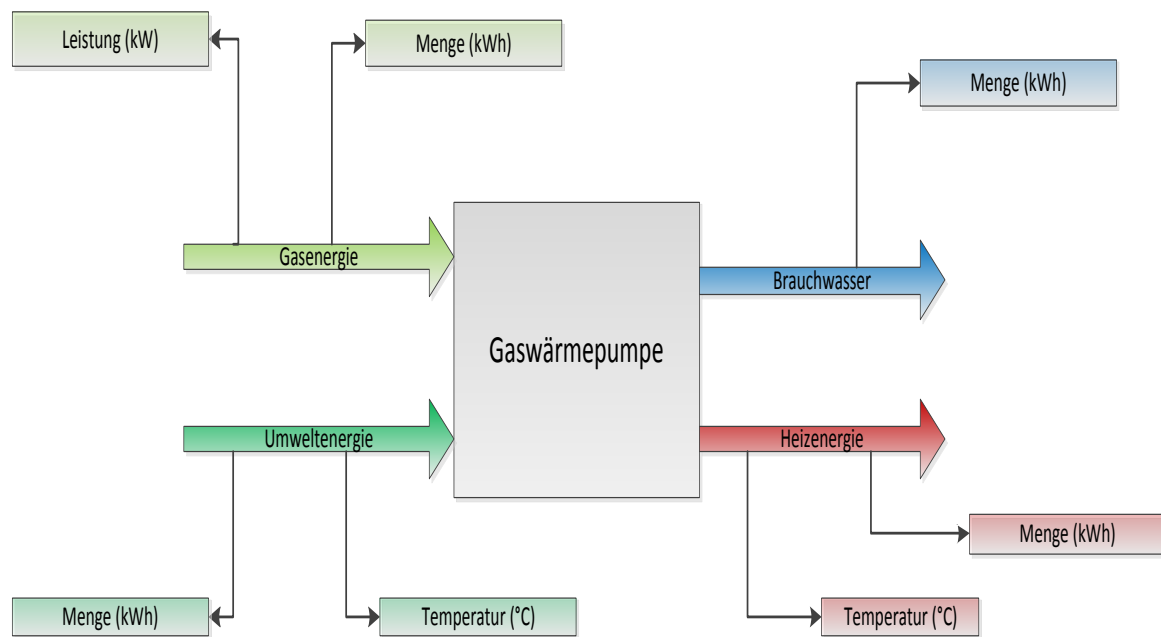


Abbildung 5-4: Einflussgrößen für das System Gaswärmepumpe

Die Gaswärmepumpen sind bis auf standortabhängige Unterschiede in der Peripherie wie in Abbildung 5-5: Schaltschema der Bosch-Nefit GWP nach IGWP (Quelle: IGWP) dargestellt ausgeführt und mit Messtechnik ausgestattet.



Aus den sechs verfügbaren DAWP-Anlagen wurden vier Anlagen ausgewählt. Dabei wurden charakteristische Daten der Gebäude und Nutzer, Störungen und Anlagenparameter als Entscheidungsmerkmale genutzt. Zwei der ausgewählten Anlagen verfügen zusätzlich über Solarkollektoren zur Warmwasserbereitung.

Als Auswerteperiode wurde der Zeitraum zwischen dem 01.01.2011 und 31.12.2011 gewählt, wobei anzumerken ist, dass nicht für jeden der ausgewerteten Monate vollständige Messdaten vorliegen. Die Datenlücken wurden soweit wie möglich kompensiert.

Als Bezugs- und Vergleichsgrößen zur Bewertung der Anlagen dienen die Nutzungsgrade. Zum Verständnis sind in Tabelle 5-2, Tabelle 5-3 und Abbildung 5-6 die Randbedingungen und Berechnungsgrundlagen für die Nutzungsgradbestimmung aufgeführt.

Tabelle 5-2: Zeichen und Operatoren

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

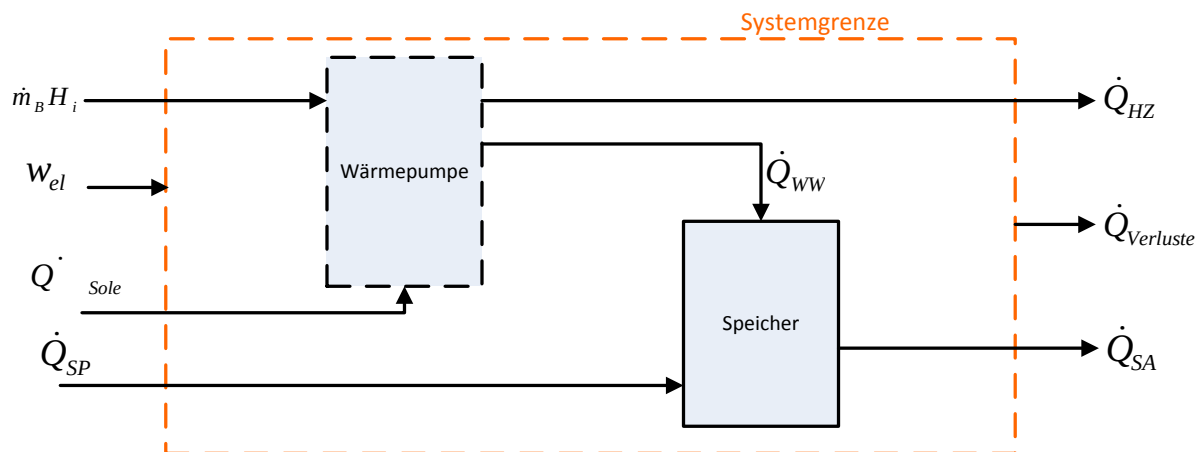


Abbildung 5-6: Schematische Systemdarstellung

Tabelle 5-3: 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>	$\eta_{SysmS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{SA}}{\dot{m}_B H_i + w_{el} \cdot f_p}$
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>	$\eta_{HGmS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{WW}}{\dot{m}_B H_i + w_{el} \cdot f_p}$
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>	$\eta_{HGSmS} = \frac{\dot{Q}_{HZ} + \dot{Q}_{WW} + \dot{Q}_{SP}}{\dot{m}_B H_i + w_{el} \cdot f_p}$

Die Betriebsweisen der Gaswärmepumpen sind von unterschiedlichen Einflussgrößen abhängig und haben Einfluss auf die Nutzungsgrade der Anlagen.

Damit eine Vergleichbarkeit der Anlagen gewährleistet bleibt, auch wenn die Datenlage 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 untenstehende Gleichung). Aus gleichem Grund ist die durchschnittliche monatliche Brauchwasserenergie als einheitliche Größe eingeführt worden.

$$Q_{\text{bereinigt}} = \frac{Q_{\text{gemessen}}}{G_{15,\text{gemessen}}} \cdot G_{15,\text{Periode}}$$

$Q_{\text{bereinigt}}$:	<i>bereinigte Heizwärme</i>
Q_{gemessen} :	<i>gemessene Heizwärme der vollständig gemessenen Monate</i>
$G_{15,\text{gemessen}}$:	<i>Heizgradtage der vollständig gemessenen Monate</i>
$G_{15,\text{Periode}}$:	<i>Heizgradtage der gesamten Auswerteperiode</i>

Die Rahmendaten der untersuchten Feldtestanlagen sind in Tabelle 5-4 aufgeführt.

Tabelle 5-4: Einflussgrößen und Anlagenparameter

GWP	Nominale Heizkreis-temperaturen	Mittlere Heizungstemperatur	Heizungsart	Zirkulation	Baujahr	Beheizte Wohnfläche	Solar-Kollekt.
GWP 03	40/30	39°C	Radiatoren	ja	2003	88 m²	Nein
GWP 09	40/30	28°C	FB	ja	1999	185 m²	nein
GWP 12	40/30	36°C	FB+NT-Konvektoren im DG	ja	1934 (Sanierung nach ENeV 2007)	187 m²	ja
GWP 31	40/30	35°C	FB	ja	2009	140 m²	ja

Bevor eine Betrachtung der Nutzungsgrade erfolgt, wurden die Betriebsweisen der Gaswärmepumpen untersucht, um Korrelationen zu den Nutzungsgraden herstellen zu können. Eine Übersicht der Vorgehensweise zur Untersuchung der Gaswärmepumpen geben unter anderem die Diagramme, wie in Abbildung 5-7: Summe der Energien und Verläufe der Temperaturen über die Periode; GWP 03 und Abbildung 5-8: Summe der Energien und Verläufe der Temperaturen über die Periode; GWP exemplarisch für die Gaswärmepumpe 03 (ohne Solarkollektor) und Gaswärmepumpe 31 (mit Solarkollektor) wieder. Dabei sind die Energien nach Ursprung und Verwendung getrennt und in monatlicher Abstufung summiert aufgetragen. Verläufe der wesentlichen Systemtemperaturen sind ebenfalls als Monatsmittel über die Periode von einem Jahr dargestellt.

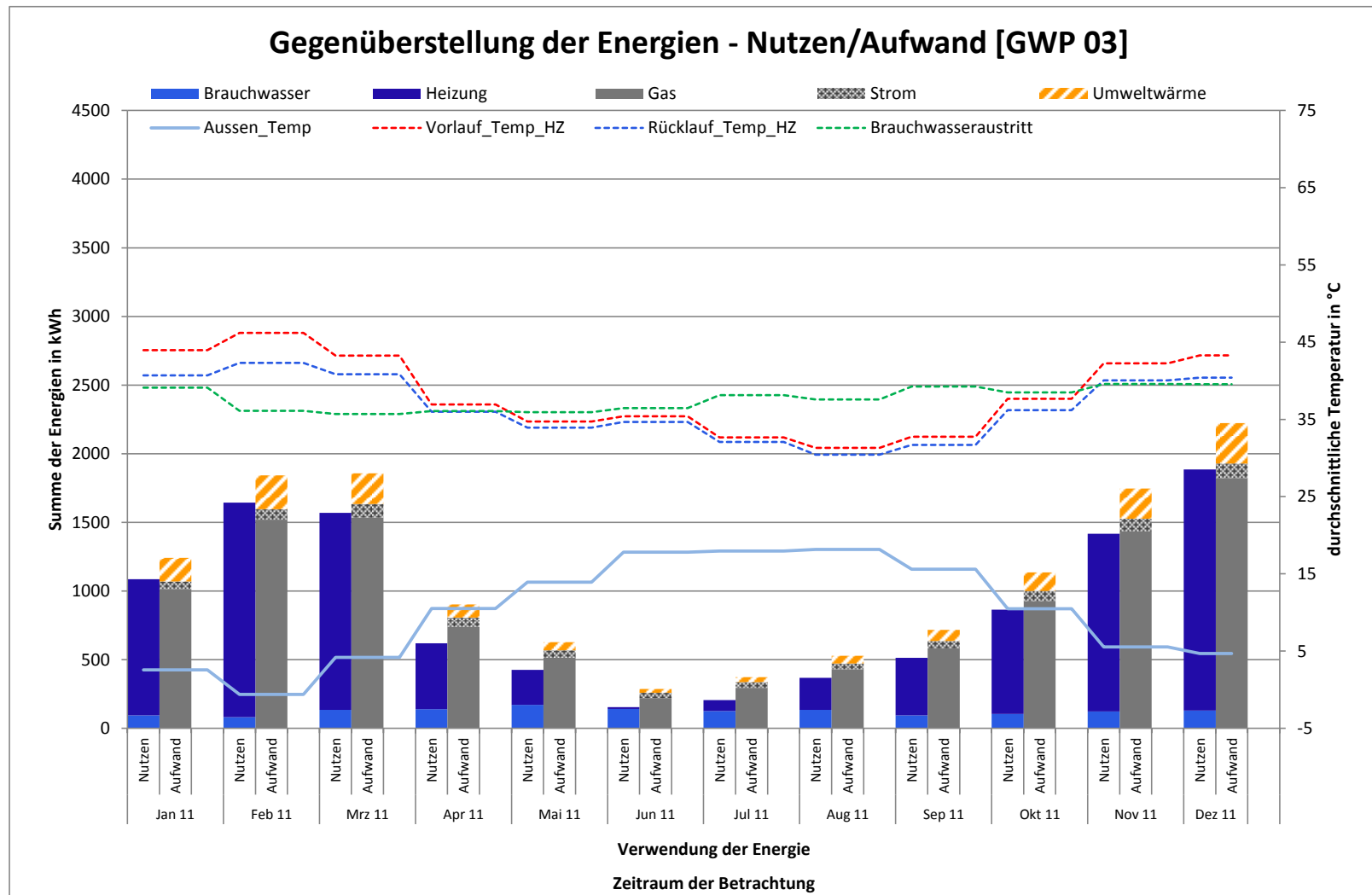


Abbildung 5-7: Summe der Energien und Verläufe der Temperaturen über die Periode; GWP 03

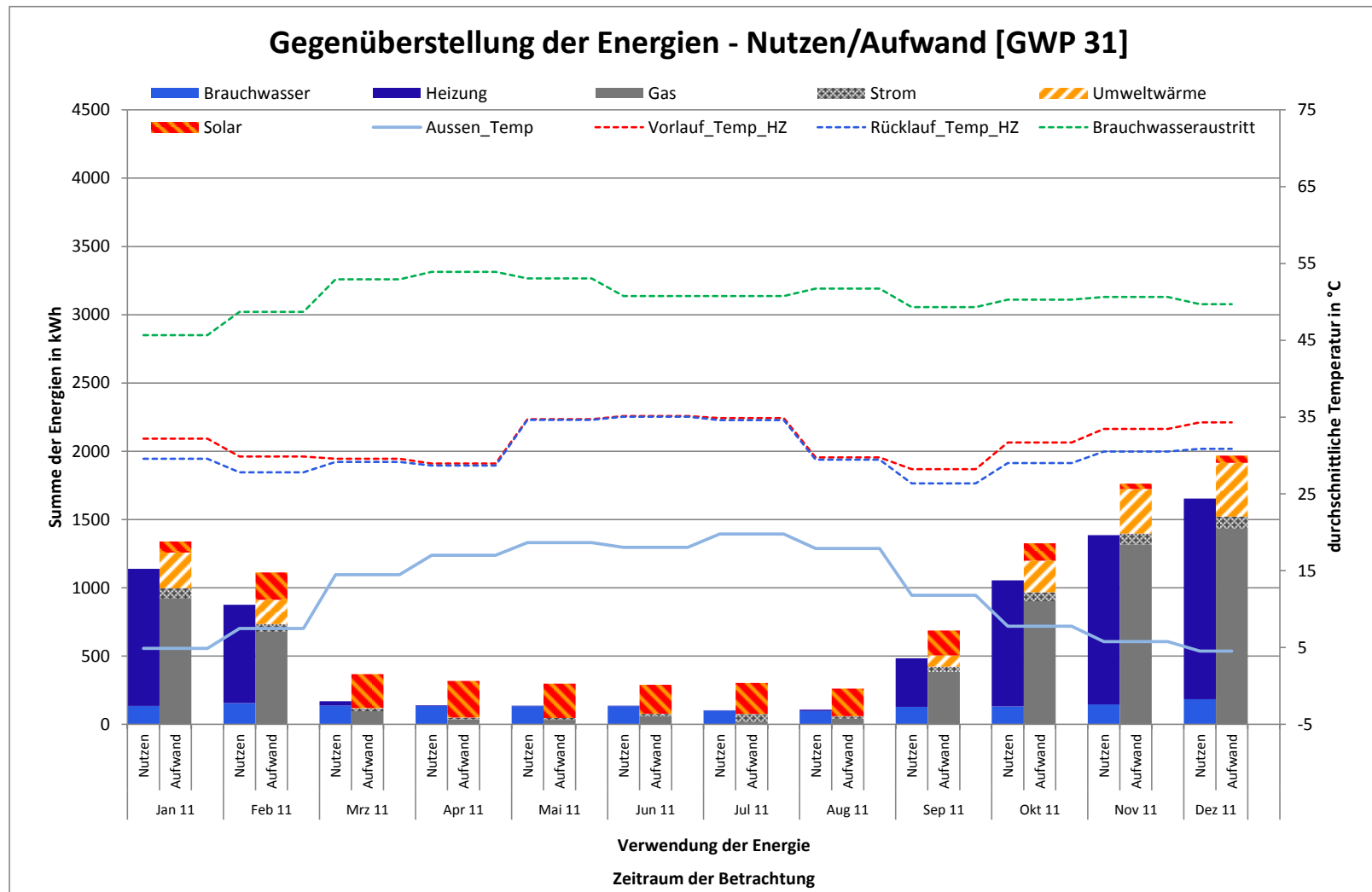


Abbildung 5-8: Summe der Energien und Verläufe der Temperaturen über die Periode; GWP 31

Eine eindeutige Differenzierung der Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Anlageneffizienz ließ sich aufgrund der großen Anzahl an Einflussgrößen und der gegenseitigen Beeinflussung nicht definieren.

5.1.1 Vergleich des System- und Anlagennutzungsgrades

Bei der Betrachtung der Nutzungsgrade der ausgewählten Anlagen lassen sich Parallelen erkennen. In folgender Abbildung 5-9 sind jeweils die täglichen Anlagennutzungsgrade (Nutz_HG_Solar_oS, Vergleich Tabelle 5-3 und Abbildung 5-9) der Gaswärmepumpen über den Quotienten aus dem gesamten Energieeintrag exklusive Strom und dem Gasanteil aufgetragen. Auffällig sind der geordnete Verlauf der Anlagennutzungsgrade und der deutliche Anstieg in Richtung eines geringeren Gasanteils.

Dabei ist zu beachten, dass es bei Tageswerten durch die zeitliche Auflösung zu Ausreißern kommen kann. So kann an einem Tag Energie in das System eingebracht werden und die Nutzung kann hauptsächlich am nächsten Tag erfolgen, so dass an einem Tag ein zu geringer Nutzungsgrad und an dem anderen Tag ein zu hoher Nutzungsgrad gemessen wird. Durch die Menge an Daten kann allerdings trotzdem eine Aussage über den qualitativen Verlauf getätigt werden.

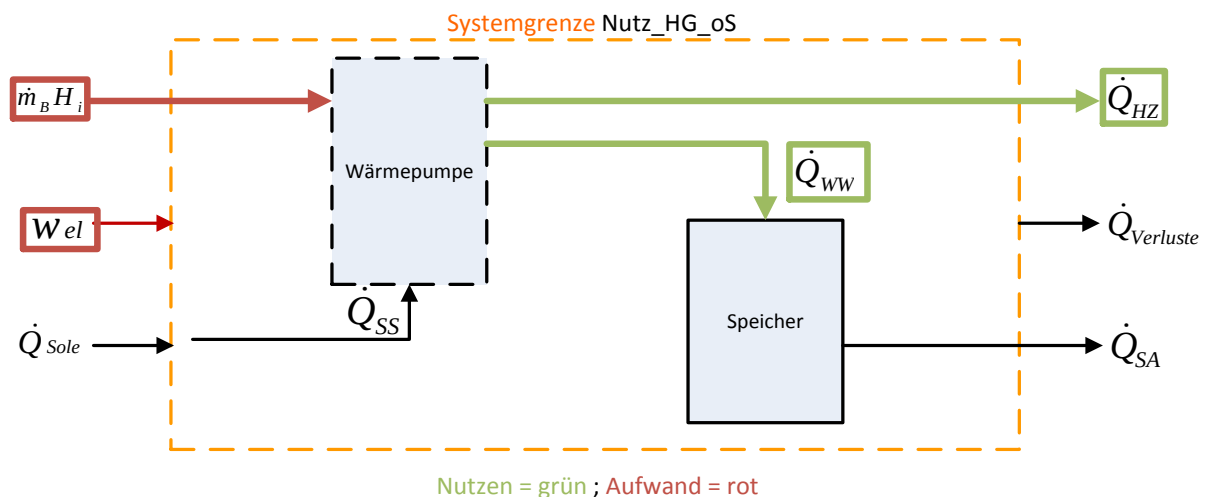


Abbildung 5-9: Visualisierung zum Anlagennutzungsgrad „Nutz_HG_oS“

Der Anlagennutzungsgrad „Nutz_HG_oS“ berechnet sich wie folgt:

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

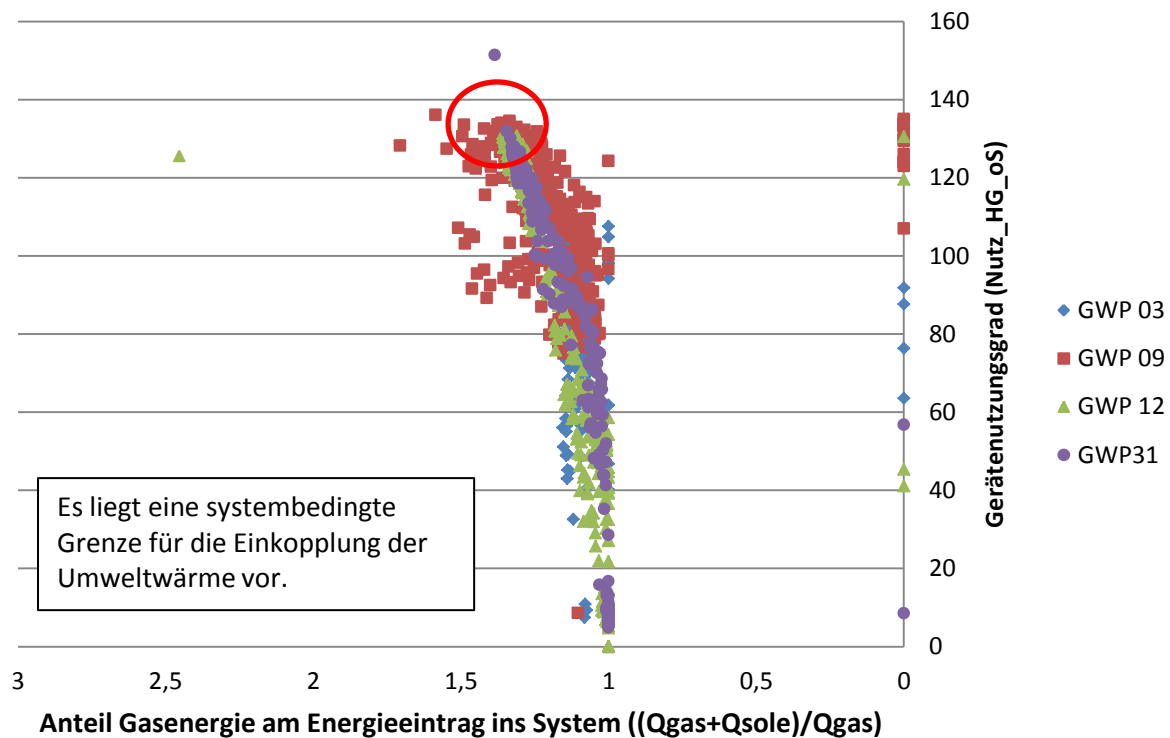


Abbildung 5-10: Tageswerte der Anlagennutzungsgrade "Nutz_HG_oS" aufgetragen über den Quotienten aus dem gesamten Energieeintrag exklusiv Strom und der Gasenergie

Die Abbildung zeigt, dass die Anlagen 03, 12 und 31 bis zu einem gewissen Punkt Umweltenergie einkoppeln und analog dazu der Nutzungsgrad steigt. Der Punkt ist die systembedingte Grenze (Carnot'sches Wärmeverhältnis unter Berücksichtigung der Abweichungen vom idealen Prozess (abhängig von den Wärmepumpen-prozesstemperaturen)). An diesem Punkt wird der maximal mögliche Betrag an Umweltwärme vom Wärmepumpenprozess eingekoppelt und die höchste Effizienz erzielt.

Anlage GWP 09 streut breiter und der Verlauf ist nicht so klar zu erkennen wie bei den anderen Anlagen, ein Großteil der Punkte liegt jedoch innerhalb des Verlaufes der anderen Anlagen, so dass auf Messfehler geschlossen werden kann. Eine nähere Untersuchung der Anlage konnte keine Erklärung für diese recht deutliche Streuung liefern. Auch sind keine Störungen während des Betriebes bekannt, noch unterscheidet sich der eingebrachte Erdkollektor von den Kollektoren der anderen Anlagen.

In Abbildung 5-12 ist in gleicher Weise der Systemnutzungsgrad aufgetragen (Nutz_Sys_Heiz_WW_oS, Vergleich Tabelle 5-3 und Abbildung 5-11).

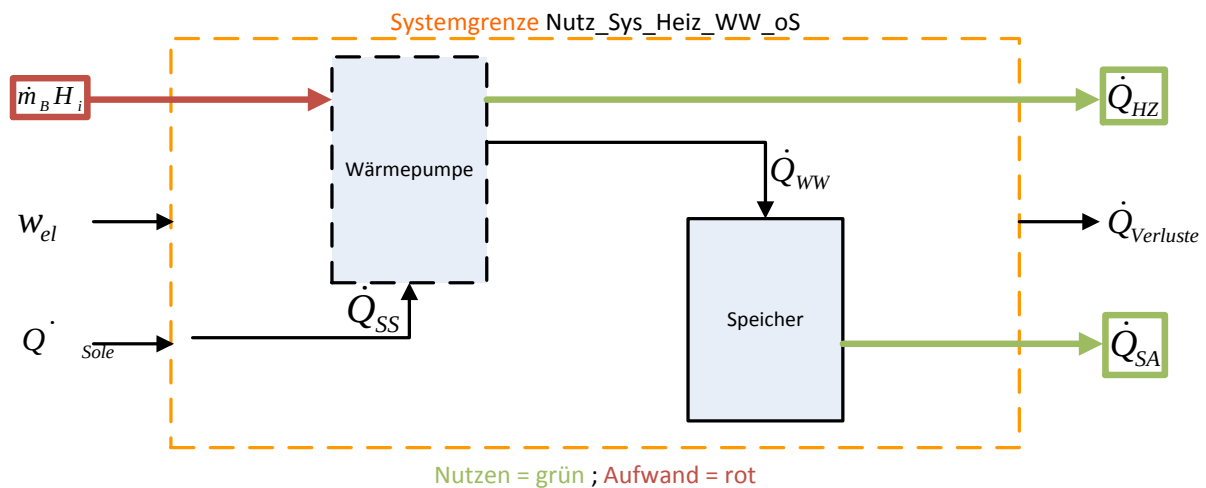


Abbildung 5-11: Visualisierung zum Systemnutzungsgrad „Nutz_Sys_Heiz_WW_oS“

Der Systemnutzungsgrad „Nutz_Sys_Heiz_WW_oS“ berechnet sich wie folgt:

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

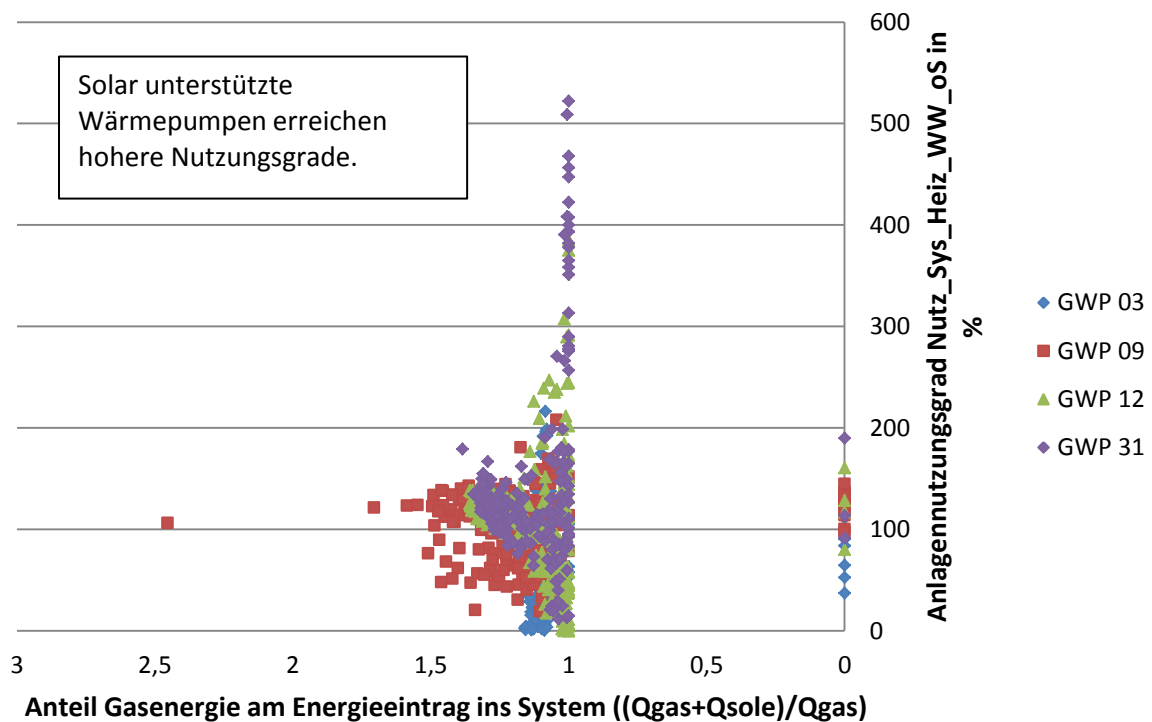


Abbildung 5-12: Tageswerte der Systemnutzungsgrade "Nutz_Sys_Heiz_WW_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie

Der Solareintrag in das System bei zwei der vier Anlagen zieht die Nutzungsgrade teilweise nach oben und verzerrt so das Bild. An Tagen mit einer hohen Solarstrahlung und geringer oder keiner Heizenergieanforderung überlagert der Nutzen des Solarkollektors das Verhalten des Heizsystems. Da nicht jede Anlage mit Solarkollektoren ausgerüstet ist, wird im Folgenden der Systemnutzungsgrad nur für die zwei Anlagen ohne Solarkollektor dargestellt.

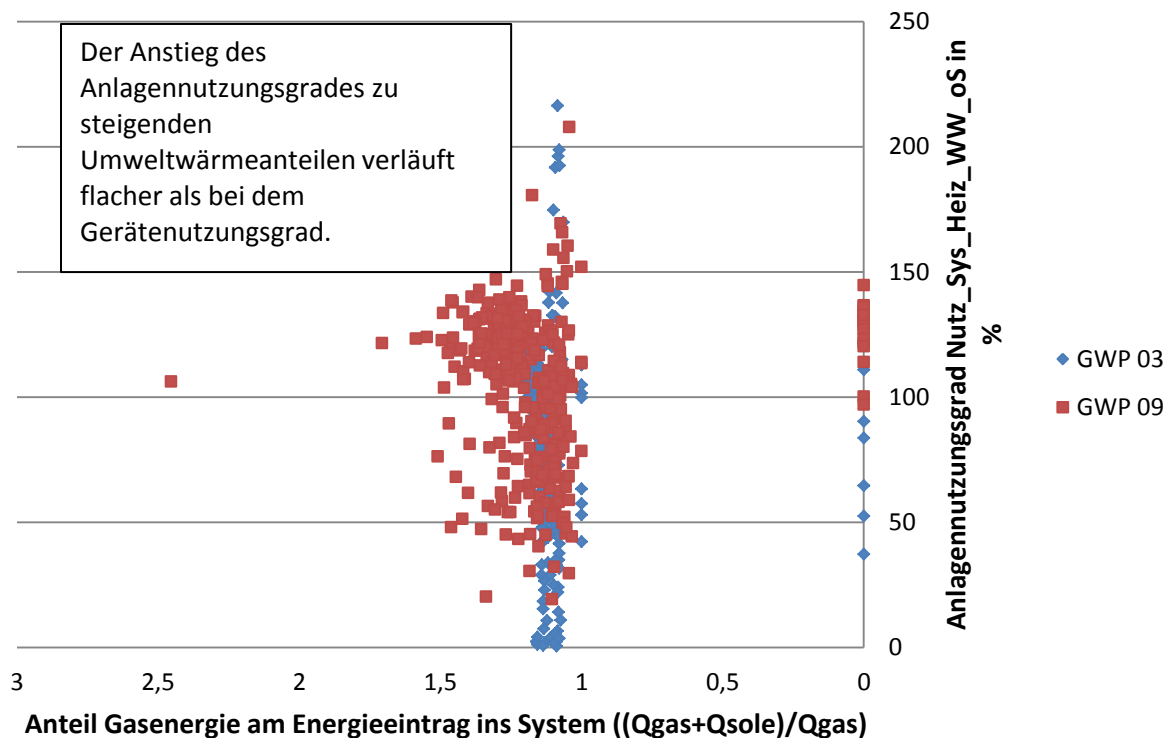


Abbildung 5-13: Tageswerte der Systemnutzungsgrade "Nutz_Sys_Heiz_WW_oS" aufgetragen über den Anteil Gasenergie am gesamten Energieeintrag in das System exklusive elektrischer Energie für Anlagen ohne Solarkollektor

Eine der zwei Anlagen ist GWP 09, die von vorneherein eine relativ breitere Streuung der Daten aufweist, so dass aus dem Vergleich von Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13 keine belastbare Aussage gewonnen werden kann, bis auf dass der Anstieg des Anlagennutzungsgrades von Anlage GWP 03 flacher verläuft, als bei der Betrachtung des Gerätenutzungsgrades. Auch bei Anlage GWP 09 zeigt sich, dass die Punkteverteilung in die Breite gezogen wird. Dies ist sehr wahrscheinlich auf die Speicherverluste zurückzuführen. Die Nutzung eines Speichers führt demnach zwar zu einer Komforterhöhung, allerdings wird ohne einen Solarkollektor (der praktisch ohne Kosten die Speicherverluste ausgleichen kann) dies auf Kosten des Nutzungsgrades erreicht. Diese Verluste könnten unter Umständen mit einer entsprechenden Regelung reduziert werden, allerdings ist im Feld immer mit signifikanten Speicherverlusten zu rechnen.

5.1.2 Einfluss der Brauchwasserbereitung auf die Effizienz

Als weitere wichtige Einflussgröße wurde der Anteil der Brauchwasserbereitung am Gesamtenergiebedarf identifiziert. Den Überlegungen zu Folge ist mit einem ansteigenden Brauchwasseranteil mit einem sinkenden Nutzungsgrad zu rechnen.

Um aus den vorliegenden Feldtestdaten eine Aussage treffen zu können, wurde der Anteil der Brauchwasserenergie ($Q_{\text{Heizung}}/(Q_{\text{Heizung}}+Q_{\text{Brauchwasser}})$) über den Gerätenutzungsgrad aufgetragen (Siehe Abbildung 5-14). Der Gerätenutzungsgrad berücksichtigt dabei nur Energieströme, die in oder aus dem Gerät herausgehen. Somit konnten auch die Anlagen mit Solarkollektoren berücksichtigt werden.

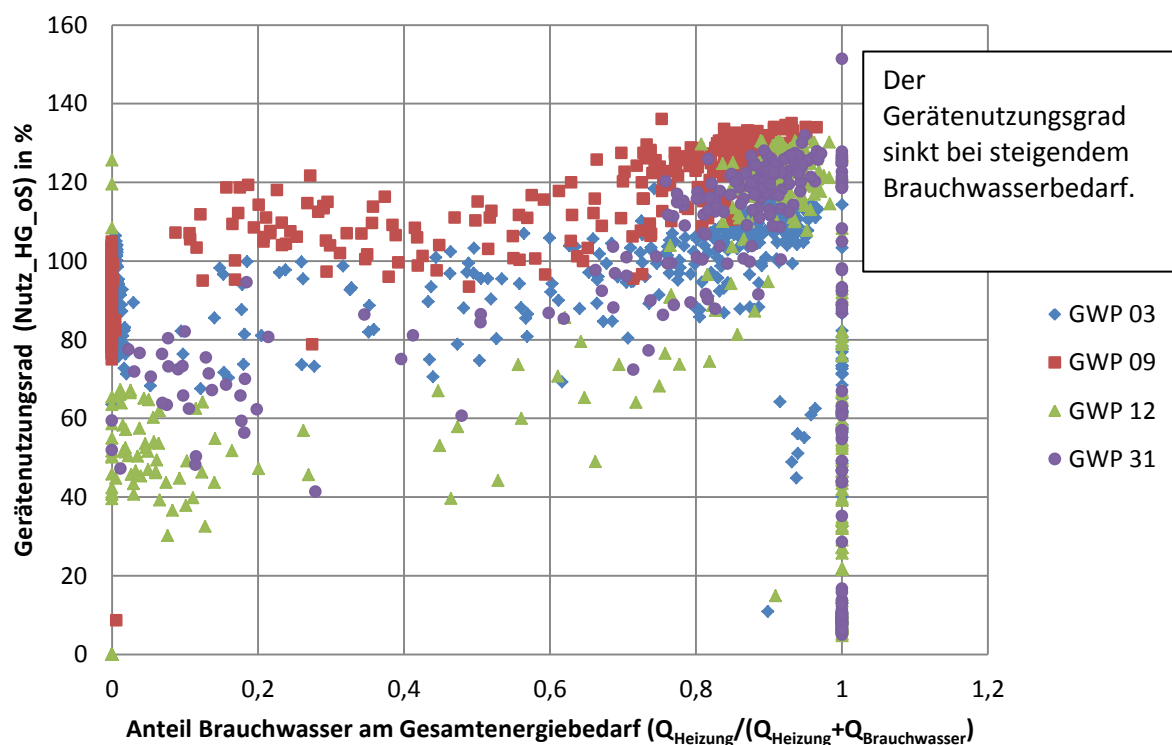


Abbildung 5-14: Tageswerte der Gerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS" aufgetragen über den Anteil Brauchwasser am Gesamtenergiebedarf

Wie zu sehen ist, bestätigt sich die Vermutung, dass mit ansteigendem Anteil der Brauchwasserenergie am Gesamtenergiebedarf der Nutzungsgrad abnimmt. Eine dichte Punkteverteilung entsteht in der Region um einen Nutzungsgrad von 120 % und einem relativ kleinen Anteil von Brauchwasser am Gesamtenergiebedarf. Die Ausreißer auf der Linie $\{Q_{\text{Heizung}}/(Q_{\text{Heizung}}+Q_{\text{Brauchwasser}}) = 1\}$ sind wie schon oben erwähnt auf die zeitliche Auflösung oder unter Umständen auch auf Messfehler zurückzuführen.

5.1.3 Einfluss der Systemtemperaturen auf die Effizienz

Um den Einfluss der Systemtemperaturen feststellen zu können, wurden die Temperaturen (Vorlauftemperatur Heizung/Vorlauftemperatur Sole) in Tagesschärfe über dem Gerätenutzungsgrad aufgetragen (Siehe Abbildung 5-15).

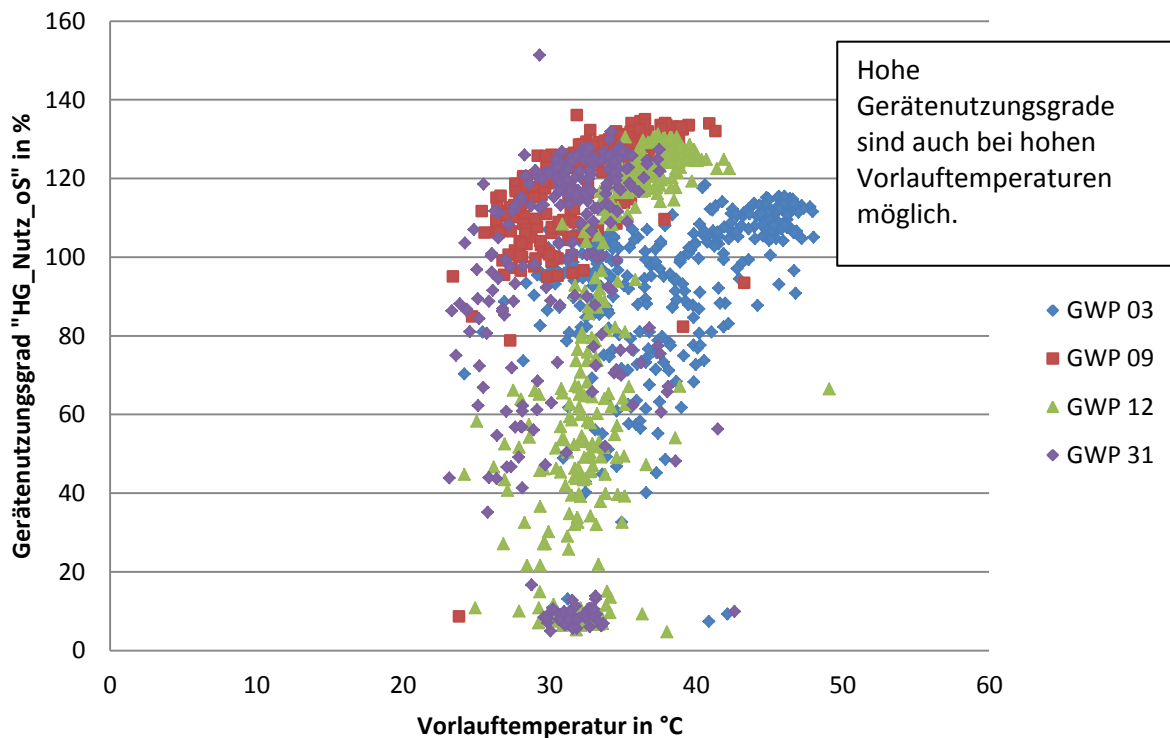


Abbildung 5-15: Tageswerte der Vorlauftemperaturen aufgetragen über die Gerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS"

Aus den theoretischen Überlegungen war zu erwarten, dass bei niedrigen Vorlauftemperaturen die Effizienz höher liegt. Allerdings ist dieser Zusammenhang nicht ersichtlich. Dies deutet darauf hin, dass die Beeinflussung der verschiedenen Parameter untereinander eine Isolation und klare Benennung eines einzelnen Einflusses sehr schwierig macht. Erkennbar ist aber, dass auch bei höheren Vorlauftemperaturen eine gute energetische Effizienz erreicht werden kann. Mit den vorangegangenen Überlegungen kann festgestellt werden, dass die Vorlauftemperatur im Gegensatz zum Anteil der Brauchwasserbereitung eine untergeordnete Rolle spielt bzw. durch andere Einflüsse überlagert wird.

Eine weitere mögliche Erklärung für die Verteilung ist, dass im Teillastbetrieb niedrige Temperaturen gefahren werden, während gleichzeitig die Verluste durch An- und Abfahren den Nutzungsgrad über den Tag gesehen verringern. Bei einer konstanten Last hingegen könnte ein ständig aufgeheiztes System auch mit höheren Heizkreistemperaturen einen höheren Nutzungsgrad erzielen. Zu beachten ist auch,

dass für einen hohen Nutzungsgrad eine kleine Last anzustreben ist, da sich das Verhältnis von eingesetzter Gasenergie zu genutzter Umweltwärme verbessert. Von der Vorlauftemperatur lässt sich aber nicht direkt auf die Last schließen.

Die zweite wichtige Systemtemperatur ist die Temperatur der Sole. Die Eintrittstemperatur in das System wurde in Tagesschärfe über den Nutzungsgrad aufgetragen (Siehe Abbildung 5-16).

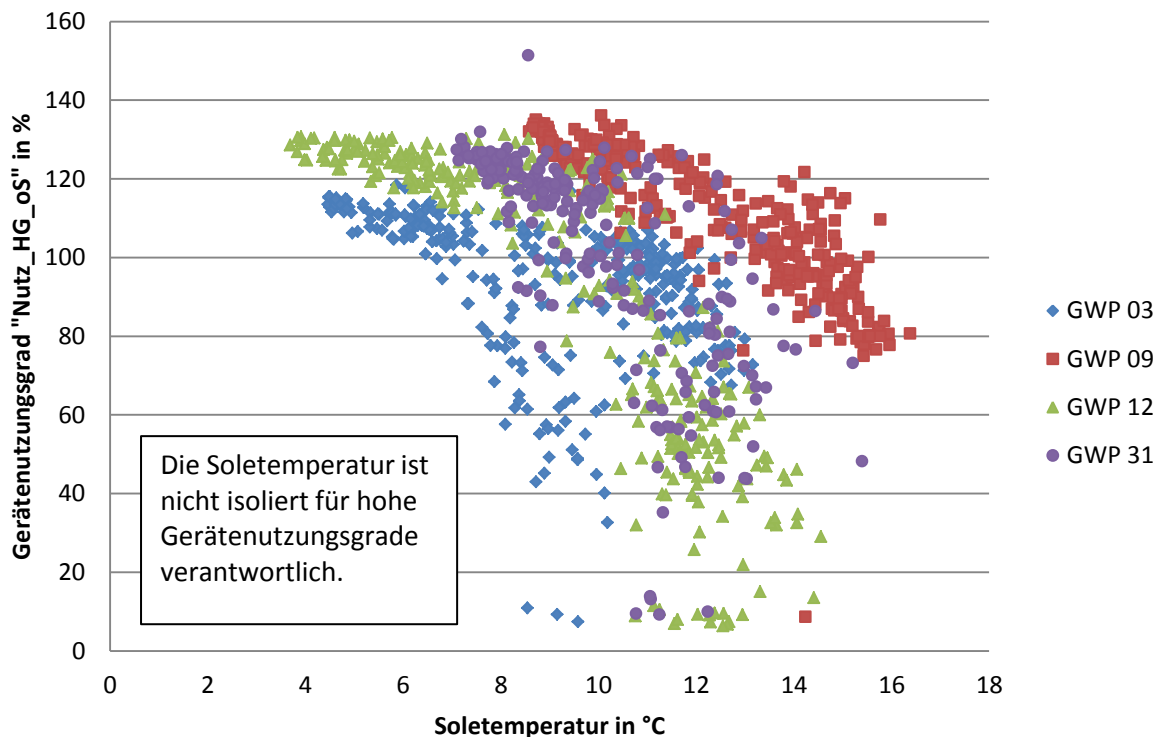


Abbildung 5-16: Tageswerte der Soletemperaturen aufgetragen über die Gerätenutzungsgrade "Nutz_HG_oS"

Bei der Betrachtung kann kein Zusammenhang zwischen steigender Effizienz und steigender Temperatur erkannt werden. Dies führt zu dem gleichen Schluss, dass der Einfluss der Soletemperatur durch andere Anlagenparameter überlagert wird. Wie bei den Heizkreistemperaturen kann hier auch die unterschiedliche Last den Verlauf zum Teil erklären. Bei niedrigen Soletemperaturen läuft die Anlage in einem konstanten Betrieb, so dass Verluste minimiert werden. Im Herbst mit hohen Soletemperaturen läuft die Anlage nur abschnittsweise am Tag und die so möglicherweise auftretenden Verluste können sich negativ auf den Nutzungsgrad auswirken. Hinzu kommt, dass in der Übergangszeit die Warmwasserbereitung einen relativ größeren Anteil an dem Energiebedarf darstellt, wodurch die Gesamteffizienz sinkt.

5.1.4 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 [VDI10] 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 konnte aufgrund der Datenlage keine Aussage bezüglich der Gebäudeheizlast getroffen werden. Als eine alternative Lösung wurde die verrichtete Arbeit der Periode mit einem Auslastungsfaktor von 20 % versehen, so dass schließlich eine Heizlast überschlägig ermittelt werden konnte [Bur04].

In Abbildung 5-17 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 [VDI10] ermittelt wurden, lassen sich nicht eindeutig beziffern, weil die Datenqualität keine eindeutige Aussage über den Betriebsparameter der Gaswärmepumpe liefert. Hervorzuheben ist, dass die Verläufe der Ausgleichsfunktionen näherungsweise parallel verlaufen. Gründe für die quantitativen Unterschiede sind unter anderem die unterschiedlichen Systemtemperaturen und die Betriebseinflüsse die durch den Feldbetrieb gegeben sind.

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.

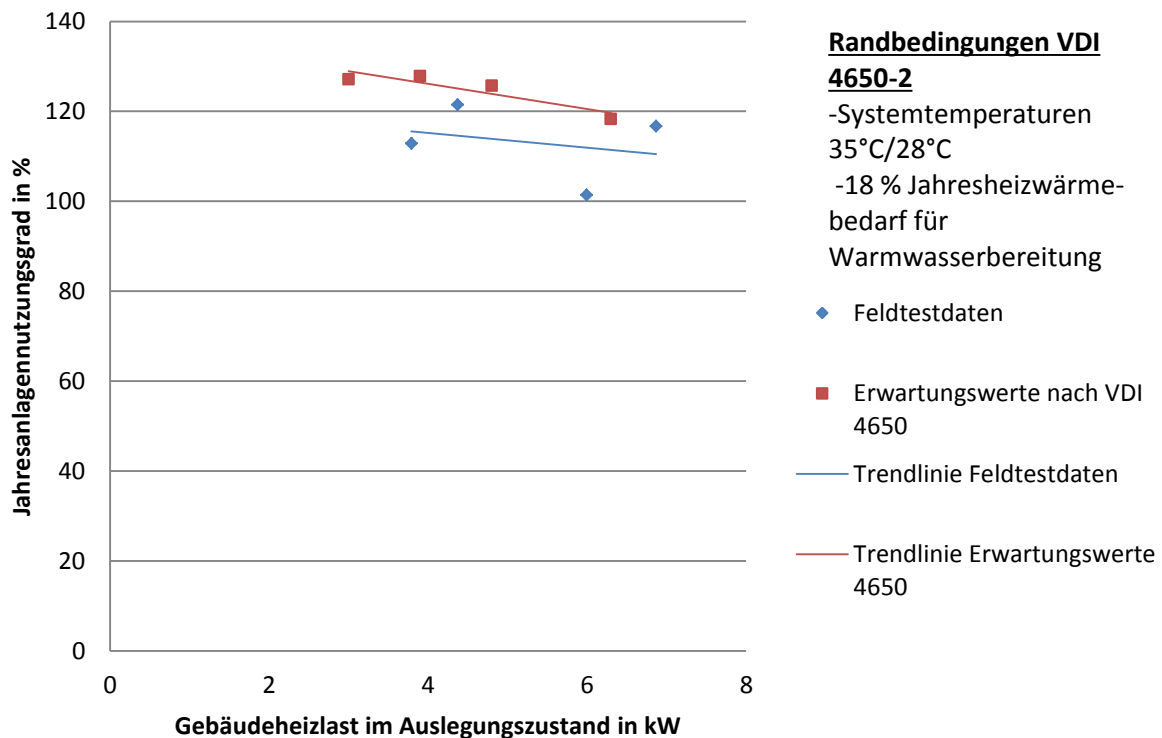


Abbildung 5-17: Gegenüberstellung der Feldtestdaten und der Erwartungswerte

5.2 Feldtestdaten der Gasabsorptionswärmepumpen der Firma Robur

Im Rahmen eines DVGW-Forschungsprojektes wurden durch die DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut (EBI) die Daten von 7 Feldtestanlagen mit Gasabsorptionswärmepumpen (Abbildung 5-18) der Firma Robur analysiert. Bis auf eine Luft/Wasser- (L/W-) Gasabsorptionswärmepumpe nutzten die übrigen Gaswärmepumpen über einen Solekreis das Erdreich als Umweltwärmequelle.

Die wesentlichen Ziele der Feldtestdatenanalyse bestanden darin, die Auslegungsbedingungen für einen optimalen Einsatz der Gasabsorptionswärmepumpen im Feld und die zweckmäßige Einstellungen für einen effizienten Anlagenbetrieb zu finden.



Abbildung 5-18: Gasabsorptionswärmepumpen der Reihe Robur GAHP Pro, links GAHP-GS/WS Pro (Sole/Wasser), rechts GAHP-A Pro (Luft/Wasser); Quelle: Robur

Die Anlagen waren an mehreren Standorten in Deutschland im Rahmen des Feldtests der Initiative Gaswärmepumpe (IGWP) installiert und mit entsprechender Feldmesstechnik versehen. Analog zu Feldtestuntersuchungen im Bereich der Elektroverdichterwärmepumpen geht es vor allem um die realen Effizienzgewinne im Feld aufgrund der Umweltwärmeeinkopplung im Vergleich zu den Labordaten und anderen Heizungstechnologien.

Der erste Untersuchungsschwerpunkt lotete aus dem Spektrum von Feldtestdaten die Einflussfaktoren für die energetische Effizienz im Feld aus. Das Spektrum von Feldtestdaten kann auf die Objektspezifika, das Nutzerverhalten, die Installations-/Betriebsvarianten, die Umweltwärmeeinkopplung und die klimatischen Verhältnisse zurückgeführt werden. Als relevante Effizienzkennzahlen wurden im Feldtest die Nutzungsgrade und Heizzahlen bestimmt.

Die Feldtestdatengewinnung erfolgte durch EON Ruhrgas in zwei Phasen mit unterschiedlicher Feldmesstechnik und die Datensätze wurden der Forschungsstelle zur Analyse zur Verfügung gestellt. Aufgrund der Datenqualität mussten die Daten aufwendig gesichtet und nachbereitet werden. Eine 100%-tige Plausibilisierung der Feldtestdaten gelang trotz des hohen Aufwands für die Datennachbereitung nicht.

Feldtestanlagen

Die 7 Feldtestanlagen sind mit einigen Eigenschaften in der folgenden Tabelle 5-5 aufgeführt. Das Nutzungsspektrum der Objekte umfasste neben zwei öffentlichen Gebäuden (Schule, Kindergarten) reine Wohngebäude und gemischt gewerblich und privat genutzte Häuser.

Tabelle 5-5: Übersichtstabelle zu den Anlagen

	GWP 10	GWP 19	GWP 24	GWP 30	GWP 101	GWP 102	GWP 103
Standort	26203 Wardenburg	12435 Berlin	74909 Meckesheim	56673 Plaidt	53332 Bornheim-Roisdorf	Nordhorn	bei Luckau
Typ	E3 GS	E3 GS HT	E3 GS HT	E3 GS HT	E3 GS HT	E3 A HT S	E3 GS
Grädigkeit	70/50, Radiatoren	45/35, Flächenheizung	70/50, FB, Luftheizregister	70/50, Radiatoren	FB 40/30	FB, Radiatoren	FB, Radiatoren
Speicher H_zg /l	300	1000	600	1500	300	Kombispeicher 1500	2 Kombispeicher a 600
Speicher WW /l	300	1000	nein	nein	300		
Zirkulation	ja	ja	nein	nein	ja	kA	testweise XI 2009
Sonden	6x99 m	39x15x2 m	4x80 m	12x100 m	3x100 m	L/W	3x100 m
Objekt	EFH / Büro	MFH, KW 40	gewerbl., Büro / Halle Neubau 2009	Schule	Kindergarten BJ 1999	Vereinsheim	EFH, Werkstatt
Nutzer	2 / 6	8 Familien	gewerbl. m. Produktion	80	45	Sportverein	privat/gewerbl.
Feldtestphase	1	1	1	1	2	2	2

Feldtestergebnisse

Im Fokus standen aufgrund der Laufzeit vor allem die Bilanzierungen von fünf Wärmepumpen, die bezüglich der zentralen Effizienzkennzahlen in Abbildung 5-19 mit den Nutzungsgraden, Heizzahlen und Warmwasseranteilen des Wärmebedarfs über den Beachtungszeitraum neben den Laborergebnissen dargestellt sind. Die Anlagen mit Warmwasserbereitung wiesen alle Zirkulationsbetrieb auf. Die Feldtestdatenauswertung in Abbildung 5-19 von 5 Robur-Gasabsorptionswärmepumpenanlagen zeigte, dass ein Teil der betrachteten Anlagen das Effizienzpotenzial der Gasabsorptionswärmepumpen gut nutzte. Einzelne Anlagen erreichten in der Heizperiode Nutzungsgrade von 140 % und etwas darunter liegende Heizzahlen, womit die Abweichungen zu den Laborergebnissen deutlich geringer ($GWP30: \Delta\eta_{th} \approx 5 \%$, $\Delta\zeta_h \approx 3 \%$) ausfielen als bei analogen Untersuchungen mit Elektroverdichterwärmepumpen. Die mittleren Nutzungsgrade und Heizzahlen sind relative Kennzahlen, in Abbildung 5-20 wurden diese Kennzahlen gegen die monatlich abgegebenen Wärmemengen aufgetragen und die meisten Anlagen wiesen hohe Nutzungsgrade über weite Wärmeabgabebereiche auf. Eine ausgeprägte Lastflexibilität bei hohen Effizienzkennzahlen zeigt die Abbildung 5-20 für die Anlagen GWP24 und GWP30 ab einer Wärmeabgabe von ca. 2.000 kWh/Monat.

Auf Basis der Auswertung aller Daten und Informationen lagen die Ursachen für die weniger effizienten Anlagen großteils nicht bei den Gasabsorptionswärmepumpen, dem Objekt oder Nutzungsprofil selbst. Maßgeblich waren zu hohe Temperaturvorgaben, Schwächen bei der regelungstechnischen Einbindung in das Heizungssystem für die Effizienzdefizite. Weitere Optimierungspotenziale bezüglich der Verfügbarkeit, Abwärme, Geräuschpegel und dem Service wurden herstellerseitig adressiert und teilweise bereits umgesetzt.

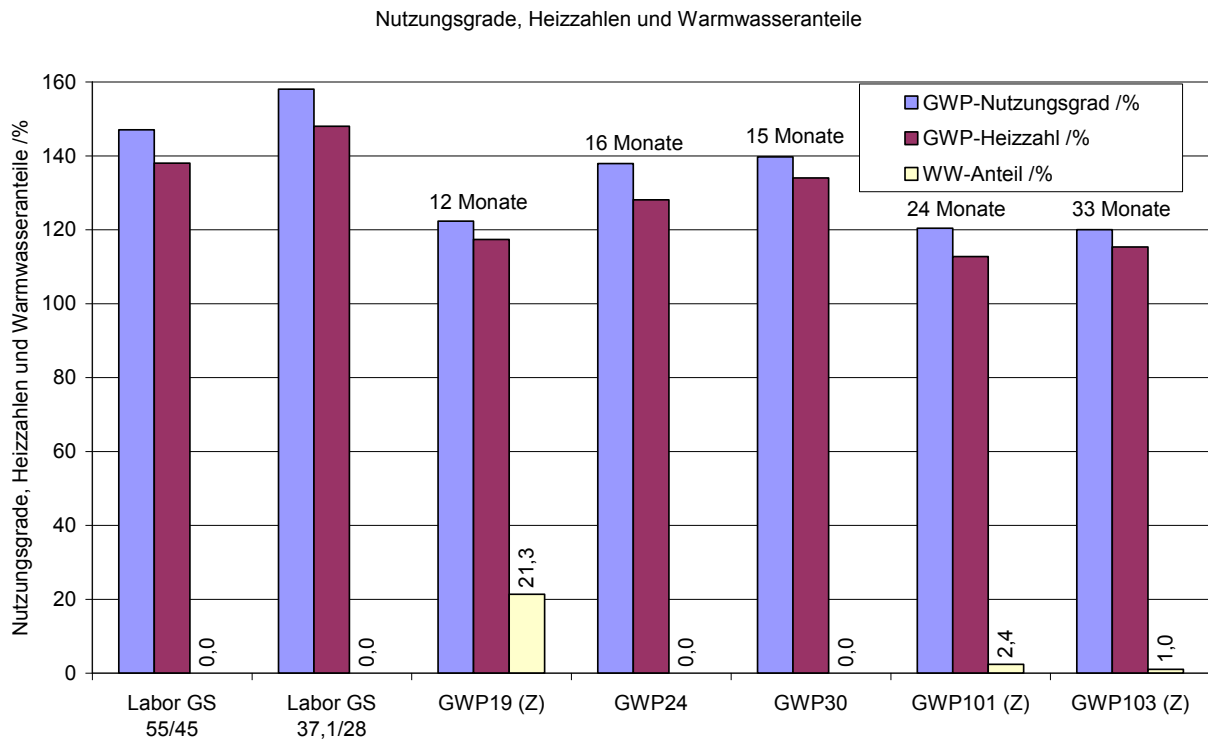


Abbildung 5-19: Nutzungsgrade, Heizzahlen und Warmwasseranteile am Wärmebedarf über den jeweiligen Beobachtungszeitraum in Monaten, Anlagen mit Zirkulation sind mit einem (Z) gekennzeichnet

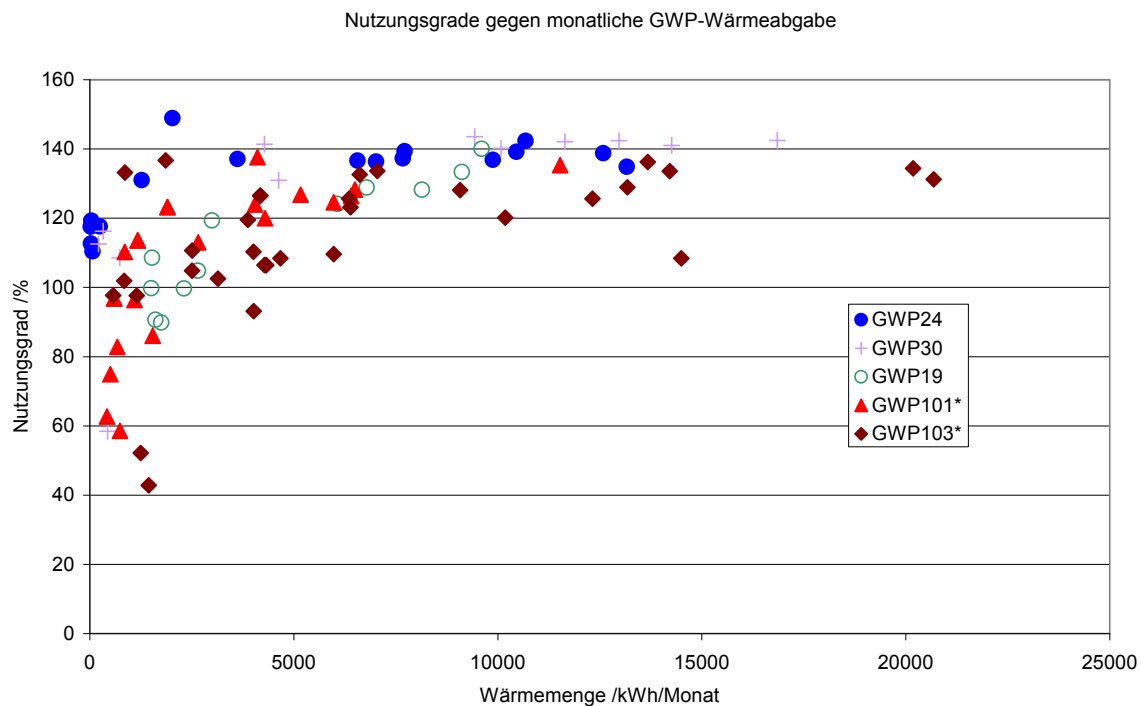


Abbildung 5-20: Nutzungsgrade als Funktion der monatlichen Wärmeabgabe, * kennzeichnet Anlagen mit teilweise interpolierten Monatswerten

Die Feldtestdatenanalyse zeigte, dass hohe Nutzungsgrade und Heizzahlen auch bei relativ hochgrädigen Heiznetzen und der Warmwasserbereitung möglich waren. Ein monovalentes Gaswärmepumpensystem zur Heizwärme- und Warmwasserversorgung war speziell bei Sole/Wasser-Systemen effizient möglich, vielfach wurden die Zusatzheizgeräte vor allem aus Verfügbarkeitsgründen installiert. Die Auftragung der Effizienzkennzahlen gegen Wärmeabgaben verdeutlichte, dass hohe Effizienzkennzahlen über relativ große Wärmeabgabeintervalle bereits ab monatlichen Wärmeabgaben von 2.000 kWh/Monat möglich waren. Eine moderate Überdimensionierung des Systems bzw. auch der jahrestypische Wärmelastgang beeinflussten die Gesamteffizienz marginal. Eine regelungstechnisch dem Stand der Technik entsprechende Einbindung in die Wärmespeichernutzung und in das Heizungssystem sowie energetisch sinnvolle Temperatureinstellungen waren die notwendigen Voraussetzungen dafür. Die Hersteller müssen sich diesbezüglich mehr als System- statt als Gerätelieferant verstehen und einen entsprechenden Service anbieten.

6 Detailbetrachtung unterschiedlicher Wärmequellen

Jede Wärmepumpenanlage benötigt eine Umweltwärmequelle, aus der die zusätzliche Energie eingekoppelt wird. Je nach Umfeld kann die Wahl der Quelle von vorne herein eingeschränkt sein. Die allgemein üblichen Wärmequellen sind zurzeit Grundwasser, Erdreich und Luft. Solarenergie als Quelle ist eine weitere Alternative und wird auch schon von Herstellern angeboten.

Eine im häuslichen Bereich selten genutzte Möglichkeit ist die Abwärmenutzung. Es ist zum Beispiel möglich, wärmere Abwässer als Wärmequelle zu nutzen. Dieses Prinzip wird momentan üblicherweise in größeren Industriebetrieben, in denen durch Prozesse Abwärme anfällt, genutzt. Für den Einsatz in Ein- und Mehrfamilienhäusern ist die Möglichkeit der Abluftnutzung als realistischer zu beschreiben.

Weiterhin gibt es noch unterschiedlichste Konzepte, um Umweltwärme bereitzustellen und zu nutzen, dazu gehört beispielsweise der Eisspeicher. Auf dem hier betrachteten Sektor der Gebäudebeheizung stellt dieses Prinzip jedoch eine Ausnahme dar und wird daher nicht berücksichtigt. Auf die üblichen Umweltwärmequellen wird im Folgenden weiter eingegangen.

6.1 Grundwasser

Eine Grundwassernutzung als Umweltwärmequelle ist die effektivste Art. Die Grundwassertemperatur schwankt über das ganze Jahr nur um wenige Kelvin und liegt im Bereich zwischen 6–12 °C. Um eine Grundwassertemperatur von 7–10 °C gewährleisten zu können, muss eine Brunntiefe von 8–10 m erreicht werden. Mit dieser Art der Umweltwärmequellen können die höchsten Nutzungsgrade erreicht werden. Bei dem Verfahren wird über einen Förderbrunnen Wasser bis an die Oberfläche gepumpt, dort erwärmt das Grundwasser das als Wärmeträgermedium dienende Wasser (Siehe auch Abbildung 6-1). Über einen Schluckbrunnen wird das Wasser wieder in die Grundwasser führenden Schichten zurückgeführt. Bei einer Nutzung des Grundwassers als Wärmequelle muss grundsätzlich



Abbildung 6-1: Wärmepumpe mit Grundwassernutzung [HeVi12]

eine Probebohrung durchgeführt werden, um die Eignung sicherzustellen. Dabei ist die Ergiebigkeit der Wasserschicht durch Pumpversuche zu prüfen und sollte mindestens 250 l/h pro kW (siehe auch VDI 4640-2) installierter Verdampferleistung betragen. Außerdem ist eine Analyse des Brunnenwassers zu empfehlen und die Herstellerempfehlungen bezüglich der Wasserqualität zu beachten.

Der Abstand zwischen den zu bohrenden Saug- und Schluckbrunnen beträgt dabei mindestens 15 m. Der Schluckbrunnen sollte außerdem in Fließrichtung des Grundwasserstroms hinter dem Saugbrunnen platziert werden. Bei der Rückspeisung ist darauf zu achten, dass die Temperaturdifferenz zwischen Saug- und Schluckbrunnen nicht mehr als 6 K beträgt.

Um Korrosionsschäden zu vermeiden, ist der Einsatz von korrosionsbeständigen Materialien notwendig, weiterhin sollte auch bei der ausschließlichen Verwendung von korrosionsfesten Materialien die Konzentration von Eisen und Mangan überprüft werden, da sonst eine Verockerung der Wärmequellenanlage möglich ist.

6.2 Geothermische Energie

Als geothermische Energie (Erdwärme) wird die unterhalb der Erdoberfläche in Form von Wärme gespeicherte Energie bezeichnet. Bis zu einer Tiefe von ca. 400 m spricht man von oberflächennaher Geothermie. Insbesondere bis zu einer Tiefe von 100 m setzt sich diese gespeicherte Energie aus der gespeicherter Sonnenenergie und Energie aus dem Erdinneren zusammen. Die jahreszeitlichen Temperaturunterschiede haben bis zu einer Tiefe von ca. 10 m Einfluss auf den Temperaturverlauf der oberen Erdbodenschicht. Ab ca. 15 m Tiefe ist die Temperatur des Erdbodens nahezu konstant und nimmt mit ca. 3 °C pro 100 m Tiefe kontinuierlich zu (Abbildung 6-2) [BINE], [GeoBay]. Bei der Nutzung der Erdwärme wird das Temperaturniveau des Untergrundes (durchschnittlich 8 - 12 °C) mit Hilfe einer Wärmepumpe auf das Niveau des Heizungssystems angehoben.

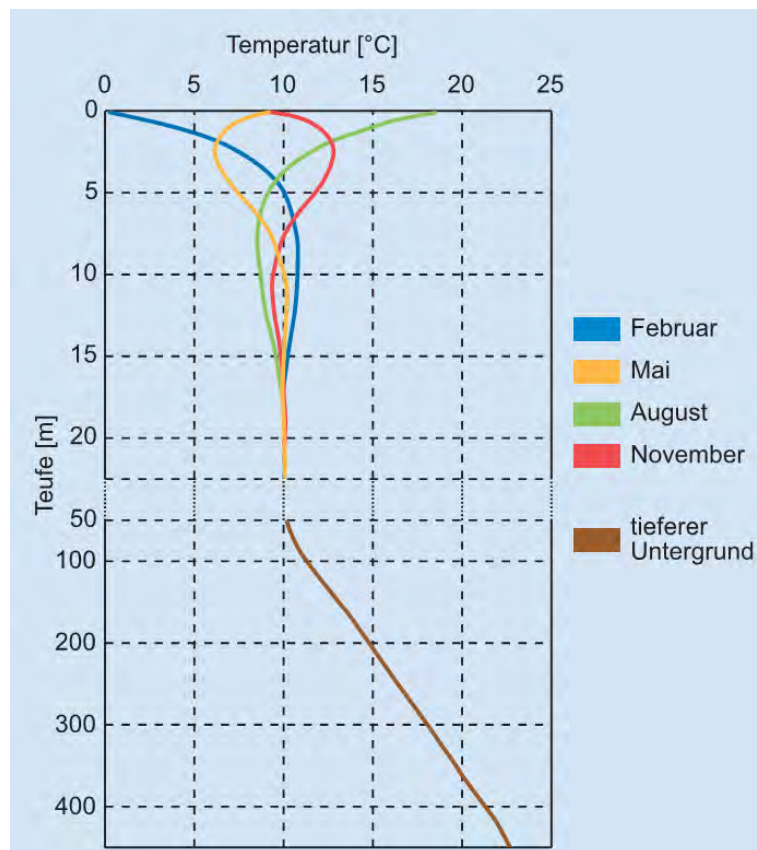


Abbildung 6-2: Jahreszeitlicher Einfluss auf die Temperatur der obersten Erdschichten [ETI]

Prinzipiell kommen zur Nutzung der geothermischen Energie, in Abhängigkeit von den örtlichen Untergrundverhältnissen, der hydrogeologischen Situation und dem oberirdischen Platzangebot, offene Systeme (Grundwasserbrunnen) und geschlossene Systeme (Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden) zum Einsatz. Um eine hohe Wirtschaftlichkeit erreichen zu können, ist ein möglichst hohes Temperaturniveau, eine ausreichende Regenerationsfähigkeit und eine möglichst ganzjährige Verfügbarkeit der geothermischen Wärmequelle wichtig. Außerdem sollten die Erschließung möglichst kostengünstig und der Betrieb mit geringem Wartungsaufwand verbunden sein [GeoBay], [LeitEW].

Um das Erdreich als Wärmequelle nutzen zu können, müssen Wärmeübertragerrohre ins Erdreich eingebracht werden, die mit Hilfe einer Wärmeträgerflüssigkeit die Umweltwärme in den Verdampfer der Wärmepumpe transportieren.

Die zwei häufigsten Systeme sind Erdwärmekollektoren und Erdwärmesonden. Für beide Systeme kann eine wasser- oder bergrechtliche Genehmigung erforderlich sein.

Durch das Wasserhaushaltsgesetz werden verschiedene Wasserschutzzonen definiert. Wasserschutzzone I ist der Fassungskbereich für Trinkwassergewinnung und es ist untersagt, diese anderweitig zu nutzen. Eine Errichtung von Erdkollektoren/-sonden ist hier nicht möglich. Darüber hinaus gibt es die Schutzzonen II und III. Wird innerhalb dieser Zonen eine Wärmepumpenanlage errichtet, die das Erdreich als Wärmequelle nutzen will, so ist eine Genehmigung für den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen nötig. Die üblicherweise verwendete Sole in Erdkollektoren/-sonden Polyethylenglykol hat eine Wassergefährdungsklasse von 1 und gilt damit als schwach wassergefährdend. Stark wassergefährdend sind z. B. Benzin und Altöl.

6.2.1 Erdkollektoren

Bei einer Nutzung des Erdreiches mit Erdwärmekollektoren wird der Kollektor meist mäandrierförmig in 1–2 m Tiefe unter der Erdoberfläche verlegt (Abbildung 6-3). In zwei Meter Tiefe liegt die minimale Temperatur bei 5°C, mit zunehmender Tiefe



Abbildung 6-3: Wärmepumpe mit Erd-Flachkollektoren [HeVi12a]

steigt die Temperatur an, allerdings nimmt auch der Wärmezufuss von der Oberfläche ab. Damit ist es nicht mehr gewährleistet, dass die kalte Region um die Kollektorrohre herum im Frühjahr aufgewärmt wird. Der übliche Abstand zwischen den einzelnen Rohren beträgt zwischen 0,3 m und 0,8 m, zu wasserführenden Leitungen sollte ein Mindestabstand von mindestens 0,7 m eingehalten werden. Der Boden wird durch den konstanten Wärmeentzug während der Heizperiode immer weiter abgekühlt, so dass nach einiger Zeit der Wirkungsgrad sinken kann. Hinzu kommt, dass eine ausreichende Regeneration beachtet werden muss, da

ansonsten der Boden einfrieren kann und die Wärmeleitfähigkeit dauerhaft gesenkt wird. Dies geschieht entweder im Frühjahr/Sommer auf

natürlichem Wege durch Sonneneinstrahlung oder bei manchen Anlagenkonzepten wird mit Hilfe eines Solarkollektors auf dem Dach während Schönwetterperioden Wärme in den Boden eingebracht.

Ein Erdkollektor benötigt ausreichend Platz, der nicht überbaut ist, um die schon vorher erwähnte Regeneration zu gewährleisten. Ebenso darf die Fläche nicht versiegelt werden, da neben der Sonneneinstrahlung Niederschlag ein wichtiger Regenerationsfaktor ist. Je größer die zu erwartende Entzugsleistung ist, desto

größer muss der Verlegeabstand gewählt werden, was zu einem erhöhten Flächenbedarf führt. Bei einer nicht korrekten Auslegung kann der Erdkollektor der Erde zu viel Wärme pro Kubikmeter entziehen und das Erdreich kann als Folge einfrieren. Darum sollte die Auslegung sorgfältig durchgeführt werden. Explizit muss die Warmwasserbereitung dabei berücksichtigt werden. Die Energie, die während der Wintermonate für Heizzwecke entzogen wird, wird idealerweise während der Sommermonate wieder zugeführt. Warmwasserbereitung ist ganzjährig erforderlich, so dass auch während der Regenerationsphase im Sommer dem Boden Energie entzogen wird.

Abhängig von der Bodenbeschaffenheit kann eine Entzugsleistung von 10–40 W/m² erwartet werden. Bei trockenem Sandböden oder Kiesgehalt werden kleinere Entzugsleistungen erwartet, während wasserhaltiger Sandboden oder Ton/Schluff-Boden eine gute Entzugsleistung aufweisen. Trockene Böden erwärmen sich schneller als feuchte Böden. Jedoch können feuchte Böden die Wärme besser speichern und kühlen entsprechend langsamer aus.

Im Allgemeinen wird die Eignung von Böden für oberflächennahe Geothermie durch eine Abschätzung nach den in der VDI 4640 angegebenen Tabellenwerten durchgeführt (Siehe Abbildung 6-4).

Untergrund	spezifische Entzugsleistung	
	bei 1800 h	bei 2400 h
Trockener, nichtbindiger Boden	10 W/m ²	8 W/m ²
Bindiger Boden, feucht	20–30 W/m ²	16–24 W/m ²
Wassergesättigter Sand/Kies	40 W/m ²	32 W/m ²

Abbildung 6-4: Mögliche Entzugsleistungen für Erdwärmekollektoren für 1800 bis 2400 Jahresbetriebsstunden [VDI01]

Bei längeren Laufzeiten ist neben der spezifischen Entzugsleistung auch die spezifische jährliche Entzugsarbeit zu berücksichtigen, die den langfristigen Einfluss bestimmt. Für Erdwärmekollektoren kann sie in kWh/(m²*a) angegeben werden und sollte bis zu 50–70 kWh/(m²*a) liegen. Dieser Richtwert gilt für den reinen Heizbetrieb, bei einer Wärmeeinleitung im Sommer wird die Regenerationsfähigkeit verbessert und es kann von diesem Wert abgewichen werden.

Zwischen Rücklauf und Vorlauf des Kollektors sollte im Dauerbetrieb (Wochenmittel) ein ΔT von 5 K nicht überschritten werden.

6.2.2 Numerische Simulation von Erdkollektoren

Um die Nutzung des Erdreiches als Wärmequelle weiter zu untersuchen, wurden mit dem Simulationsprogramm FLUENT zwei verschiedene Kollektorgeometrien und Variationen unterschiedler Parameter untersucht. Die Parameter wurden für jede Kollektorgeometrie variiert und die Ergebnisse verglichen. Abschließend wurden die Kollektorgeometrien mit verschiedenen Parametergrößen miteinander verglichen.

Wichtig für die Kollektorleistung ist die Wärmeleitfähigkeit des Bodens. Sie bestimmt, wie viel Wärme aus dem umgebenden Erdreich nachströmt. Sollte sie zu niedrig sein, dann entzieht der Kollektor Wärme nur aus einem kleinen Volumen und die Bodentemperatur sinkt ab und der Boden gefriert, was zu unerwünschten Erdverwerfungen führen kann.

Für den Wärmetransport ebenfalls entscheidend ist die Wärmeleitfähigkeit des Kollektorrohres, ist sie zu niedrig, bildet das Rohrmaterial eine Barriere gegenüber der Bodenwärme und über den Kollektor nicht alle zur Verfügung stehende Wärme genutzt werden kann.

Es wurde die Auswirkung von verschiedenen Rohrdurchmessern untersucht. Bei einer gleichzeitigen Erhöhung des Rohrdurchmessers wurde die Solegeschwindigkeit konstant gehalten, was zu einer Erhöhung des Volumenstroms um gut 25 % führt. Der Haupteffekt ist allerdings die Vergrößerung der Außenoberfläche. Für eine Wärmeübertragung steht eine größere Fläche zur Verfügung und das wirkt sich positiv auf den Wärmeübergang aus.

Die Erhöhung des Solevolumenstroms bei gleichbleibendem Rohrdurchmesser wurde ebenfalls untersucht. Durch eine größere Masse wird die Kollektorleistung erhöht.

Bei einer Einbringung eines Kollektors in den Boden kann es zu Lufteinschlüssen um die Kollektorrohre kommen. Dadurch wird der Wärmeübergang verschlechtert, da die Luft wie eine Dämmung wirkt. Dies wurde ebenfalls simuliert.

6.2.2.1 Allgemeine Informationen zum Simulationsprogramm

Bei den theoretischen Untersuchungen wurden Erdkollektoren mit einem Simulationsprogramm simuliert. Das CFD (Computational Fluid Dynamics) Programmsystem FLUENT arbeitet auf der Grundlage der Finite-Volumen-Methode. Es besteht aus mehreren Programmen, die unter anderem der Gittergenerierung dienen, sowie Datenbanken für Stoffwerte zur Bestimmung des Speziestransports mit und ohne Verbrennung enthalten.

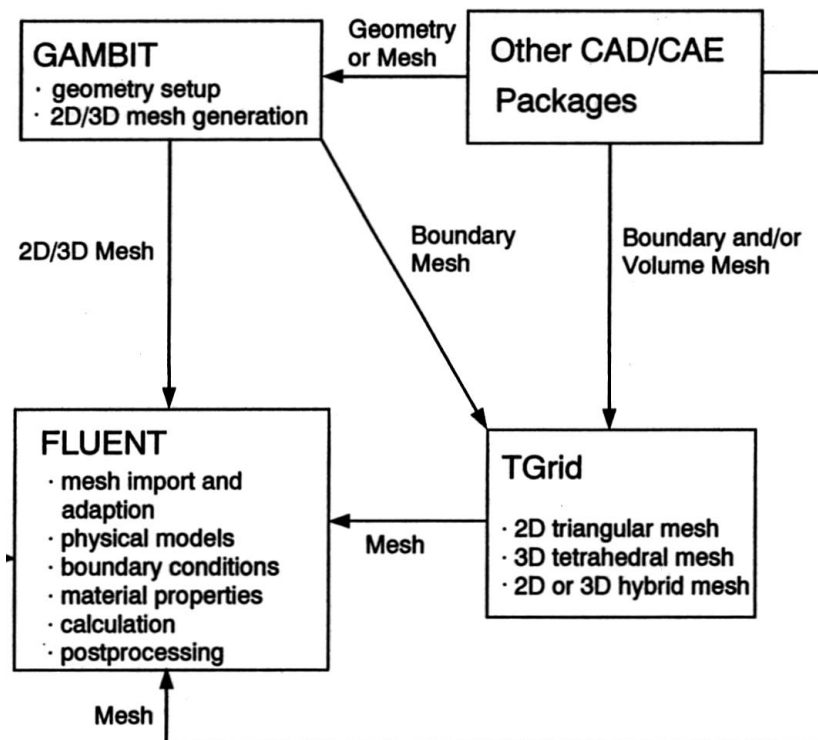


Abbildung 6-5: Fluent Programmstruktur

In Abbildung 6-5 ist die Programmstruktur von FLUENT dargestellt. Zur Lösung der Wärmeübertragungs- und Strömungsprobleme können strukturierte und unstrukturierte Gitter sowohl für den zwei- als auch für den dreidimensionalen Fall generiert werden.

Die Basis der mathematischen Modellierung der Strömungsverhältnisse und Wärmeverteilung in FLUENT sind die zeitabhängigen Differentialgleichungen für die Bilanzen der Massen-, Stoff-, Impuls- und Enthalpieströme. Dieses Gleichungssystem wird in den einzelnen Zellen des diskretisierten Berechnungsraumes iterativ mit Hilfe numerischer Methoden gelöst. Abbildung 6-6: Vorgehensweise bei der mathematischen Modellierung mit FLUENT stellt schematisch die Vorgehensweise bei der mathematischen Modellierung in FLUENT dar.

In den folgenden Kapiteln werden die in FLUENT zur Auswahl stehenden mathematischen Modelle näher erläutert, mit denen die zwei Hauptvorgänge Strömung und Wärmeübertragung beschrieben werden. Die mathematischen und

numerischen Grundlagen sollen hier nicht besprochen werden, da sie in der Literatur eingehend beschrieben werden [Pa80] [No93] [LaSpa74] [Ha01] [LaSpa72]

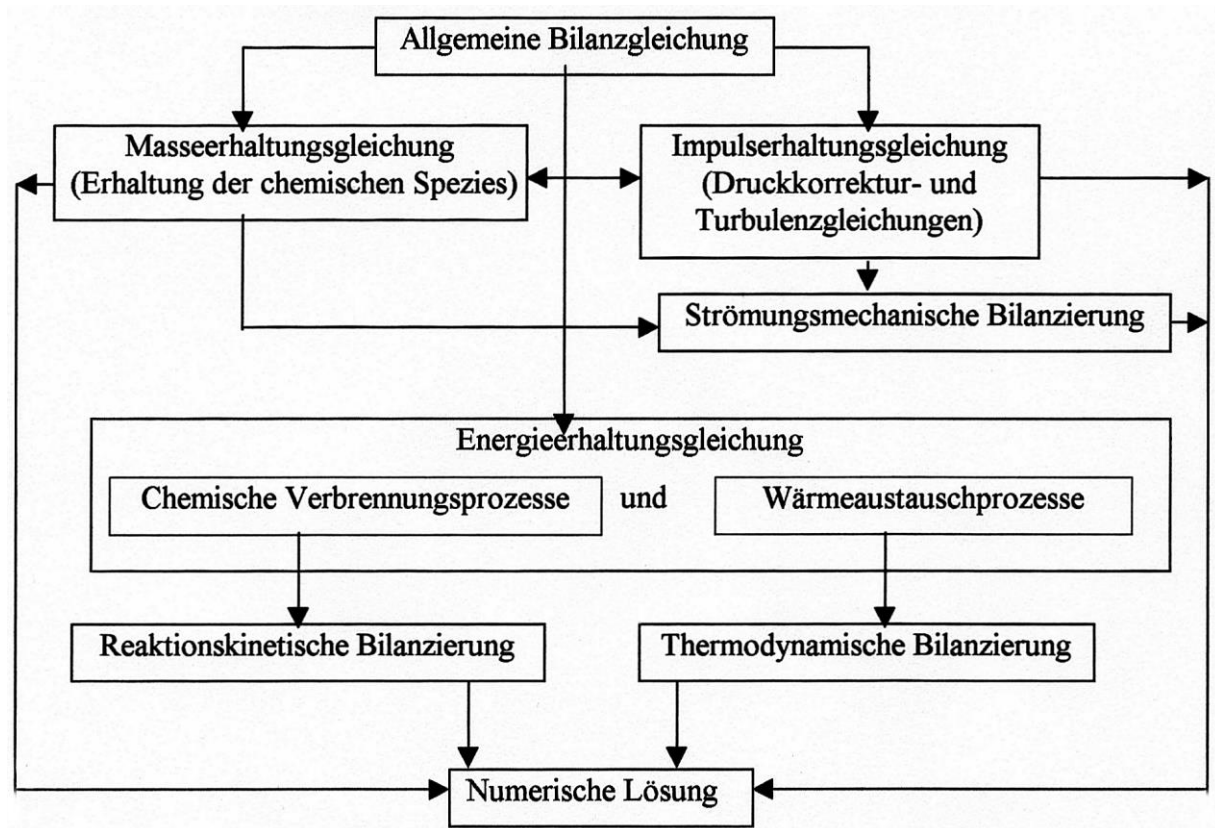


Abbildung 6-6: Vorgehensweise bei der mathematischen Modellierung mit FLUENT [Ha01]

6.2.2.2 Beschreibung der Strömung in Flächenkollektoren

Bei den betrachteten Flächenkollektoren liegen aufgrund der unterschiedlichen Volumenströme und den damit verbundenen unterschiedlichen Reynolds-Zahlen in den Kollektorrohren entweder laminare oder turbulente Strömungen vor. Es ist bekannt, dass bei einer turbulenten Strömung in einem Kollektorrohr bei gleichem Rohrdurchmesser aufgrund des besseren Wärmeübergangs eine höhere Entzugsleistung aus dem Erdreich zu erreichen ist, als im laminaren Fall. Bei der Simulationen wird angenommen, dass es sich bei den betrachteten dreidimensionalen Strömungen um stationäre Strömungen handelt und diese

aufgrund der Temperaturänderungen in Strömungsrichtung und über den Querschnitt verteilt temperaturabhängige Stoffwerte besitzen.

Bei der Erstellung des mathematischen Modells mit FLUENT muss, je nach Reynolds-Zahl, ein Modell für laminare oder turbulente Strömungen ausgewählt werden. Die Simulationsrechnungen werden mit der Auswahl des mathematischen Modells für die jeweilige Strömungsform durchgeführt. Bei der Berechnungen mit niedrigen Geschwindigkeiten im Rohr (z. B. $c = 0,19 \text{ m/s}$) wird die laminare Beschreibung der Strömung verwendet. Bei den Berechnungen mit den höheren Geschwindigkeiten wird die turbulente Strömung im Rohr mit einem dafür geeigneten Turbulenzmodell simuliert. Die turbulente Strömung und die dafür geeigneten Turbulenzmodelle werden nachfolgend kurz erläutert.

6.2.2.3 Wärmeübertragungsvorgänge

Zur Berechnung der Wärmeübertragung wird in FLUENT eine Energiegleichung eingeführt, in der Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung berücksichtigt werden [Flu13]. Damit können Wärmeübertragungsprobleme sowohl in einem Fluid als auch in Festkörpern abgebildet werden. Die Wärmeübertragung zwischen dem Boden und der Sole erfolgt durch Leitung und Konvektion. Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus spielt Strahlungswärmetransport bei dieser Anwendung keine Rolle.

Um den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials auf die Kollektorleistung zu bestimmen, werden verschiedene Werte zur Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials für die zwei Geometrien (Siehe Abbildung 6-7 und Abbildung 6-14) untersucht.

Der Vergleich der Simulationsrechnungen zeigt, dass die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials bis zu $1,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ zu einer starken Steigerung der Kollektorleistung führt. Bei größeren Wärmeleitfähigkeiten verläuft die Kurve dann flacher.

Es wurden die weiter oben erwähnten Parameter variiert, um eine optimale Konfiguration von Erdwärmekollektoren zu ermitteln. Es wurden zwei verschiedene Geometrien betrachtet (Siehe Abbildung 6-7 und Abbildung 6-14). Dabei wurde die Bodenart bzw. die Wärmeleitfähigkeit geändert. Diese ist in der Praxis zwar fest vorgegeben, aber durch die Variation soll es möglich sein, im Vorfeld Aussagen über die Eignung der Wärmequelle zu treffen. Des Weiteren wurde der Volumenstrom der Sole verändert, dieser ist auch meist durch die Anlage vorgegeben, allerdings ist hier eine Änderung durch den Installateur meist im Rahmen des Möglichen. Entscheidung für die Effizienz der Kollektoren ist das verwendete Rohrmaterial, da hier der

Übergang der Wärme von Boden zu Sole und damit zum Wärmepumpenprozess stattfindet.

Bei dem neuen Raketenverlegeverfahren wird ein Tunnel für die Rohre durch das Erdreich geschossen, dabei kann es dazu kommen, dass um das Kollektorrohr luftgefüllte Hohlräume zurückbleiben. Dieses wurde ebenfalls versucht mit Hilfe eines Simulationsmodells abzubilden, in dem über eine bestimmte Länge des Rohres die Wärmeleitfähigkeit von Luft anstelle der Wärmeleitfähigkeit des Bodens angenommen wurde.

Die Simulationsergebnisse wurden mit Hilfe der am institutseigenem Versuchshaus gewonnenen Messergebnisse validiert.

6.2.2.4 Randbedingungen, Stoff- und Materialkennwerte

Um unterschiedliche Auswirkungen verschiedener Parameter zu untersuchen, wurden verschiedene numerische Simulationen durchgeführt und mit Hilfe der am Gas- und Wärme-Institut installierten Versuchsanlagen validiert. Die angenommenen Randbedingungen für Sole, Luft, Boden und Kollektorrohr sind in Tabelle 6-1: Stoffwerte für die Sole bis Tabelle 6-3: Stoffwerte Boden angegeben.

Tabelle 6-1: Stoffwerte für die Sole

Sole	Tyfocor LS
Chemischer Aufbau	1,2-Propylenglykol, Wasser und Inhibitoren
Dichte bei 0°C	1045 kg/m ³
Spez. Wärmekapazität bei 0°C	3520 J/kg*K
Wärmeleitfähigkeit bei 0°C	0,398 W/(m*K)
Dynamische Viskosität bei 0°C	1,568*10 ⁻² kg/m*s
Wassergehalt	55-58 %
Kälteschutz	Bis -28°C

Tabelle 6-2: Stoffwerte für Luft

Luft	
Umgebungstemperatur	25°C
Umgebungsdruck	1013,25 mbar
Dichte	1,1762 kg/m ³
spez. Wärmekapazität	1015 J/kg*K
Wärmeleitfähigkeit	0,0259 W/(m*K)
dynamische Viskosität	1,826*10 ⁻⁵ kg/m*s

Tabelle 6-3: Stoffwerte Boden

Boden	
Dichte	1834 kg/m ³
Spez. Wärmekapazität	950 J/kg*K
Wärmeleitfähigkeit	0,5/1,5/2,2/2,7/4,5 W/mK

Tabelle 6-4: Materialeigenschaften der Kollektorrohre

Rohrinnendurchmesser	20,4 mm/26,2 mm
Rohrdicke	2,3 mm/2,9 mm
Rohrlänge	80 m
Dichte	963 kg/m ³
Spez. Wärmekapazität	2500 J/kg*K
Wärmeleitfähigkeit	0,42 W/(m*K)
Rohrrauigkeit	0,007 mm

6.2.2.5 Simulationsergebnisse der Kollektor-Geometrie 1

In Abbildung 6-7 ist die Geometrie von Kollektor 1 dargestellt. Der Kollektor besteht aus einem vierfach verlegten Rohr mit einer Gesamtlänge von 80 m und wurde konventionell mit einer Grabung eingebracht. Die Maße wurden von den am GWI

verbauten Kollektoren übernommen. Der Innendurchmesser des Rohres beträgt 20,4 mm und die Wandstärke beläuft sich auf 2,3 mm. Soweit nicht anders angegeben beträgt die Wärmeleitfähigkeit des Rohres wie oben angeführt $0,42 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

Für alle betrachteten Geometrien wird ein einheitliches Bodenvolumen angenommen.

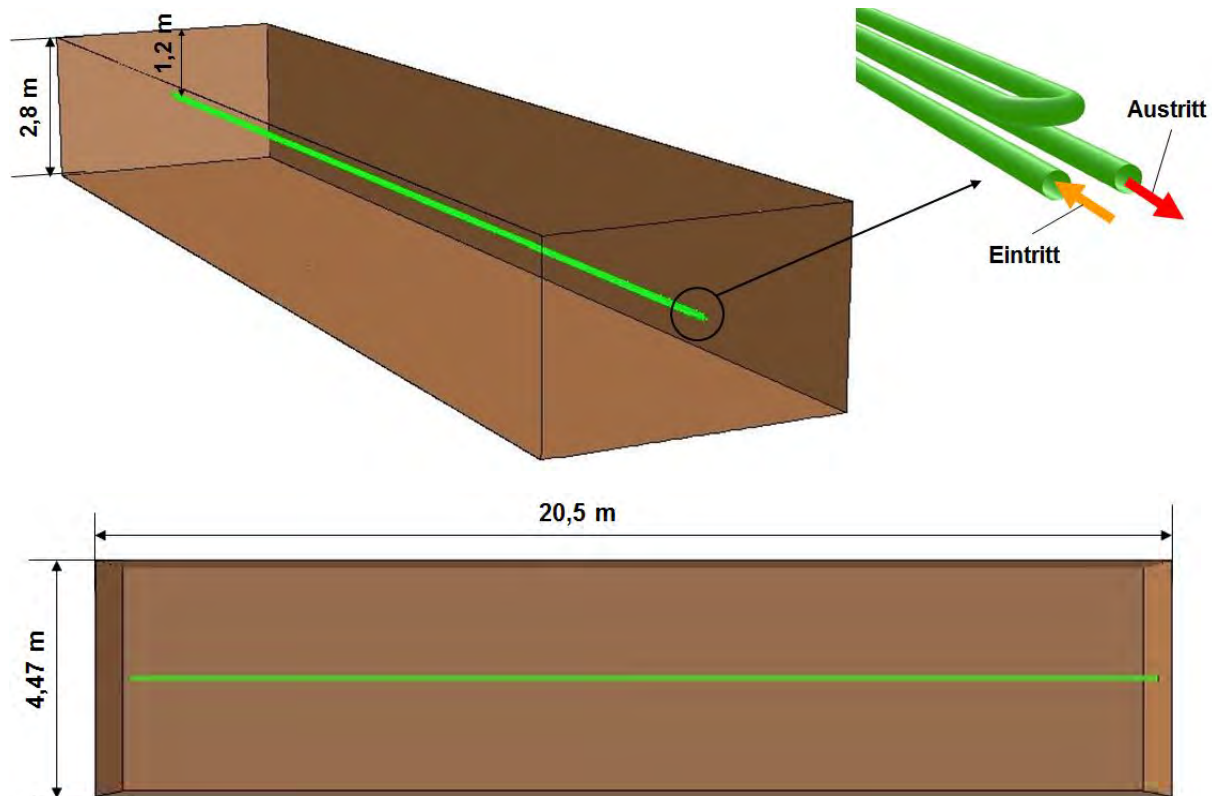


Abbildung 6-7: Geometrie von Kollektor 1

Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Bei der Simulation der Variation der Wärmeleitfähigkeit des Bodens wurden die Randbedingungen Volumenstrom der Sole, Bodentemperatur und Soleeintrittstemperatur konstant gehalten. Die Werte sind aus der Abbildung 6-8 zu entnehmen. Für die Wärmeleitfähigkeit wurden Werte für verschiedene Böden aus der VDI 4640 angenommen. Die angegebene prozentuale Steigerung bezieht sich auf den jeweils nachfolgenden Wert. Wie in der Abbildung dargestellt, ist bei einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der größte Unterschied zwischen den beiden niedrigsten Stufen $0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $1,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ zu erkennen. Daraus wird deutlich, dass bei der Planung eines Erdkollektors auf eine Mindestwärmeleitfähigkeit zu achten ist. Eine Erhöhung von $0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ auf $4,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ergibt eine Steigerung der Kollektorleistung um 90 %, allerdings sind mit 55 % Steigerung der Großteil auf den Sprung von $0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ auf $1,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ zurückzuführen. Der Anstieg zwischen

den höheren Werten ist noch signifikant, allerdings kann davon ausgegangen werden, dass ab einem bestimmten Mindestwert der Erdkollektor ohne weiteres für die Nutzung durch eine Wärmepumpe verwandt werden kann.

Neben der Kollektorleistung wurde auch die Soleaustrittstemperatur betrachtet. Der Verlauf ähnelt dem Verlauf der Kollektorleistung. Durch die Anhebung der Wärmeleitfähigkeit von 0,5 W/(m·K) auf 1,5 W/(m·K) geschieht der relativ größte Temperaturanstieg.

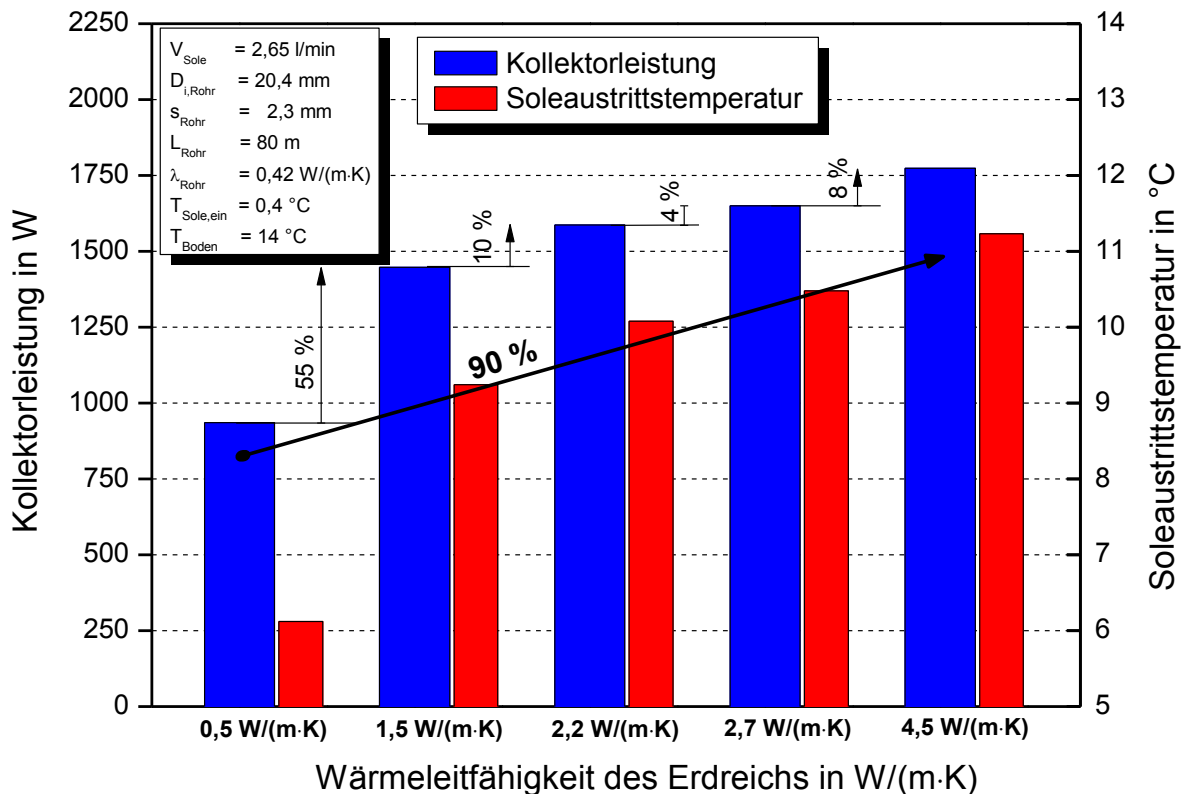


Abbildung 6-8: Wärmeleitfähigkeit und Soleaustrittstemperatur bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten (Kollektor 1)

Einfluss des Volumenstroms der Sole

In dem zweiten Simulationsabschnitt wurde der Einfluss des Volumenstroms auf die Kollektorleistung untersucht. Dabei wurde der in der ursprünglichen Simulation angenommene Volumenstrom der Sole jeweils vervielfacht, so dass Simulationsergebnisse über die Brandbreite vom einfachen Volumenstrom bis hin zum sechsfachen Volumenstrom vorlagen. Die konstant gehaltenen Randbedingungen sind aus der Abbildung 6-9 zu entnehmen.

Ähnlich wie bei der Variation der Wärmeleitfähigkeit ist ein größerer Anstieg im unteren Bereich der Volumenstrombandbreite zu erkennen. Auffällig ist das ab einem bestimmten Volumenstrom kaum noch eine Verbesserung der Kollektorleistung zu

erreichen ist. Darum ist, auch auf Grund des steigenden Druckverlustes, eine pauschale Erhöhung des Volumenstroms nicht ratsam.

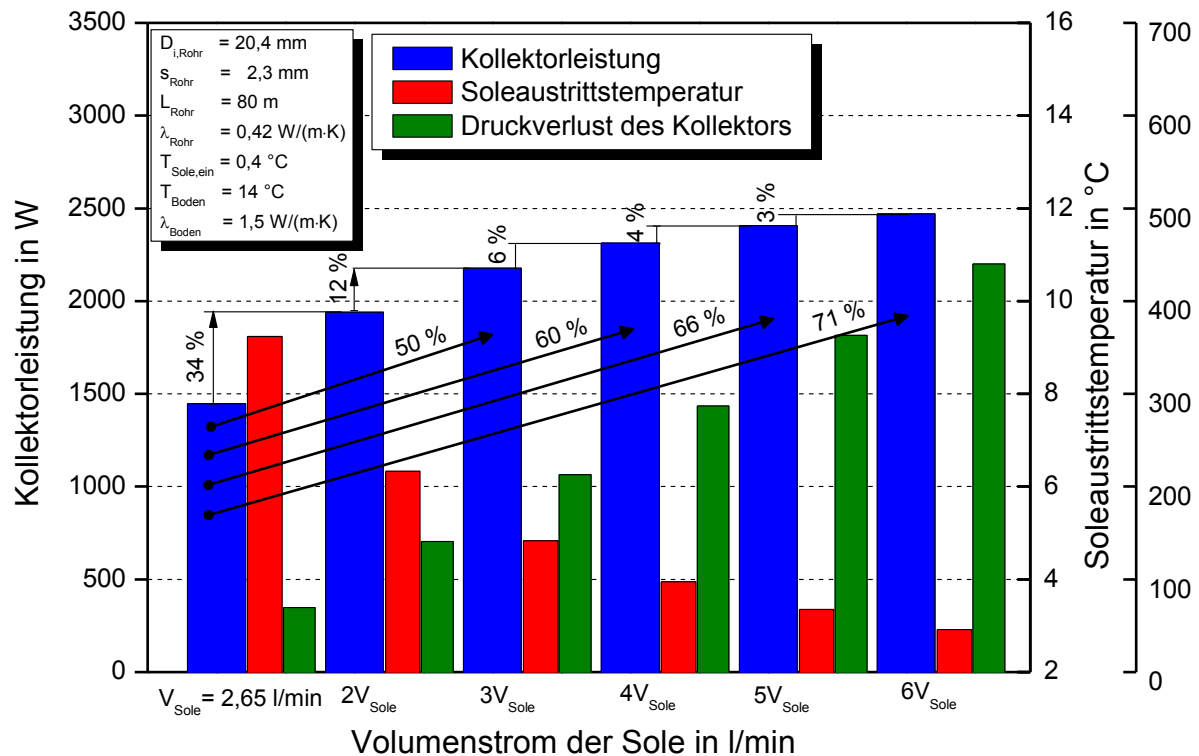


Abbildung 6-9: Kollektorleistung, Soleaustrittstemperatur und Druckverlust bei verschiedenen Volumenströmen (Kollektor 1)

Einfluss des Rohrdurchmessers des Kollektors

Im dritten Schritt wurde der Rohrdurchmesser des Kollektors variiert, der ursprüngliche Rohraußendurchmesser von 25 mm wurde mit einem Außendurchmesser von 32 mm verglichen. Dabei wurden die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, die Wärmeleitfähigkeit des Rohres ($0,42 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) und die Solegeschwindigkeit konstant gehalten. Aufgrund der konstanten Geschwindigkeit in beiden Rohrvarianten ist der Volumenstrom im Rohr mit einem Außendurchmesser von 32 mm größer als beim Rohr mit dem Durchmesser von 25 mm. Es wurden vier verschiedene Fälle verglichen, die sich in den Bodentemperaturen und der Soletemperatur unterscheiden. Die Werte dazu stammen aus den Messungen. Die genauen Werte sind aus der Abbildung 6-10 zu entnehmen $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$. Der nahezu lineare Verlauf der gesamten Druckverluste der Kollektoren ergibt sich aus dem vergleichsweise großen Anteil des statischen Druckverlustes.

Es ist deutlich zu erkennen, dass ein größerer Durchmesser sich positiv auf die Kollektorleistung auswirkt. Die Ergebnisse zeigen eine Erhöhung der

Kollektorleistung von ca. 24 %. Durch die Erhöhung des Durchmessers erhöht sich die Wärmeübertragungsfläche und somit ergibt sich eine höhere Kollektorleistung. Zusätzlich erhöht sich durch die Konstanz der Solegeschwindigkeit in allen vier Fällen der absolute Solemassenstrom, dadurch, dass die Wärmemenge direkt von dem Massestrom abhängig ist, kann eine größere Wärmemenge vom Boden in das System eingekoppelt werden.

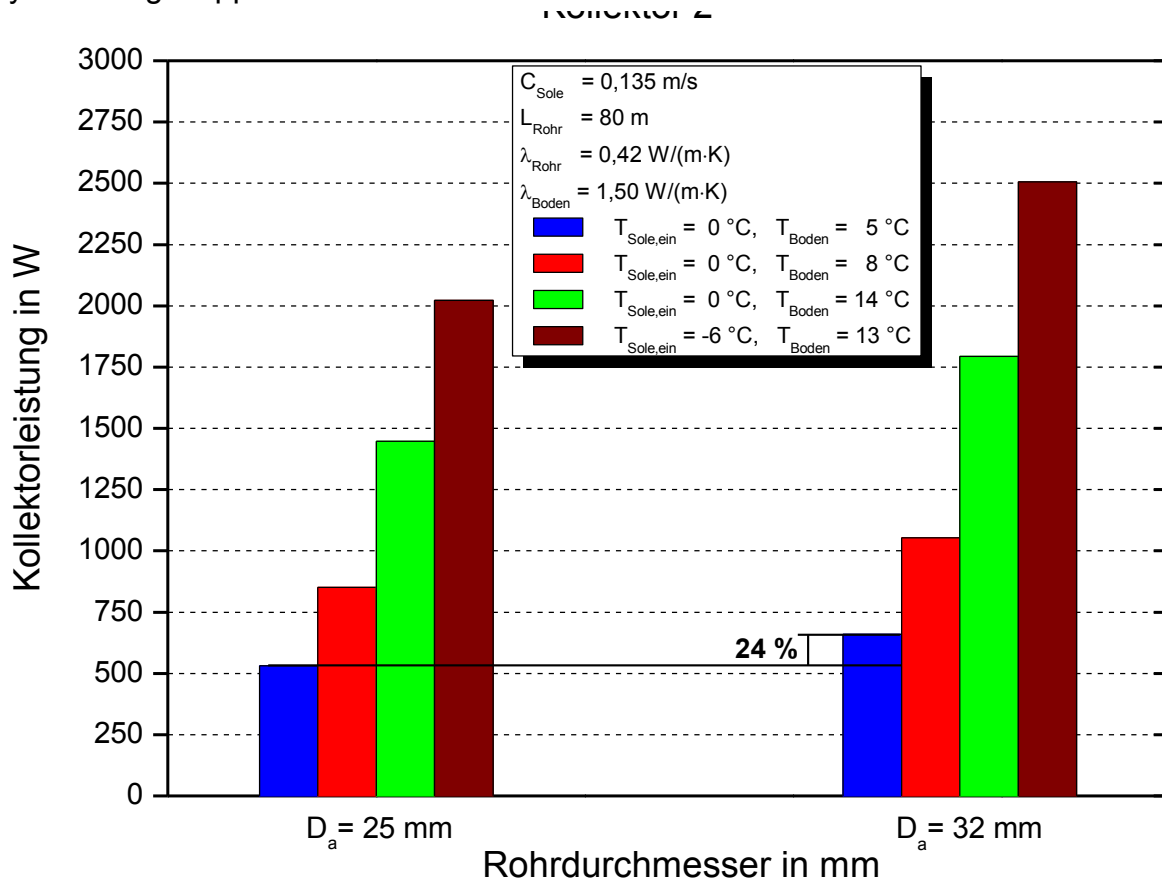


Abbildung 6-10: Kollektorleistung bei verschiedenen Rohrdurchmesser und vier verschiedenen Temperaturszenarien (Kollektor 1)

Einfluss des Rohrmaterials

Um den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials auf die Kollektorleistung zu bestimmen, werden verschiedene Werte zur Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials für die Geometrien untersucht.

Die Abbildung 6-11: Kollektorleistung und Soletemperaturdifferenz bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten des Rohres (Kollektor 1) zeigt die Ergebnisse des Einflusses des Rohrmaterials ausgehend von der Geometrie 1. Es wurden Simulationen mit Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 0,25 W/(m·K) und 1,5 W/(m·K) durchgeführt.

Die übrigen Randbedingungen wurden konstant gehalten und sind in Abbildung 6-11 aufgeführt.

Der Verlauf der Kollektorleistung zeigt, dass eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit im unteren Bereich eine größere Änderung der Kollektorleistung bewirkt als eine Erhöhung im oberen Bereich.

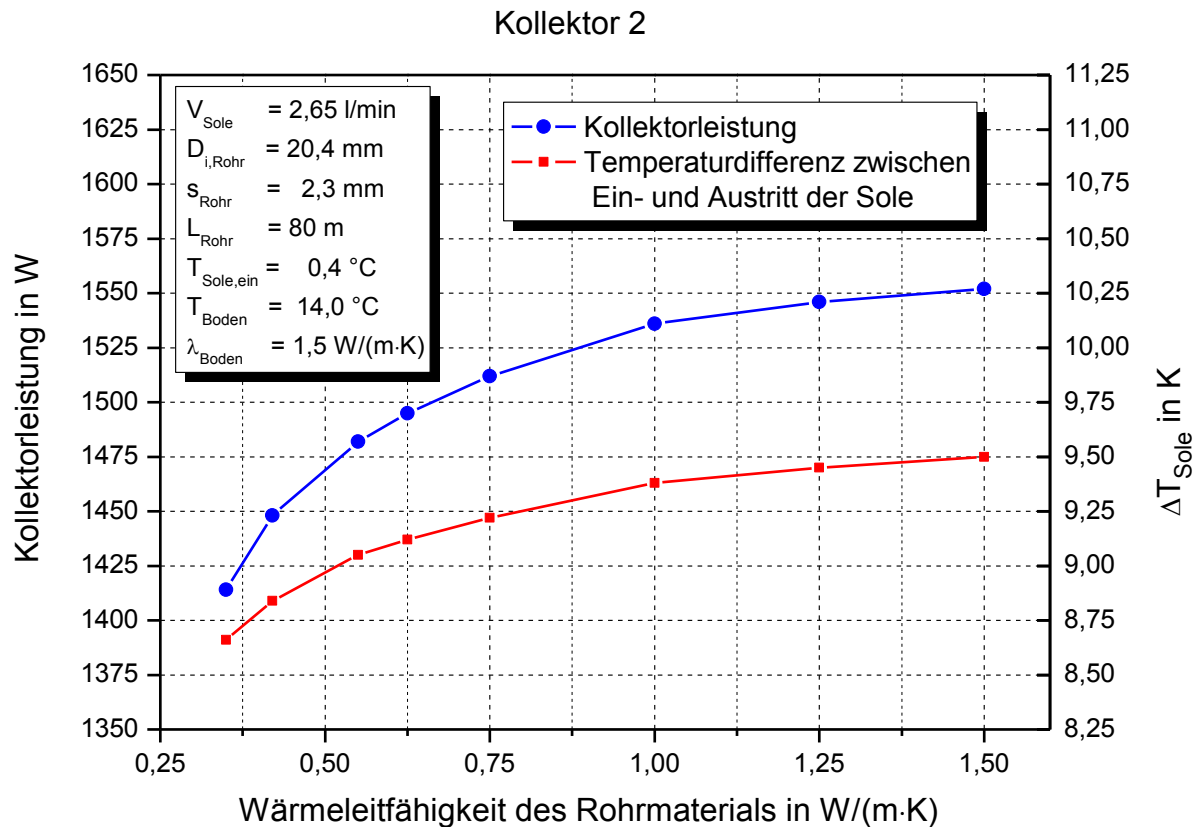


Abbildung 6-11: Kollektorleistung und Soletemperaturdifferenz bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten des Rohres (Kollektor 1)

Einfluss der Teilumhüllung des Kollektors mit Luft

Als letzte Simulationsreihe wurde der Einfluss einer teilweisen Rohrumhüllung mit Luft untersucht. Die Umhüllung wurde hier in die Mitte des Kollektors gelegt und von 0 % bis 30 % Luftumhüllung bezogen auf die Rohrlänge variiert. Die Randbedingungen wurden konstant gehalten, die genauen Werte sind aus der Abbildung 6-12 zu entnehmen. Bei der Simulation wurde eine Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials von $0,42 \text{ W/(m·K)}$ angenommen.

Im Gegensatz zu den bisherigen Ergebnissen ist hier ein linearer Verlauf der Kollektorleistung zu erkennen. Eine Vermeidung von Luft um das Kollektorrohr ist also in jedem Fall anzustreben, da die Umhüllung sich direkt auf die Leistung auswirkt.

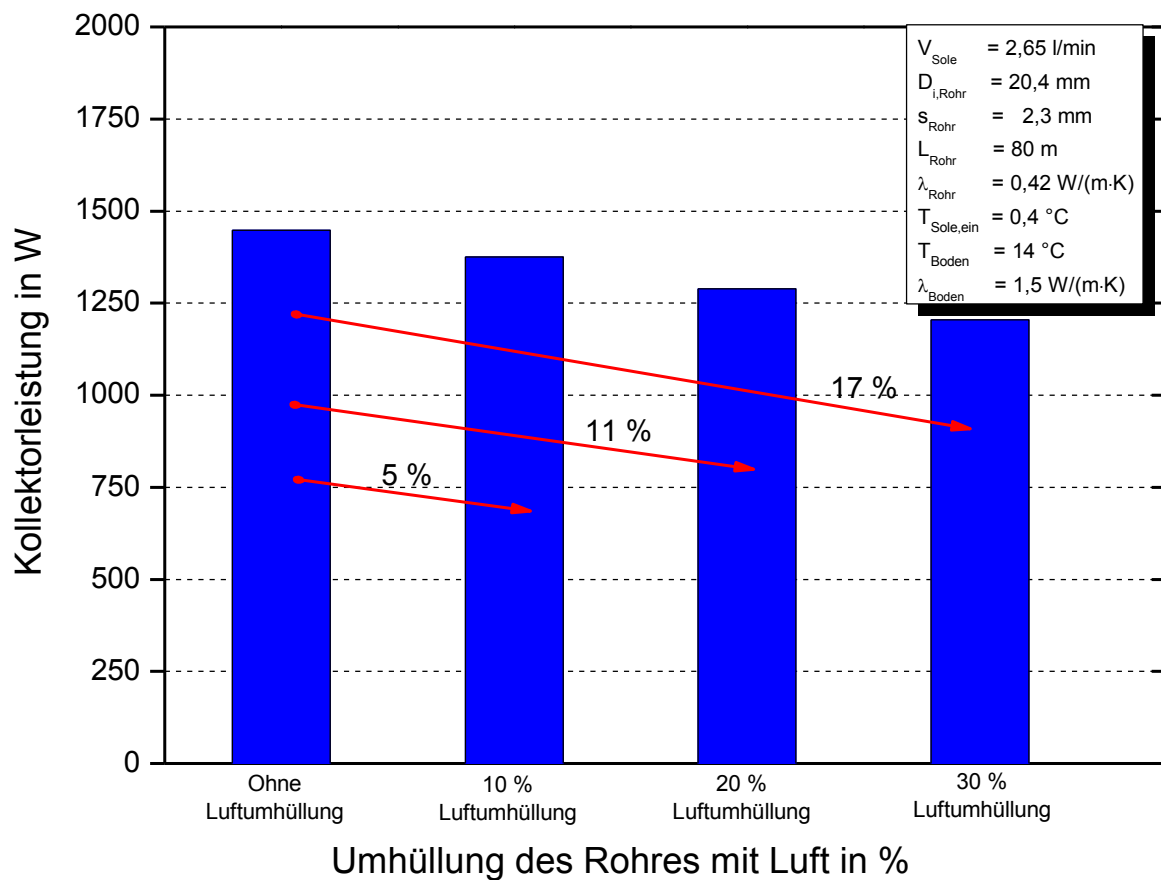


Abbildung 6-12: Kollektorleistung bei anteiliger Umhüllung mit Luft (Kollektor 1)

Validierung der Simulationsergebnisse

Das Simulationsmodell wurde mit Messergebnissen von dem am GWI installierten Kollektor abgeglichen. Beim Vergleich trat eine maximale Abweichung von 2,6 % auf (Abbildung 6-13). Die gewonnenen Ergebnisse aus der Simulation können somit als realitätsnah angesehen werden.

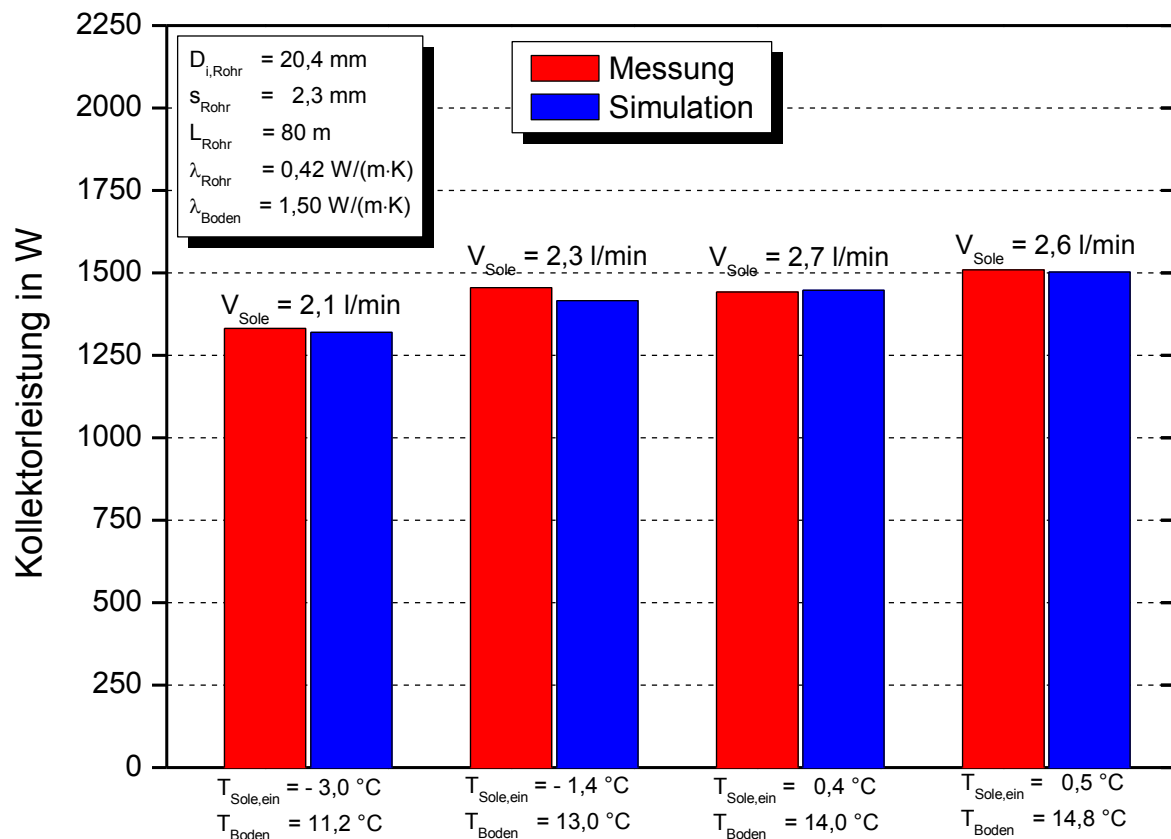


Abbildung 6-13: Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messergebnissen (Kollektor 1)

6.2.2.6 Simulationsergebnisse der Kollektor-Geometrie 2

Kollektor zwei wurde mäanderförmig in den Boden eingebracht. Wie bei Kollektor 1 beträgt die Gesamtlänge 80 m. Die Rohrmaße, Randbedingungen und Stoffwerte stimmen ebenfalls mit Kollektor 1 überein. Die Maße wurden von den am GWI verbauten Kollektoren übernommen. Bei der Simulation wurde annähernd das identische Erdvolumen wie bei Kollektor 1 angenommen. In Abbildung 6-14 ist die Geometrie des Kollektors 2 dargestellt.

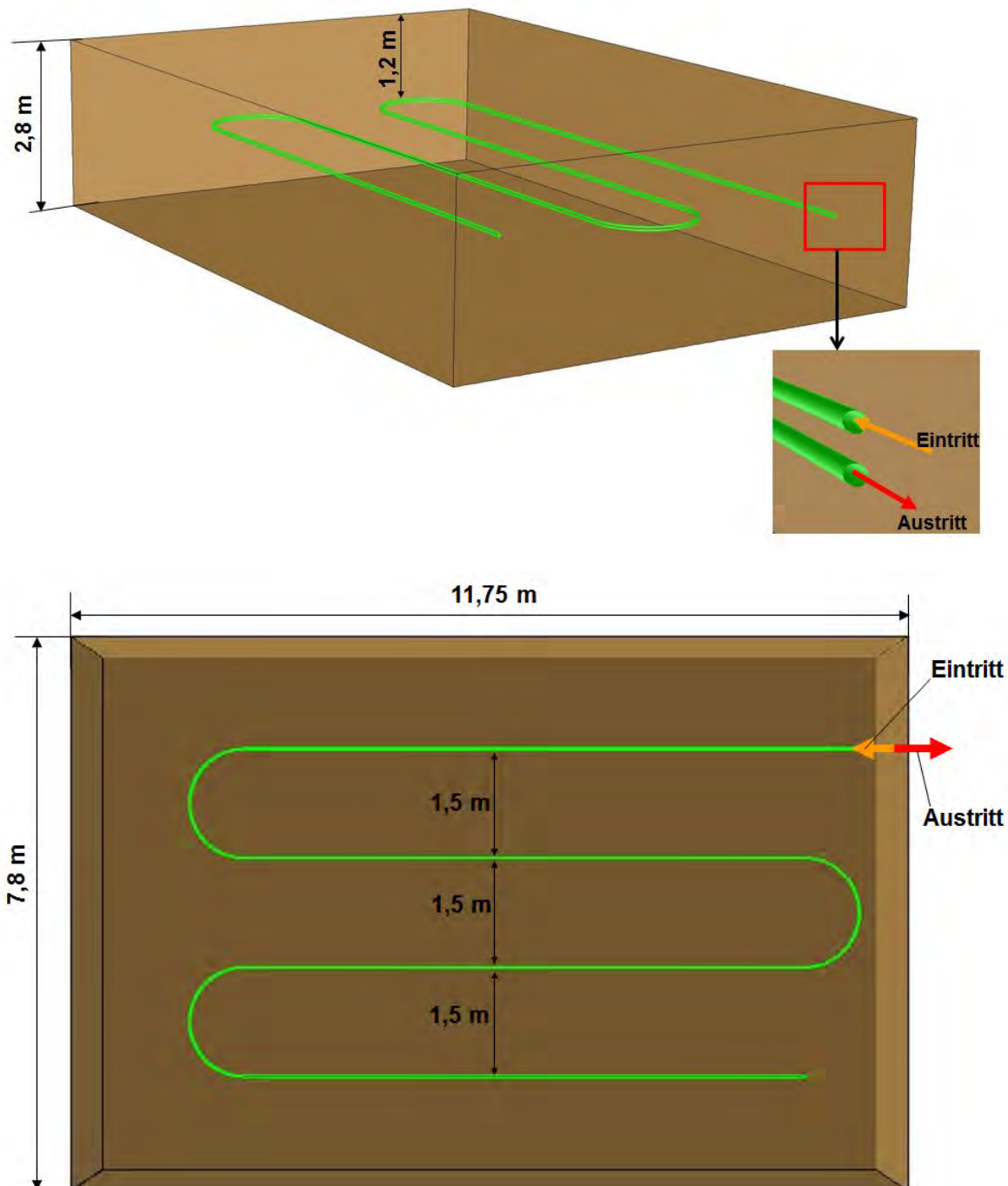


Abbildung 6-14: Geometrie von Kollektor 2

Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Als erste Variation wurde ebenfalls der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens beim Kollektor 2 untersucht. Die Randbedingungen wurden wie bei den Simulationen mit Kollektorgeometrie 1 konstant gehalten.

Bei der Betrachtung der Kollektorleistung fällt auf, dass Kollektorgeometrie 2 über den gesamten Bereich über der Kollektorleistung von Kollektorgeometrie 1 liegt. Mit

einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens steigt die Kollektorleistung wie bei Kollektor 1. Die Steigerung zwischen Minimalwert und Maximalwert liegt niedriger als bei Kollektor 1. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Kollektor 2 einen größeren Einzugsbereich aufweist und somit die Wärme aus einem größeren Bereich nachströmen kann. Nichtsdestotrotz ist auch hier erkennbar, dass die Erhöhung von $0,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ auf $1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ die größte relative Auswirkung auf die Kollektorleistung. Diese Erhöhung bewirkt mit 47 % fast zwei Drittel der Gesamterhöhung von $0,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ auf $4,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

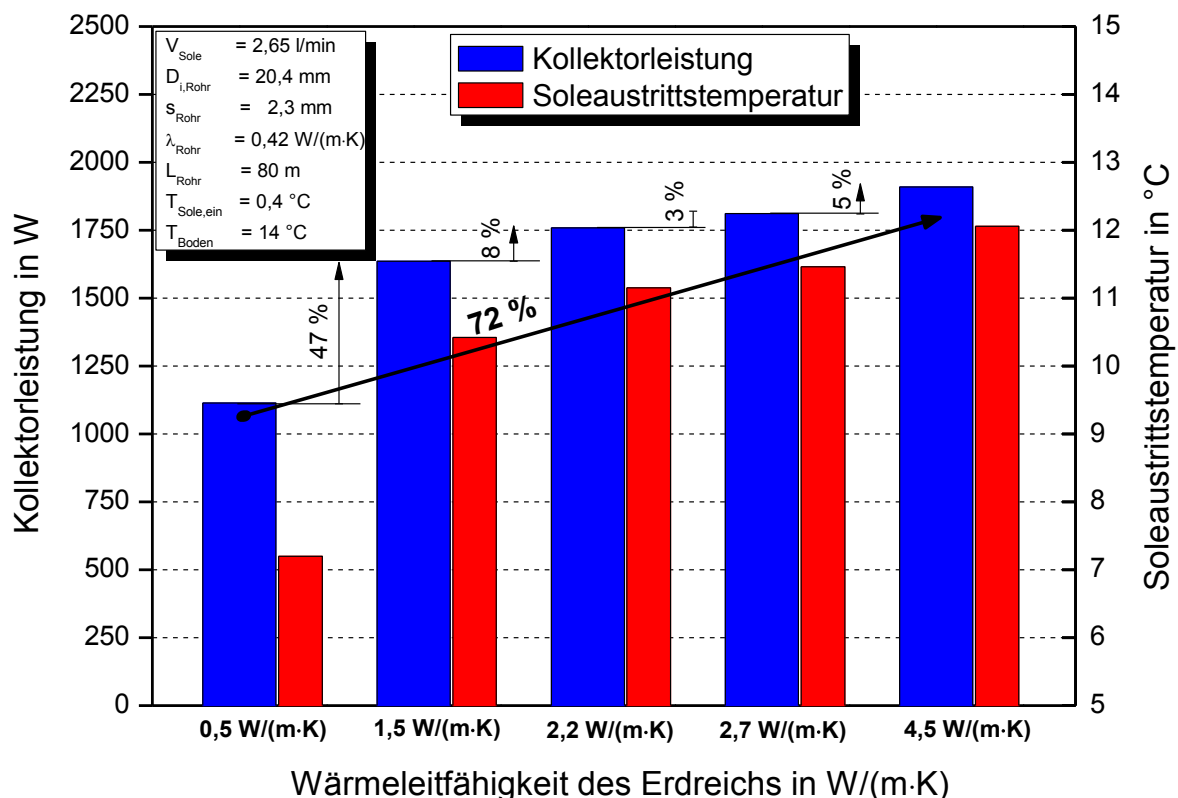


Abbildung 6-15: Wärmeleitfähigkeit und Soleaustrittstemperatur bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten (Kollektor 2)

Einfluss des Volumenstroms der Sole

Die Simulation des Einflusses des Volumenstroms erfolgte analog zur Simulation von Kollektor 1. Der Volumenstrom wurde vervielfacht und die Randbedingungen wurden beibehalten. Die Wärmeleitfähigkeit des Rohres wurde in Übereinstimmung mit den Versuchskollektoren am GWI mit $0,42 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ angenommen.

Der Verlauf ähnelt qualitativ den Ergebnissen der Simulation von Kollektor 1. Es ist wieder klar zu erkennen, dass die Änderung im unteren Volumenstrombereich eine größere Auswirkung hat, als eine Änderung im oberen Volumenstrombereich, wo sich die Kollektorleistung augenscheinlich einem Maximum annähert. Quantitativ

liegen die Unterschiede über denen der Simulationen von Kollektor 1. Dies kann wieder damit erklärt werden, dass bei Kollektor 2 die Wärme von allen Seiten nachströmen kann während bei Kollektor 1 die Sole auf einem engen Raum dem Boden Wärme entzieht. Die Erhöhung des Volumenstromes kompensiert sich bei Kollektor 1 teilweise durch die Nähe der Kollektorrohre, bei Kollektor 2 verteilt sich das erhöhte Solevolumen auf eine größere Fläche und die erhöhte Solemenge führt direkt zu einer erhöhten Entzugsleistung.

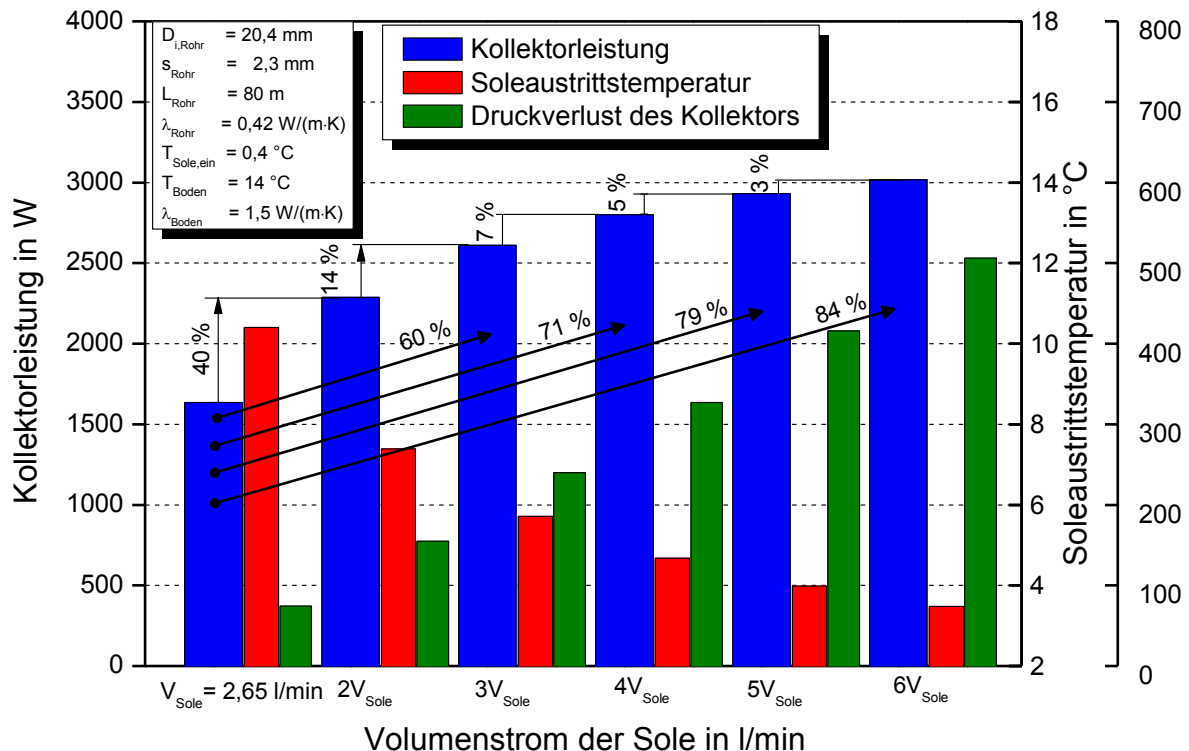


Abbildung 6-16: Kollektorleistung, Soleaustrittstemperatur und Druckverlust bei verschiedenen Volumenströmen (Kollektor 2)

Einfluss des Rohrdurchmessers des Kollektors

Der Rohrdurchmesser wurde auch bei Kollektor 2 von 25 mm auf 32 mm angehoben. Es wurden die gleichen vier Fälle wie bei der Simulation von Kollektor 1 mit den jeweiligen Boden- und Soletemperaturen betrachtet.

Die Ergebnisse sind sehr gut vergleichbar mit den Ergebnissen aus der Simulation von Kollektor 1. Die Kollektorleistungen sind bei Kollektor 2 größer als bei Kollektor 1, aber beide Kollektoren profitieren mit einem Anstieg von ca. 25 % der Kollektorleistung von einer Vergrößerung des Rohraußendurchmessers und der damit verbundenen vergrößerten Wärmeübertragungsfläche und erhöhtem Solemassenstrom.

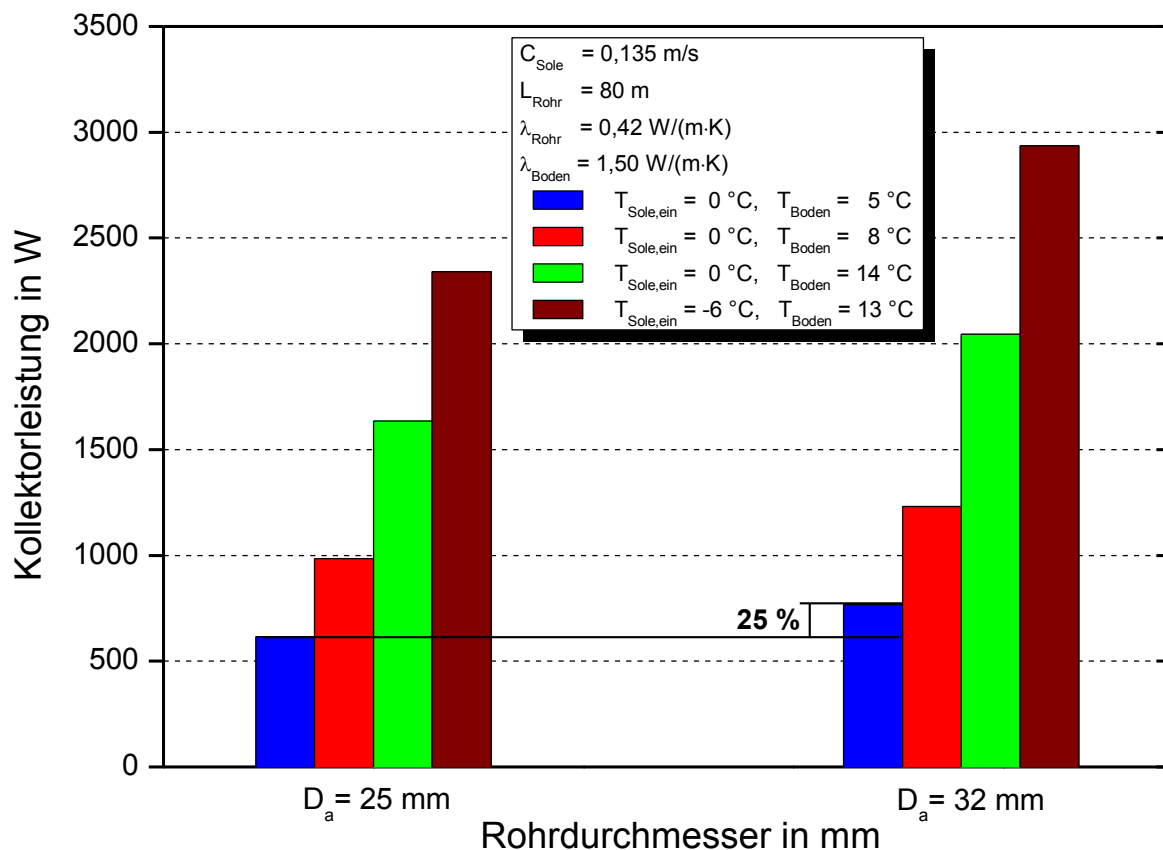


Abbildung 6-17: Kollektorleistung bei verschiedenen Rohrdurchmesser und vier verschiedenen Temperaturszenarien (Kollektor 2)

Einfluss des Rohrmaterials

Wie bei Kollektor 1 wurde eine Simulation zur Untersuchung des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit des Rohres durchgeführt. Die Simulation wurde über den gleichen Bereich variiert, die übrigen Randbedingungen wurden beibehalten.

Ähnlich wie bei den Untersuchungen zum Einfluss des Rohrdurchmessers ist zu erkennen, dass der qualitative Verlauf sich bei beiden Kollektoren ähnelt, nur der Betrag ein anderer ist. Eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit im kleinen Bereich hat größere Auswirkungen als eine Steigerung im hohen Bereich. Die Kurve nähert sich einem Wert an, so dass ab einem bestimmten Punkt eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit nur eine minimale Verbesserung der Kollektorleistung mit sich bringt.

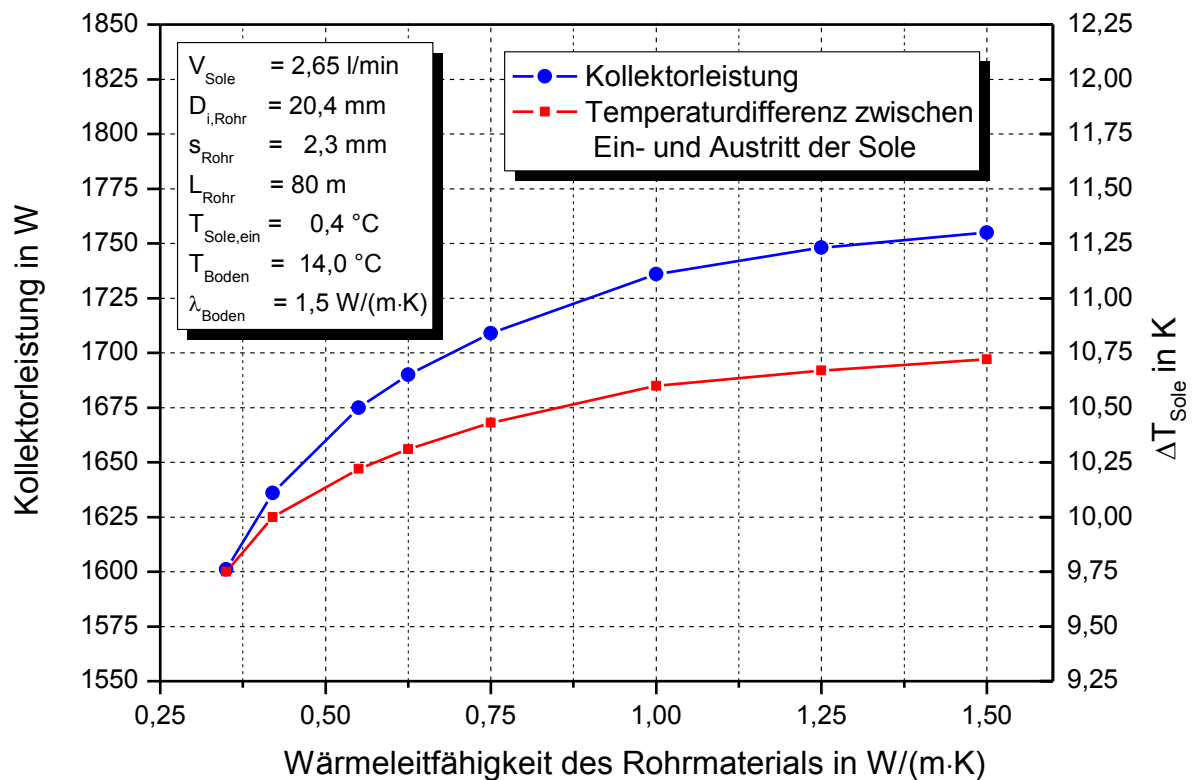


Abbildung 6-18: Kollektorleistung und Soletemperaturdifferenz bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten des Rohres (Kollektor 2)

Einfluss der Teilumhüllung des Rohres mit Luft

Es wurde ebenfalls durchgeführt wie bei Kollektor 1 eine Untersuchung bezüglich der Luftumhüllung. Dabei wurde der Anteil der Luftumhüllung in 10 %-Schritten von 0 auf 30 % simuliert. Die Randbedingungen sind konstant geblieben wie bei Kollektor 1.

Die Verringerung der Kollektorleistung durch eine Umhüllung mit Luft fällt geringer aus als bei Kollektor 1. Bei Kollektor 1 sind die Rohrleitungen direkt nebeneinander, so dass eine Umhüllung mit Luft anstatt mit Erde praktisch vier Rohre betrifft und so einen größeren Effekt hat, bei Kollektor 2 ist von einer Umhüllung mit Luft praktisch nur ein Rohr betroffen und der Effekt fällt geringer aus. Der qualitative Verlauf allerdings fällt bei beiden Kollektoren annähernd linear aus.

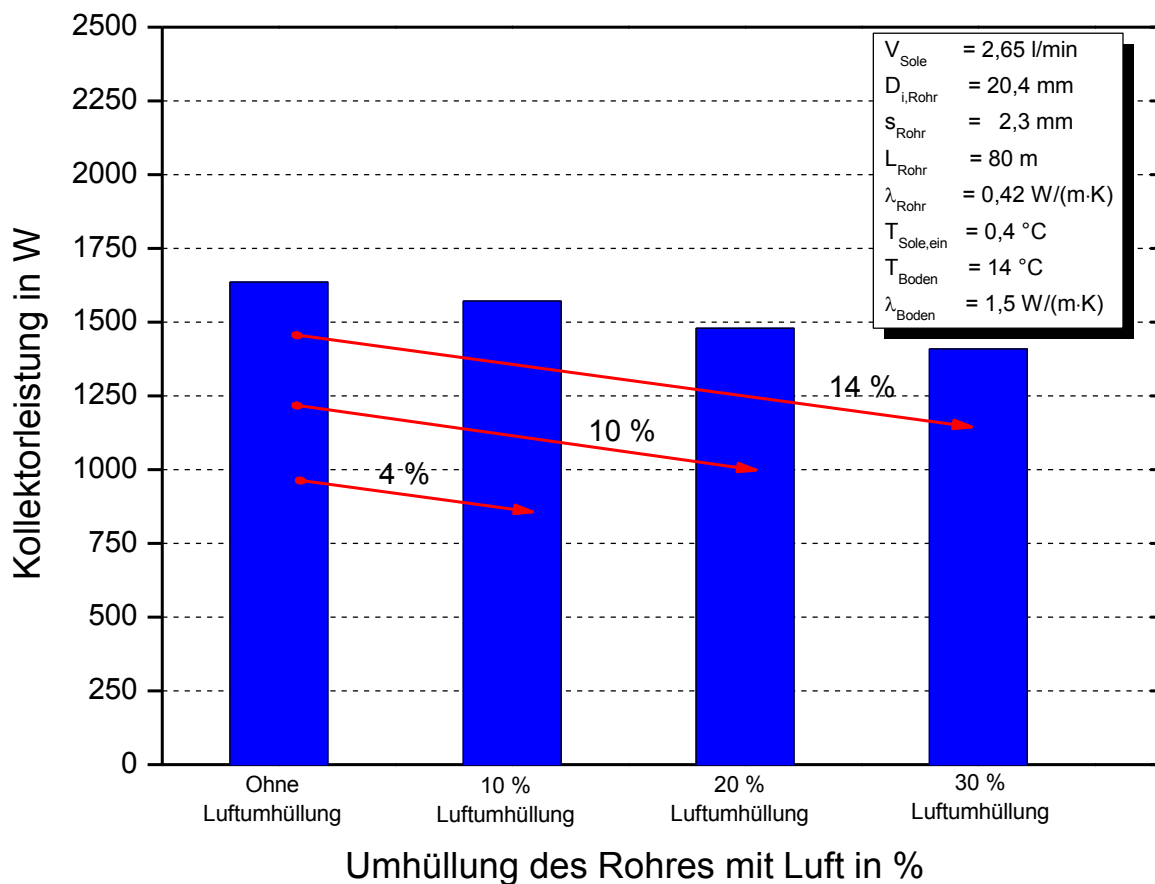


Abbildung 6-19: : Kollektorleistung bei anteiliger Umhüllung mit Luft (Kollektor 2)

Validierung der Simulationsergebnisse

Um die Simulation zu validieren, wurden Simulationsdaten mit Messdaten, die mit den am GWI installierten Kollektor 2 gewonnen wurden, verglichen (Siehe Abbildung 6-20).

Die Abweichung liegt bei einem Maximalwert von 4,3 %, trotzdem kann die Übereinstimmung sehr zufriedenstellend. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Simulationen können als realitätsnah betrachtet werden.

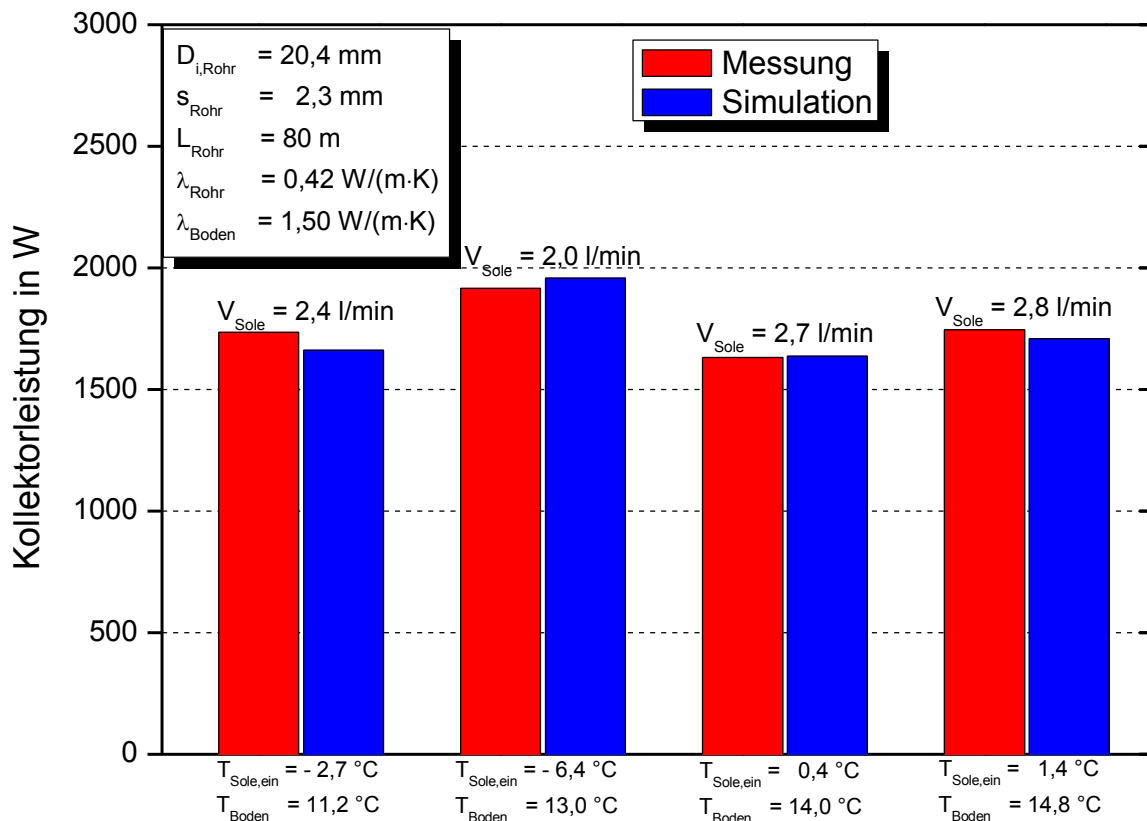


Abbildung 6-20: Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messergebnissen (Kollektor 2)

Einfluss der Kollektorgeometrie

Neben der Variation einzelner Parameter wurden auch die beiden Kollektorgeometrien miteinander verglichen. Dabei wurden fünf verschiedene gemessene Fälle mit jeweils anderen Boden- und Soleeintrittstemperaturen herangezogen.

Die Abbildung 6-21: Vergleich der Leistung von Kollektor 1 und Kollektor 2 bei fünf Temperaturszenarien zeigt deutlich, dass die mäanderförmige Einbringung gegenüber einem Rohrbündel zu bevorzugen ist. Bei einem Rohrbündel steht effektiv weniger Wärme in der Umgebung der Rohre zum Wärmeentzug zur Verfügung und beim Wärmepumpenbetrieb beeinflussen sich die Rohrleitungen gegenseitig. Je höher die Temperaturdifferenz zwischen Sole und Boden ist, umso größer ist die Kollektorleistung. Bei höheren Temperaturdifferenzen unterscheiden sich die Kollektorleistungen um ca. 13 %.

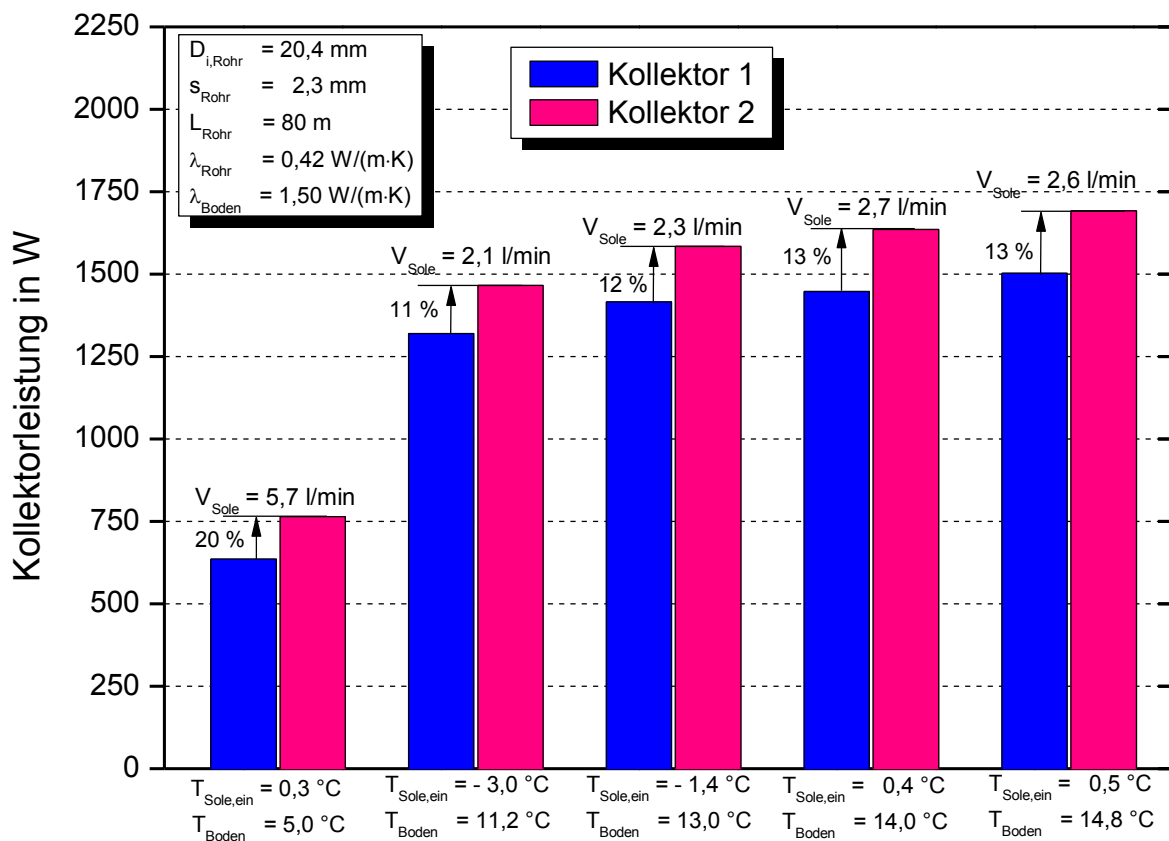


Abbildung 6-21: Vergleich der Leistung von Kollektor 1 und Kollektor 2 bei fünf Temperaturszenarien

Bei dem Vergleich über den Einfluss der Bodenart zeigt sich ein ähnliches Bild (Siehe Abbildung 6-22). Der Kollektor 2 liegt mit seiner Leistung signifikant über der des Kollektors 1. Es ist zu sehen, dass Kollektor 2 nicht so stark von einer geringen Wärmeleitfähigkeit beeinträchtigt wird wie Kollektor 1. Das ist auf die gegenseitige Beeinflussung innerhalb des Rohrbündels zurückzuführen. Mit steigender Wärmeleitfähigkeit nimmt der Unterschied zwischen den verschiedenen Kollektorengeometrien ab.

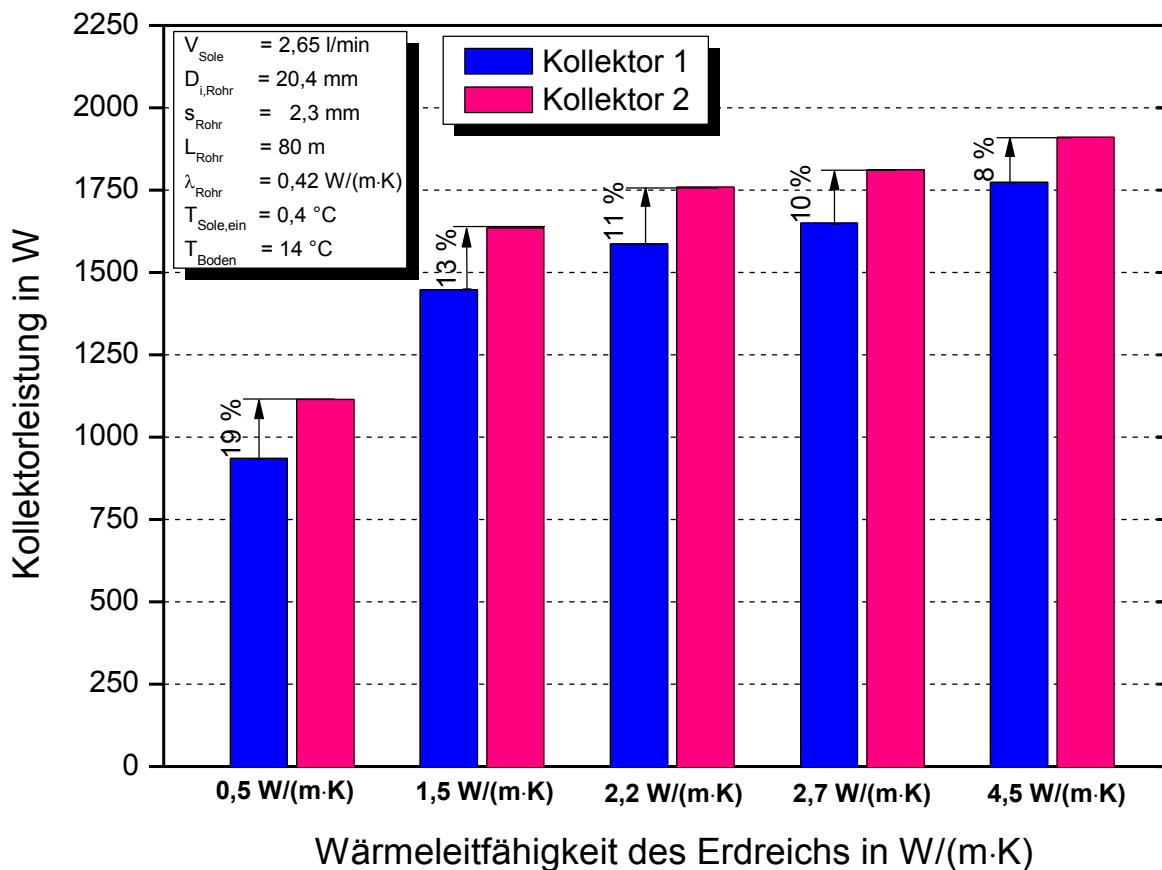


Abbildung 6-22: Leistung von Kollektor 1 und Kollektor 2 bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten

6.2.2.7 Numerische Auslegung verschiedener Kollektorgeometrien bei unterschiedlichen Parametern

Mit den Ergebnissen ist es möglich, eine genauere Entscheidungshilfe bezüglich der Kollektoren zu geben. Im Vorfeld der konkreten Anlagenplanung werden die verschiedenen Kollektorgeometrien und variierten Parametern simuliert, um den Einfluss dieser zu ermitteln.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-23 und Abbildung 6-24 dargestellt. Gezeigt werden die Entnahmelastungen, die Druckverluste und die Temperaturspreizungen bei zwei verschiedenen Kollektorgeometrien und jeweils drei unterschiedlichen Rohrwärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens. Als Randbedingung werden gleiche Geschwindigkeit, gleicher Rohrdurchmesser sowie Rohrwanddicke und eine einheitliche Temperaturdifferenz von Bodentemperatur und Soleeintrittstemperatur von 14 K bei den untersuchten Fällen angenommen.

Zu sehen ist die oben erwähnte Änderung über die Wärmeleitfähigkeit des Bodens. Im unteren Bereich wirkt sich eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit stärker auf die Kollektorleistung aus als im oberen Bereich.

Weiterhin ist deutlich der Unterschied zwischen den Kollektorgeometrien zu erkennen. Die Verläufe von Kollektor 2 liegen über den gesamten Bereich über den Verläufen von Kollektor 1.

Mit Hilfe der Diagramme ist es möglich Randbedingungen für den Wärmepumpenbetrieb abzuschätzen. Für einen effizienten Betrieb ist die Kollektorleistung ausschlaggebend, um sicherzustellen, dass der Wärmepumpe auch genügend Umweltwärme zur Verfügung gestellt wird. Bei den Ergebnissen ist zu beobachten, dass die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit des Rohres nur bedingt zu einer Verbesserung führt. Bei einer Erhöhung von $0,42 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ auf $1,00 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ist ein deutlicher Anstieg der Kollektorleistung zu beobachten. Ein absolut annähernd gleich großer Anstieg von $1,00 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ auf $1,50 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bringt nur einen geringen Anstieg der Kollektorleistung mit sich.

Weiterhin ist die Temperaturdifferenz zwischen Soleeintritt und Soleaustritt zu beachten. Allgemein wird eine Kollektoranlage so ausgelegt, dass eine Vereisung des Bodens durch zu kalte zurückströmende Sole vermieden wird. Dieses Problem tritt selten nur durch die Temperatur der Sole, sondern vielmehr durch die Kombination von kalter Sole über eine längere Zeit und durch den Wärmeentzug erniedrigten Bodentemperaturen auf. Der Temperaturunterschied kann hierfür allerdings schon einen ersten Anhaltspunkt liefern.

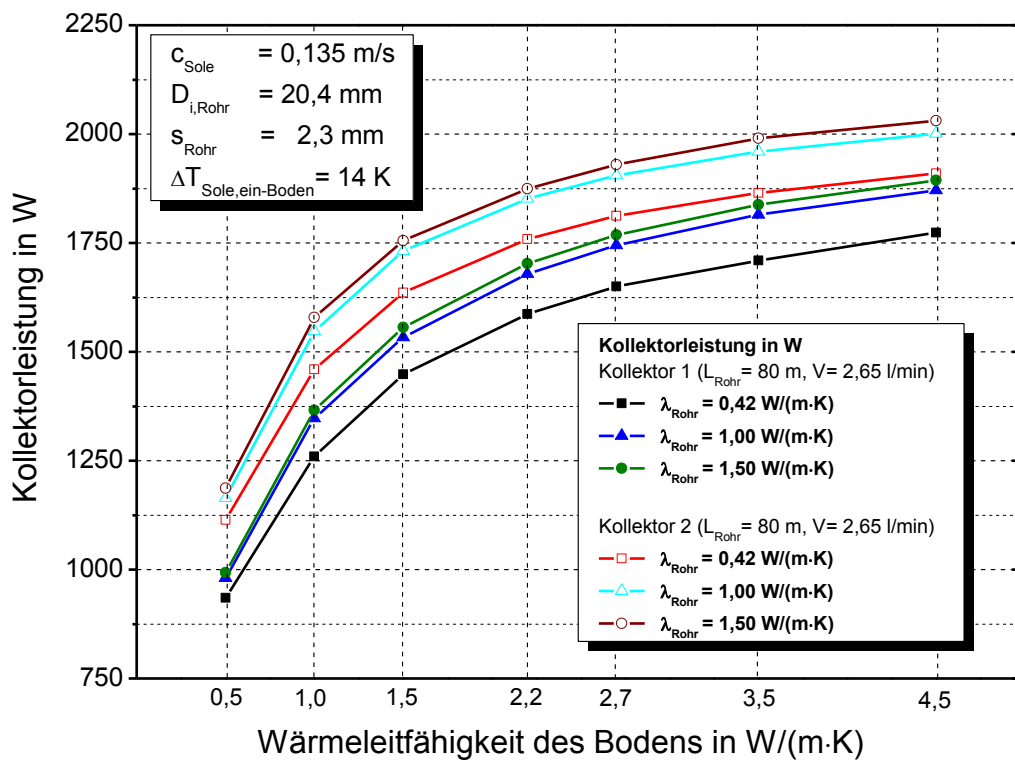


Abbildung 6-23: Vergleich der Kollektorleistung in Abhängigkeit der Bodenwärmeleitfähigkeit und Rohrwärmeleitfähigkeit

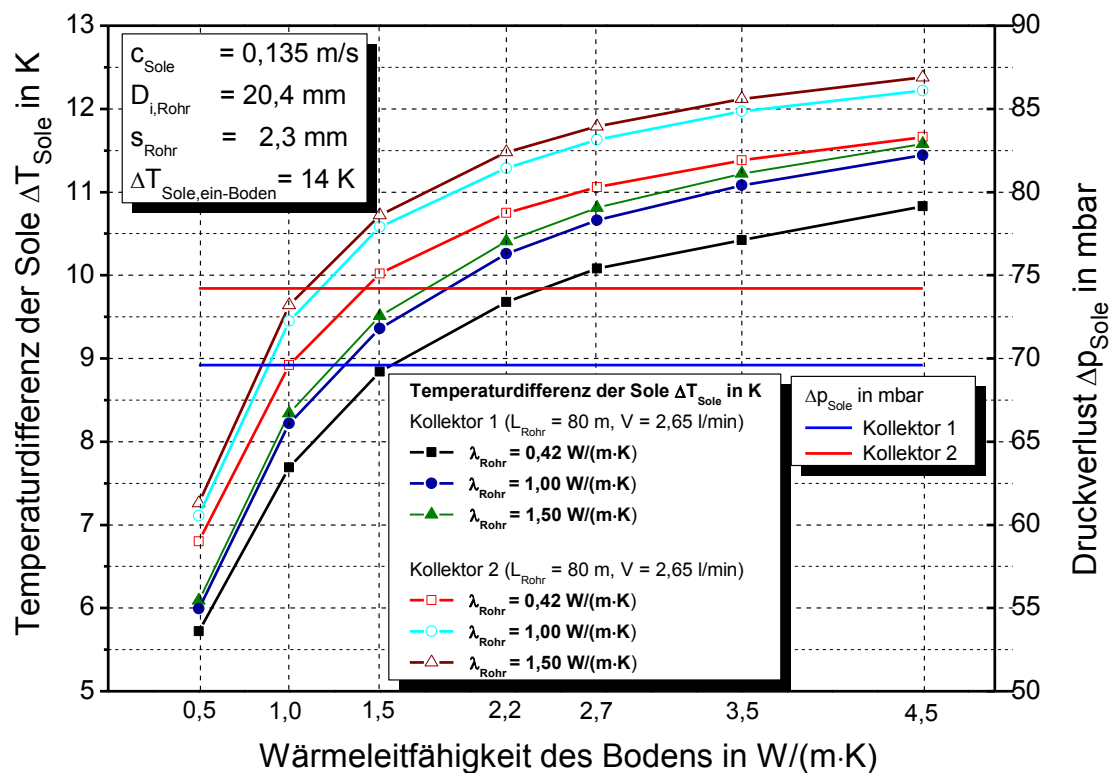


Abbildung 6-24: Soletemperaturdifferenz in Abhängigkeit der Bodenwärmeleitfähigkeit und Rohrwärmeleitfähigkeit

6.2.3 Sonden und Sondenfelder

6.2.3.1 Erdwärmesonden

Mit Hilfe von Erdwärmesonden kann Wärme aus dem Erdreich aufgenommen und einer Wärmepumpe zugeführt werden. Dazu werden zumeist paarweise gebündelte U-förmige Kunststoffrohrschleifen aus hochfestem Polyethylen in vertikale Tiefenbohrungen eingebracht (s. Abbildung 6-25). Außerdem gibt es noch Koaxialsonden, bei denen 2 Rohre ineinander in das Rohrloch eingelassen werden. Da das Erdreich ab einer Tiefe von ca. 15 m das ganze Jahr eine nahezu konstante Temperatur aufweist, ist der Einsatz von Erdwärmesonden zu Heizzwecken, insbesondere im Winter bei niedrigen Außentemperaturen, sehr effektiv. Im Sommer eignen sie sich außerdem zur passiven Kühlung. Die benötigte Sondenlänge ist abhängig vom Wärmebedarf des zu beheizenden Objektes und von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs.



Abbildung 6-25: Modell einer Wärmepumpenheizung mit Erdwärmesonde [BWP]

Neben der Erdwärmesonde besteht ein Sondenkreislauf aus einer Umwälzpumpe, einem Expansionsgefäß und dem Verdampfer der Wärmepumpe. Im Inneren des Kreislaufes zirkuliert ein Sondenfluid, das als Wärmeträgermedium fungiert.

Obwohl Wasser als Sondenfluid am besten geeignet ist, werden aufgrund der Gefriersicherheit zumeist Frostschutzmittel (Glykole) beigegeben. Diese Wasser-Glykol-Gemische werden als Sole bezeichnet. In Abhängigkeit vom geforderten Frostschutz kann der Glykolanteil variiert werden. Dabei ist aber zu beachten, dass mit steigendem Glykolanteil die Zähigkeit der Sole zunimmt und eine höhere Pumpenleistung benötigt wird. Außerdem sinkt die spezifische Wärmekapazität der

Sole, die durch einen höheren Volumenstrom im Sondenkreislauf (erhöhter Strombedarf) kompensiert werden muss. In Sonderfällen (z.B. in Wasserschutzgebieten) dürfen Erdwärmesonden nur mit reinem Wasser betrieben werden. Bei diesen Anlagen muss durch entsprechende Auslegung (erhöhte Sondenlänge) darauf geachtet werden, dass keine Beschädigungen durch Vereisung auftreten können.

Beim Einbringen der für die Erdwärmesonde benötigten Bohrung muss darauf geachtet werden, dass der Bohrlochdurchmesser ausreichen groß gewählt wird. Neben dem ungehinderten Einbau der Sonde muss eine ordnungsgemäße Ringraumabdichtung möglich sein. Um die Sondenrohre in der Bohrung zu zentrieren, werden Abstandshalter zur Bohrlochwand in einem Abstand von mindestens 3 m eingebaut. Um den Wärmetransport vom Erdreich zur Sonde zu gewährleisten wird die Bohrung nach dem Einbringen des Rohrbündels mit einem hoch wärmeleitfähigen, dauerhaft abdichtenden Spezialzement verpresst. Dieser wird als Suspension im Kontraktorverfahren, mit Hilfe eines mittig angeordneten Verpressrohres von unten nach oben in die Bohrung gepumpt. Durch den Einsatz von thermisch verbesserten Materialien mit höherer Wärmeleitfähigkeit kann der Wärmetransport zwischen Sonde und Erdreich verbessert und die Effizienz der Wärmepumpe erhöht werden.

Erdwärmesonden erschließen den in Richtung Erdoberfläche gerichteten Wärmestrom aus dem Erdinneren und können bei richtiger Auslegung mit annähernd konstanten Wärmequelltemperaturen arbeiten. Die Auslegung der Erdwärmesonden sollte so erfolgen, dass die erforderlichen Leistungen für Heizen bzw. Kühlen über die gesamte Lebensdauer der Anlage bereitgestellt werden können, ohne dass die Umgebung der Sonde unter den Gefrierpunkt abgekühlt oder unzulässig erwärmt wird. Bei einzelnen Erdwärmesonden, die Wärme aus dem Erdreich zum Heizen entziehen, sollte eine natürliche Regeneration durch das Nachfließen von Wärme aus dem umliegenden Erdreich möglich sein. Je tiefer die Erdreichtemperatur um die Sonde wird, umso mehr Wärme kann aus der Umgebung nachfließen. Bei Einzelsonden stellt sich folglich mit der Zeit ein Gleichgewichtszustand ein.

Die für ein Objekt benötigte Sondenlänge hängt auch entscheidend von den Gesteinseigenschaften (Körnung, Dichte) und dem Grundwasserfluss ab. Eine Prinzipskizze der Erdwärmennutzung mit Hilfe von Erdwärmesonden zeigt die Abbildung 6-26.

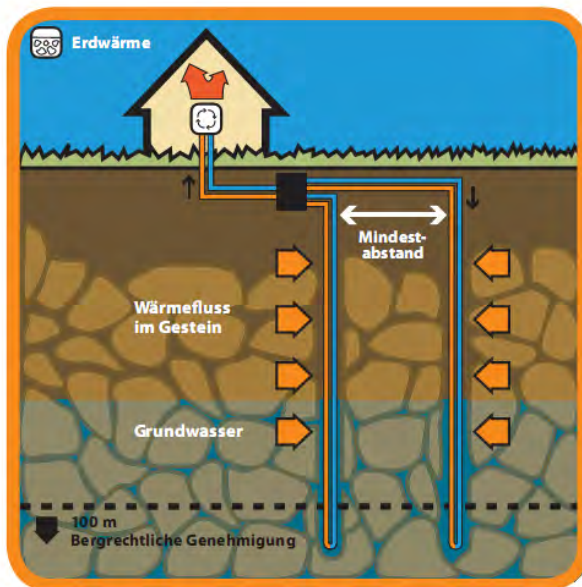


Abbildung 6-26: Prinzipskizze Erdwärmesonde [Quelle: geoENERGIE Konzept GmbH]

Die Auslegung von kleineren Heizungsanlagen bis 30 kW sollte durch auf dem Gebiet der Errichtung von Erdwärmesonden qualifizierten Unternehmen unter Beachtung der VDI-Richtlinie 4640 und der gesteinspezifischen thermischen Eigenschaften der Umweltwärmequelle erfolgen. Diese kann empirisch nach Tabelle oder Nomogramm gemäß VDI 4640 - Blatt 2 oder anhand von Betriebsdaten bestehender Anlagen durchgeführt werden. Die zur Auslegung der Erdwärmesonde relevante Kenngröße ist die spezifische Entzugsleistung. Sie ist eine Funktion der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und variiert in Abhängigkeit von der Beschaffenheit und vom Wassergehalt des Untergrundes. Die spezifische Entzugsleistung gibt die am Verdampfer der Wärmepumpe zur Verfügung stehende Wärmeleistung an. Sie beträgt in Abhängigkeit vom Untergrund zwischen 20 und 80 Watt pro Meter Sondenlänge (W/m).

Bei der Planung von Erdwärmeeinrichtungen können außerdem Erstinformationen zu möglichen geothermischen Entzugsleistungen aus regionalen Geothermieatlanten bezogen werden.

Bei der Installation von mehreren Sonden sind Minimalabstände zwischen den einzelnen Sonden zu beachten, damit eine gegenseitige Beeinflussung vermieden wird. In der Praxis haben sich Mindestabstände durchgesetzt, die bei

Einfamilienhäusern bei 10 m zwischen 2 Erdwärmesonden und 5 m zur Grundstücksgrenze liegen.

Die Nutzung von geothermischer Energie ist generell anzuzeigen und bedarf einer Genehmigung der Unteren Wasserbehörde des jeweiligen Landkreises (Wasserhaushaltsgesetz). Ab einer Tiefe von 100 m ist zusätzlich eine bergrechtliche Genehmigung erforderlich, die beim Landesbergamt beantragt werden muss. Ferner müssen Beginn und Ergebnisse der Bohrungen fristgemäß beim geologischen Dienst angezeigt werden [BWP], [GeoBay], [LeitEW], [ÖWAV207], [SEWS], [ZHAW].

6.2.3.2 Sondenfelder

Während ein bis zwei Erdwärmesonden zur Wärmeversorgung von Einfamilienhäusern zum Einsatz kommen, sind zur Wärme- oder Kälteversorgung von Gewerbe- und Industriebauten bzw. Wohnsiedlungen Multisondensysteme erforderlich. Dazu kommen Serien von Erdwärmesonden teilweise in unterschiedlicher Tiefe zum Einsatz, die unter oder unmittelbar neben dem zu versorgenden Gebäude installiert werden können. Dabei werden die Leitungen einzelner Sonden bei einer oder mehreren Wärmepumpen zusammengeführt. Werden die Anlagen auch zur Kühlung eingesetzt, so ist die Bohrtiefe auf 150 m begrenzt, um eine übermäßige Erwärmung des Untergrundes zu vermeiden.

Bei der Auslegung von größeren Erdwärmeeinrichtungen kommen computergestützte Simulationsprogramme zum Einsatz. Häufig wird eine geologische Vorerkundung durchgeführt, bei der mit Hilfe einer Probebohrung die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes mittels physikalischer Verfahren, wie z.B. dem thermischen Response-Test bestimmt wird. Die daraus gewonnenen Daten bilden die Grundlage für eine numerische Modellierung des Sondenfeldes. Diese ist insbesondere bei größeren, komplexen Anlagen erforderlich, da damit auch die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Anlagen sowie die thermischen Auswirkungen der Grundwasserströmung abgeschätzt werden können.

Sowohl in Gewerbe- und Industriebauten als auch in Wohnsiedlungen bestehen neben der Deckung des Wärmebedarfs zunehmend Anforderungen an die Klimatisierung der Gebäude. Gründe dafür bestehen beispielsweise im Trend zur Glasarchitektur, den gestiegenen Komfortansprüchen und den zunehmenden internen Wärmelasten (IT-Ausstattung). Diese überschüssige Wärme kann in das Erdreich transportiert werden und dient dadurch als saisonaler Speicher von Umweltwärme. Außerdem kommen in zunehmenden Maße Solarthermie und Prozessabwärme als Wärmequelle für unterirdische thermische Speicher zum Einsatz.

Da bei größeren Erdwärmeanlagen die natürliche Regeneration des Erdreichs begrenzt ist, ist ein Wechselbetrieb von Heizen und Kühlen ein optimaler Einsatzfall für diese Anlagen. Bei dieser Betriebsweise findet eine schnellere thermische Regeneration des Erdreichs als beim alleinigen Heizen oder Kühlen statt, sodass höhere Entzugsleistungen (Wärme und Kälte) möglich sind. Beim Betrieb dieser Erdwärmeanlagen muss beachtet werden, dass die Energiebilanz zwischen Heiz- und Kühlbetrieb ausgeglichen ist, damit eine nachhaltige Betriebsweise gewährleistet werden kann [GeoBay], [LeitSH], [SVG].

6.2.4 Regeneration

Bei der Regeneration wird z. B. über einen Solarkollektor zusätzliche Wärme in das Erdreich eingebracht. Dies geschieht fast immer im Sommer, wenn der Solarkollektor mehr Wärme zur Verfügung stellt, als von dem Nutzer abgenommen werden kann.

Von Prof. Bernd Glück [Glü] wurde mit Hilfe eines Simulationsmodells die Auswirkung von solarthermischer Regeneration untersucht. Das Modell wurde mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) erstellt und die wärmetechnischen Vorgänge wurden als quasistationär betrachtet.

Die nachfolgende Abbildung 6-27 zeigt den Verlauf der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Kollektors im 2. Jahr bei einer Wärmeeinspeisung im Sommer. Das in Abbildung 6-27 erwähnte Beispiel 2 behandelt einen Kollektorbetrieb ohne zusätzliche Wärmeeinspeisung im Sommer (Vergl. Abbildung 6-28).

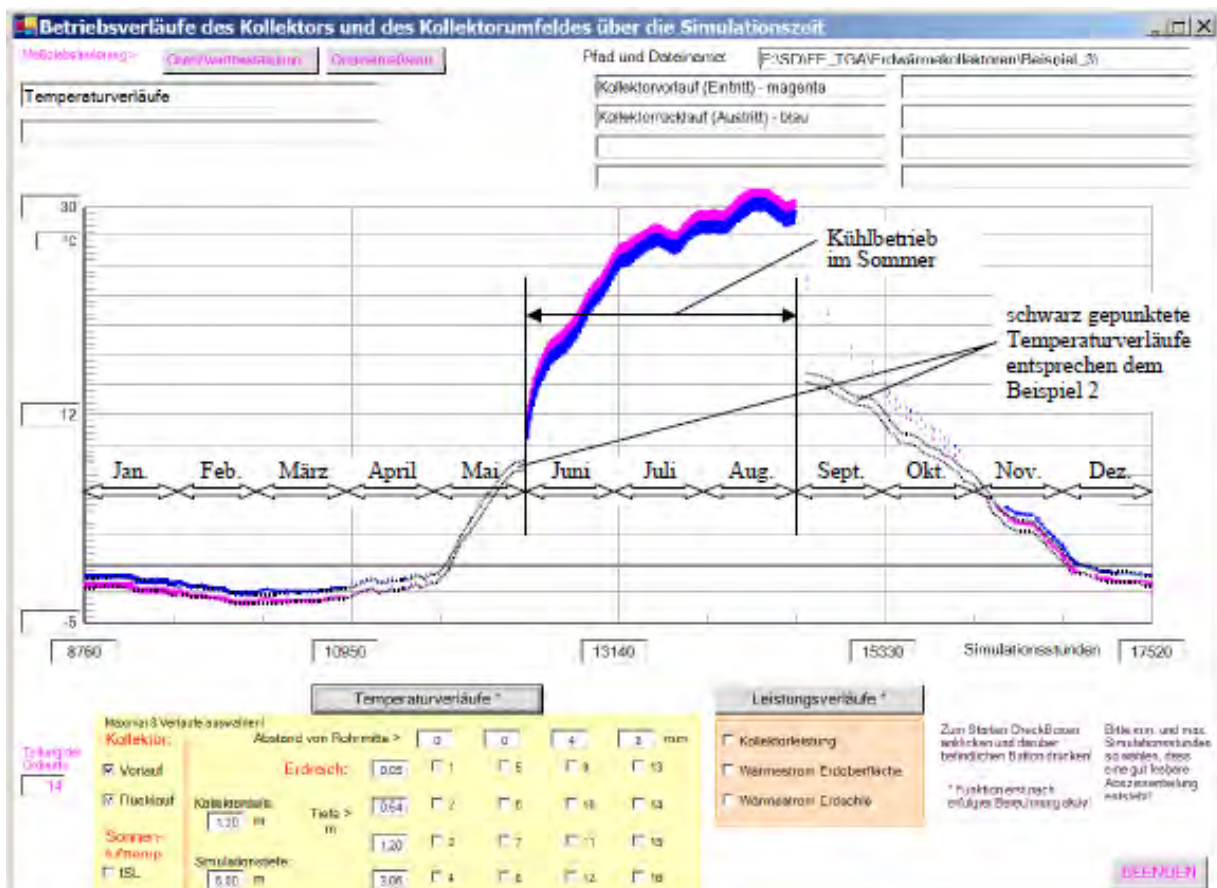


Abbildung 6-27: Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Kollektors bei einer Wärmeeinspeisung im Sommer im 2. Jahr [Glü]

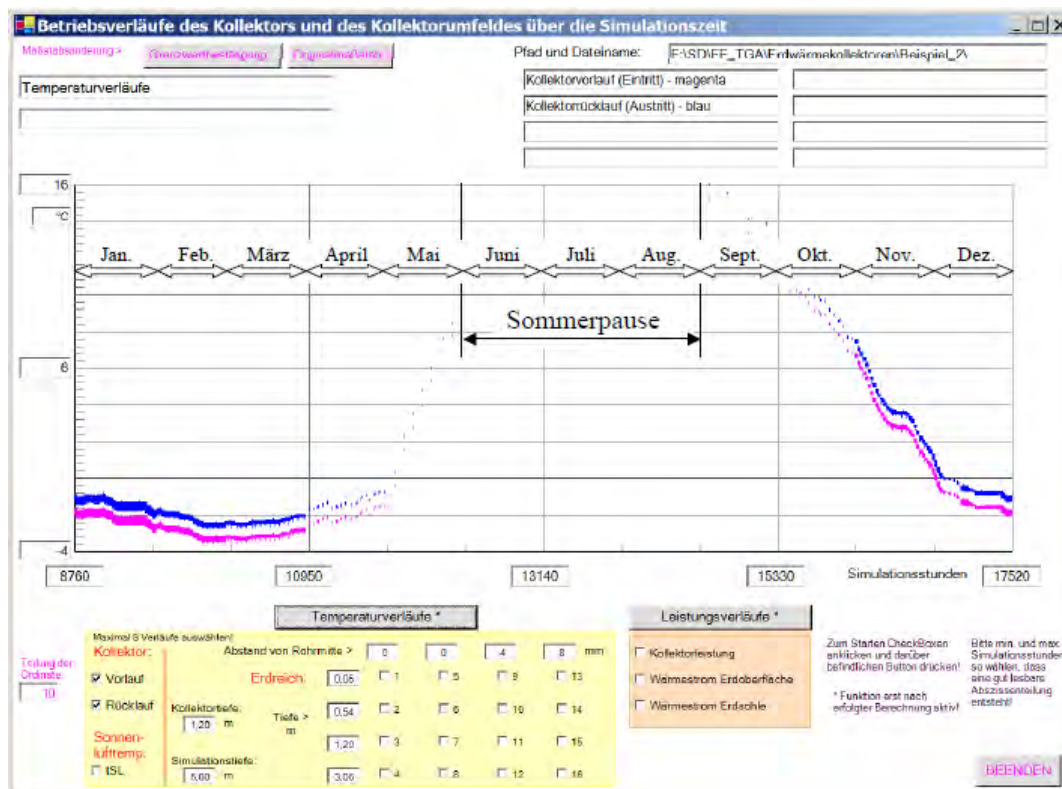


Abbildung 6-28: Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Kollektors ohne Wärmeeinspeisung im Sommer im 2. Jahr [Glü]

Dabei ist zu sehen, dass sich die Temperaturen nur in den Übergangsmonaten September und Oktober unterscheiden. In den kalten Wintermonaten gleichen sich die Temperaturen der Simulation mit Wärmeeinspeisung und der Simulation ohne Wärmeeinspeisung.

Ein Erdkollektor sollte so ausgelegt werden, dass von Ende einer Heizperiode bis zum Anfang der nächsten Heizperiode die Erde sich vollständig regeneriert hat.

6.3 Luft

Ein Luftkollektor saugt die Umgebungsluft an und führt sie als Wärmeträgermedium der Wärmepumpe zu. Die Aufstellung kann so gut wie überall erfolgen und stellt die einfachste Lösung dar, um Umweltwärme verfügbar zu machen. Luft steht überall zur Verfügung, kann unbegrenzt genutzt werden und die Nutzung erfordert kein Genehmigungsverfahren.

Zu unterscheiden ist zwischen einer Außenaufstellung und einer Innenaufstellung.

Bei einer Außenaufstellung wird die Wärmepumpe im Freien auf einem festen Untergrund aufgestellt und die Wärme für die Heizung wird über Rohre ins Gebäude transportiert.



Abbildung 6-29: Wärmepumpe mit Luftkollektor [HeVi12c]

Dabei ist zu beachten, dass die Rohre gut gedämmt und möglichst kurz gehalten werden. Weiterhin ist ein genügend großer Luftdurchsatz sicherzustellen und die kalte abgegebene Luft muss bei geringsten Windbewegungen weggeblasen werden, um zu verhindern, dass die abgegebene Luft direkt wieder eingesaugt wird (Luftkurzschluss). Der Aufstellungsort sollte die Schallemissionen des Gerätes berücksichtigen und z.B. weit genug von schützenswerten Stellen wie z.B. Schlafzimmerfenster oder Wänden, die den Schall reflektieren und somit verstärken, gewählt werden.

Eine Innenaufstellung bedeutet, dass die Wärmepumpe innerhalb des Gebäudes aufgestellt ist und über Luftkanäle mit der Außenluft verbunden ist. Da nach der EnEV die thermische Hülle eines Gebäudes nicht durchbrochen werden darf, muss die Wärmepumpe in einem Aufstellraum außerhalb der thermischen Hülle aufgestellt werden und darf keine direkte Verbindung zu den Nutzräumen haben. Die Verbindung zu Nutzräumen erhöht die Luftfeuchtigkeit, was dann zu Kondensatbildung an den Luftkanälen und Wärmepumpe führen kann. Bei solch einer Aufstellung ist ebenfalls auf eine ausreichend gute Isolierung zu achten und ein Luftkurzschluss muss vermieden werden.

Allerdings sind die Temperaturen des Mediums nicht ideal. Die Außentemperatur sinkt mit steigendem Wärmebedarf, so dass mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe die schlechtesten Jahresnutzungsgrad erzielt werden. Weiterhin wirkt sich die geringere Wärmekapazität gegenüber Wasser nachteilig auf den Betrieb aus. Damit verringert sich die Möglichkeit Wärme zu übertragen, was einen höheren Volumenstrom erforderlich macht.

Nachteilig kann ebenfalls die Geräuschentwicklung des Gebläses sein, hier kann es in dichtbesiedelten Gebieten zu Schwierigkeiten mit anderen Anwohnern kommen. Dabei gilt es die Grenzwerte der TA-Lärm bzw. DIN 18005 einzuhalten.

Vorteile eines Luftkollektors ist, dass er nicht mit einem Kältemittel betrieben werden muss. Damit entfallen mögliche Probleme bei einem Leck und auch das Befüllen vor Inbetriebnahme.

Eine Variante der Luftnutzung stellt die Nutzung von Abluft als Wärmequelle dar. Diese Systeme sind zurzeit allerdings kaum verbreitet, gewinnen aber in Gebäuden mit geringem Leistungsbedarf zunehmend an Bedeutung.

6.4 Andere Wärmequellen

Prinzipiell kann mit der Wärmepumpentechnologie jede überschüssige Wärme, die in ausreichender Menge zu Verfügung steht, genutzt werden. Dabei kann es sich um überschüssige Prozesswärme wie sie bei der Biogasproduktion oder dem Betrieb von Kläranlagen entsteht handeln oder Wärme aus der Abluft oder Abwasser.

Diese Formen der Umweltwärmegewinnung ist zurzeit aber noch eine Ausnahme oder wird wie z. B. die Bauteilaktivierung bei größeren Gebäuden eingesetzt und ist von Einzelfall zu Einzelfall verschieden zu betrachten und zu bewerten. Bei der Nutzung von Abluft oder Abwasser z.B. besteht meistens das Problem, einen ausreichenden Massendurchsatz sicherstellen zu können.

Die Kollektoren können ebenfalls jede erdenkliche Form annehmen, so gibt es Unternehmen, die sogenannte Energiezäune als Kollektoren benutzen oder anstatt eines Erdflächenkollektors korbformige Spiralkonstruktionen nutzen. In einigen Fällen wurde ein Flächenkollektor in Straßen eingebracht, um die Wärme des erhitzten Asphalts nutzbar zu machen.

Alle diese Konstruktionen sind bisher Nischenprodukte und es sind weder allgemeingültige Erfahrungen noch Vorgaben verfügbar.

6.5 Zwischenfazit

Die Wärmequelle muss nach der jeweiligen Anwendungssituation ausgewählt werden (Siehe Tabelle 6-5). Die Nutzung von Grundwasser stellt energetisch betrachtet die beste Lösung dar, allerdings gibt es hier große Schwierigkeiten mit der Genehmigung. Luft hingegen ist energetisch schlechter, allerdings können bei einer geringen benötigten Umweltwärmeleistung die Kosten und fehlende Genehmigungsverfahren einen Luftkollektor vorteilhaft machen.

Tabelle 6-5: Bewertung unterschiedlicher Wärmequellen nach Effizienz, Kosten, Aufwand und Genehmigung

	Effizienz	Kosten	Aufwand	Genehmigung
Luft	0	++	++	/
Erdkollektor	++	+	+	/
Erdsonde	+++	0	0	0
Grundwasser	+++	0	0	0

7 Praktische Auslegung von GWP-Systemen

Kleinere Anlagen können mit Hilfe der in der VDI 4640 [VDI01] angegebenen Tabellen ausgelegt werden. Bei größeren Anlagen bzw. genaueren Anforderungen ist die Verwendung eines Auslegungsprogramms anzuraten. Die Werte der Richtlinie sind vereinfachte Standardwerte und berücksichtigen zum Beispiel nicht den Einfluss, den die Sonden auf einander ausüben. Empfehlenswert ist es den sogenannten Thermal Response Test durchzuführen. Dabei wird eine definierte Wärmemenge durch den Sondenkreislauf gespeist und am Sondeneingang und Sondenausgang eine Langzeitmessung durchgeführt. Aus den gewonnenen Daten kann die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit des Bodens berechnet werden

Um eine erste Abschätzung für Sondenanlagen treffen zu können, finden sich im Internet Bohrtiefenrechner, allerdings sind die gefundenen Seiten für die Auslegung von Elektrowärmepumpen gedacht. Gaswärmepumpen erfordern nur 50-60 % der Entzugsleistung, so dass diese bequeme Lösung zurzeit nicht zur Verfügung steht.

Für eine genauere Auslegung existieren verschiedene Programme wie EED, EWS. Mit diesen Programmen kann der Effekt der Sondentiefe, Sondenanordnung, Bodenbeschaffenheit, Hinterfüllung etc. bei verschiedenem Entzug über das Jahr auf die Soletemperatur simuliert werden. Der Verlauf der Temperatur kann über den Zeitraum von mehreren Jahren bis Jahrzehnten vorausberechnet werden. So können kritische Auslegungen vorzeitig erkannt werden. Diese Programme sind auch für Elektrowärmepumpen programmiert, allerdings kann über die Eingabe der Entzugsleistung eine zumindest teilweise Anpassung auf Gaswärmepumpen erfolgen.

Vor einer Detailplanung kann eine Vorabplanung mit geologischen Daten durchgeführt werden. In den Bundesländern Bayern, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Sachsen stehen dafür geothermische Atlanten zur Verfügung.

Die Simulation von Schluck- und Saugbrunnen gestaltet sich komplizierter, da genaue Kenntnisse des Untergrundes fehlen (Fließrichtung, Fließgeschwindigkeit, Fließgefälle, Gebirgsdurchlässigkeit). Je nach Größe der Anlage und genehmigungsrechtlichen Auflagen kommen hierbei die Programme MODFLOW, FEFLOW und GED zum Einsatz. Auf diese Programme wird nicht näher eingegangen, da diese Auslegung immer einen Fachbetrieb erfordert und somit das Nutzen/Aufwands-Verhältnis der genaueren Programmbetrachtung für diese Studie nicht gegeben ist.

7.1 EED

Der Earth Energy Designer erlaubt die Eingabe von Charakteristika der Erdwärmesonden. Dabei kann sowohl die Geometrie als auch das Rohrmaterial bestimmt werden (Abbildung 7-1).

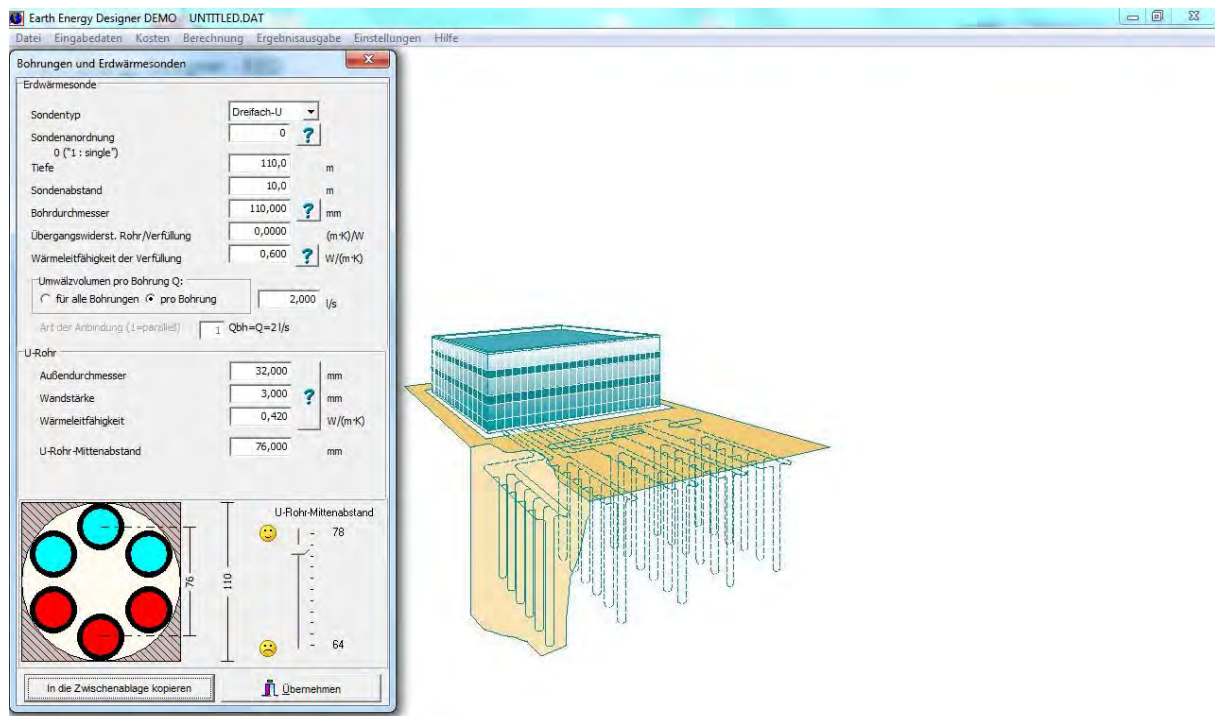


Abbildung 7-1: Einstellmöglichkeiten des Programms EED

Des Weiteren kann das Programm Angaben von Untergrundeigenschaften, den thermischen Bohrlochwiderstand, Eigenschaften der Wärmeträgerflüssigkeit verarbeiten. Außerdem kann sowohl die Grundlast und Spitzenlast angegeben werden. Die Grundlast kann als Betrag oder Anteil in das Programm eingegeben werden.

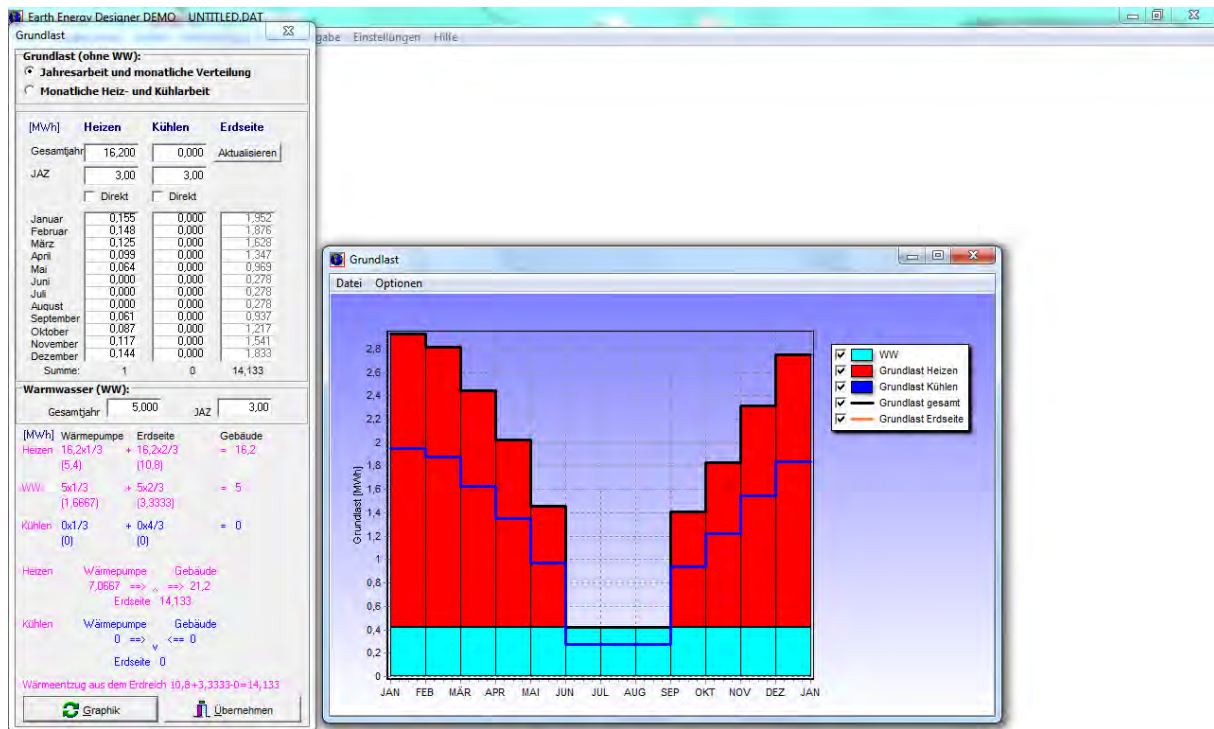


Abbildung 7-2: Ergebnisgrafik des Programms EED

Das Programm erlaubt sowohl die Eingabe von Heizlasten als auch von Kühllasten. Neben den anlagespezifischen Parametern kann auch die Kostenseite durch das Programm betrachtet werden, dazu können die Bohrungskosten eingegeben werden. Als Berechnungsergebnis kann die mittlere Fluidtemperatur oder auch die erforderliche Bohrungstiefe ausgegeben werden.

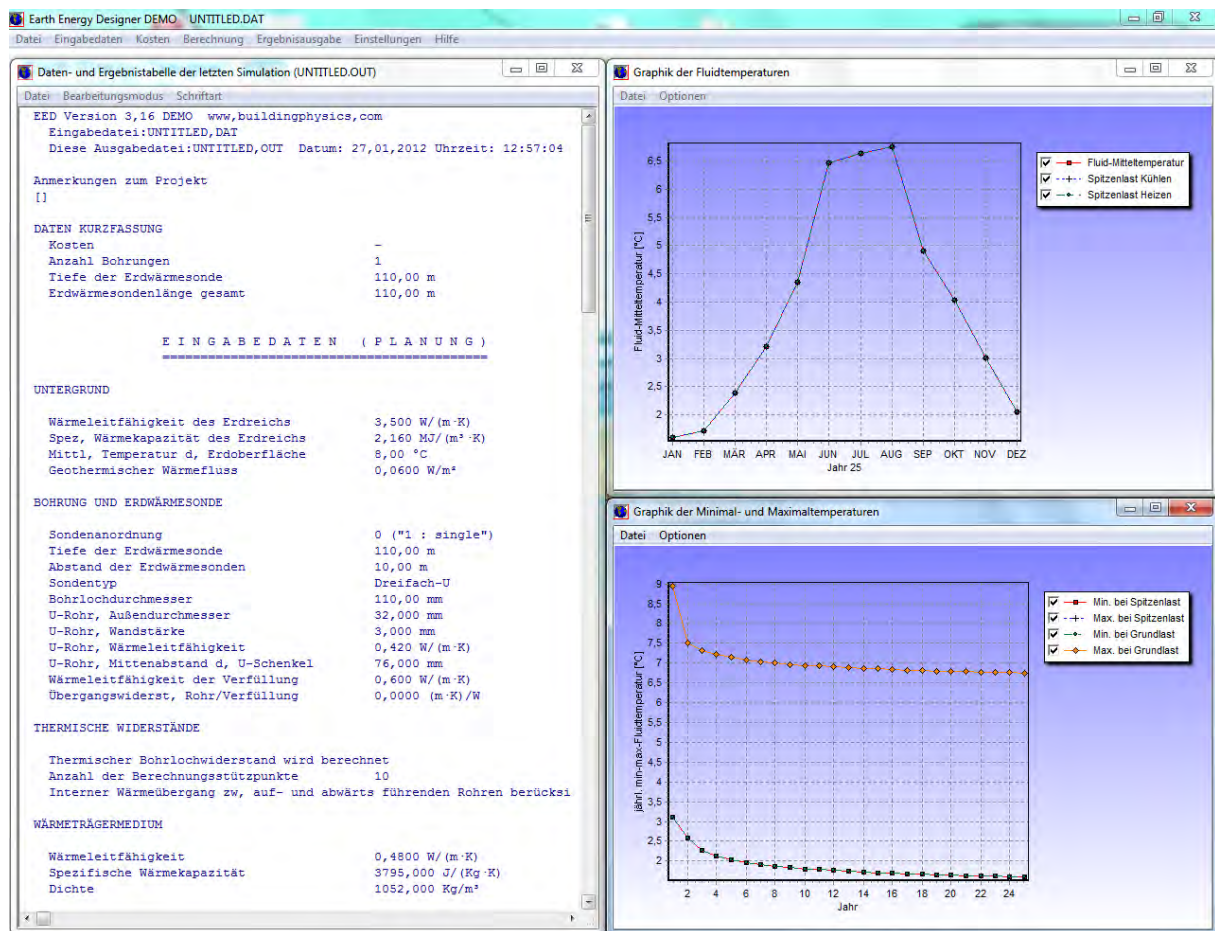


Abbildung 7-3: Ergebnisgrafik des Programms EED

Neben der Berechnung einer vorgegebenen Sondenanlage kann mit dem Programm auch eine Sondenanlage optimiert werden. Dabei kann sowohl die Sondenlänge als auch die Anordnung automatisch variiert werden. Im Programm sind bestimmte Sondenanordnungen wie Linie, Rechteck, U-Form oder L-Form in verschiedenen Ausführungen hinterlegt. Mit einem vorgegebenen Sondenabstand können so die meisten denkbaren Anordnungsformen durchgerechnet werden.

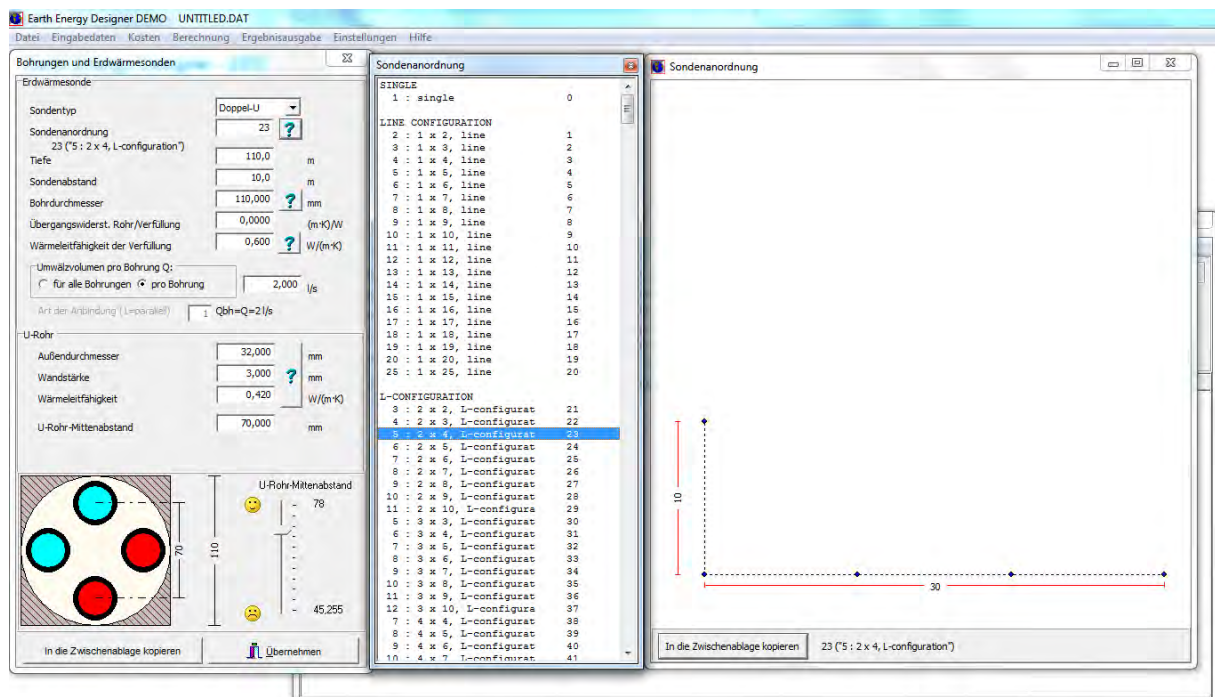


Abbildung 7-4: Mögliche Sondenanzordnungen des Programms EED

Das Programm verfügt über keine Auswahlmöglichkeiten zwischen Elektrowärmepumpe und Gaswärmepumpe, diese Unterscheidung müsste über Anpassungen der Randparameter geschehen.

7.2 EWS

Der Erdwärmesimulator wurde von der Firma Huber Energietechnik in Zürich im Auftrag des Bundesministeriums für Energie entwickelt. Die Grundversion ist für 1.500 Fr. und die Vollversion ist für 3.000 Fr. erhältlich.

Mit dem Programm ist es möglich, eine Sondenanlage zu simulieren. Dabei kann die Geometrie der einzelnen Sonden und des Sondenfeldes sowie die Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials vorgegeben werden.

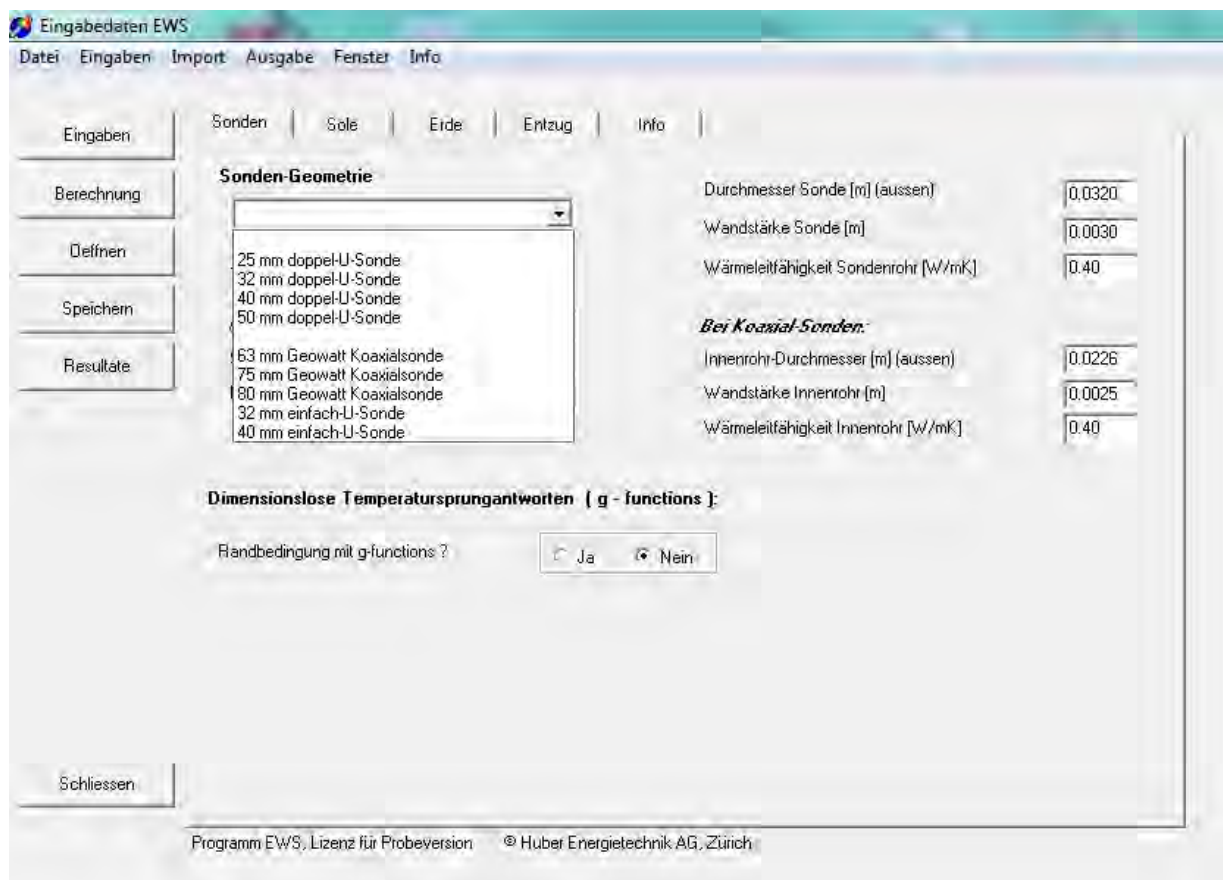


Abbildung 7-5: Einstellmöglichkeiten des Programms EWS bei der Sondenbeschaffenheit

Neben den Sondeneigenschaften erlaubt das Programm auch, dass Sole und Erdreich mit entsprechenden Stoffwerten belegt werden.

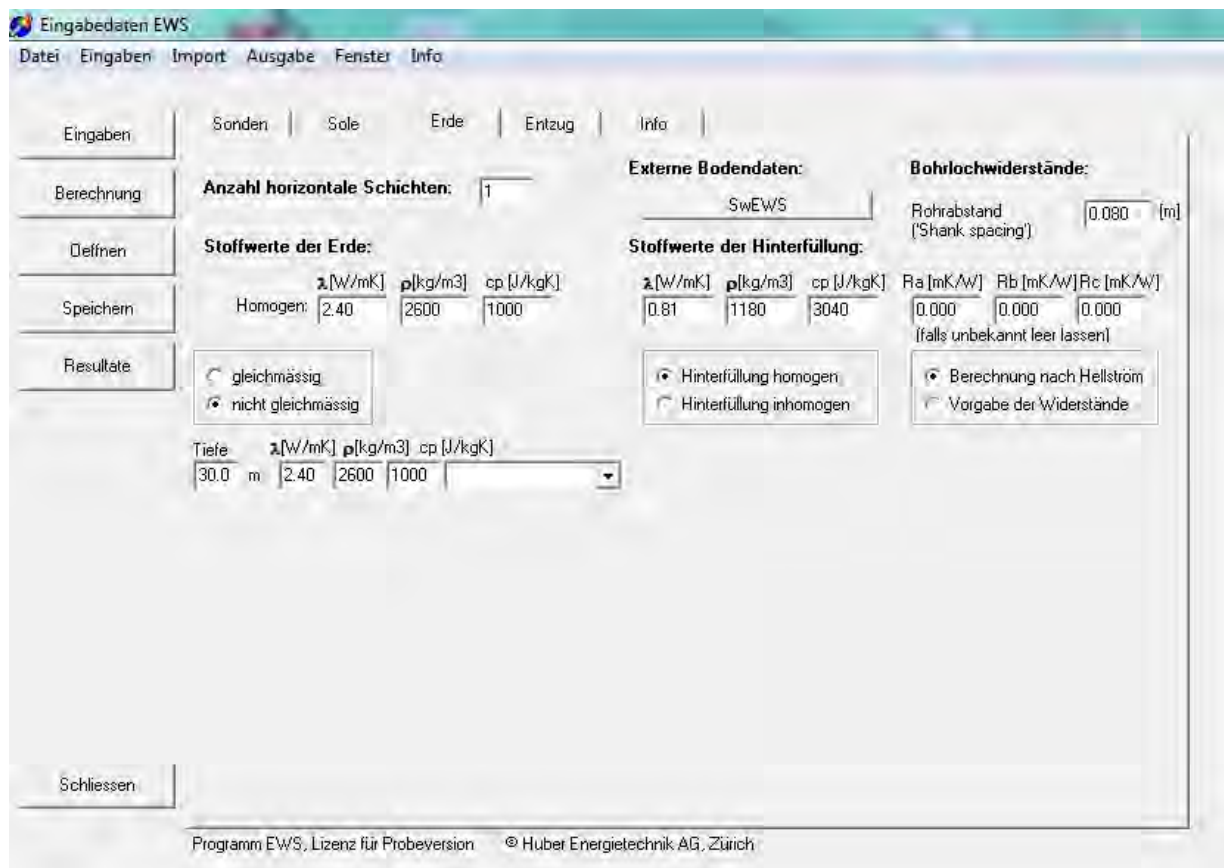


Abbildung 7-6: Einstellmöglichkeiten des Programms EWS bei der Bodenbeschaffenheit

Die Entzugsleistung kann über eine Laufzeit angegeben werden oder direkt die monatliche Kilowattstunde eingetragen werden. Dabei ist es auch möglich über einen negativen Betrag eine Kühlung in die Berechnung zu integrieren. Es wird dabei auch zwischen der Entzugsleistung bei Heizbetrieb und der Entzugsleistung bei Kühlbetrieb unterschieden. Nähere Angaben sollen auch zum Dauerbetrieb Ende Februar gemacht werden. Das ist dahingehend wichtig, als das zu diesem Zeitpunkt nach einer langen Entzugsperiode immer noch eine große Entzugsleistung zur Verfügung gestellt werden muss.

The screenshot shows the 'Eingabedaten EWS' (Input Data EWS) software interface. It features a menu bar (Datei, Eingaben, Import, Ausgabe, Fenster, Info) and a sidebar with buttons for 'Eingaben', 'Berechnung', 'Definieren', 'Speichern', and 'Resultate'. The main window is divided into tabs: 'Sonden', 'Sole', 'Erde', 'Entzug', and 'Info'. The 'Entzug' tab is active, displaying several configuration options:

- Neues Lastprofil mit den folgenden Werten erzeugen?** (bei 'nein' werden die Daten aus dem Eingabefile übernommen) with radio buttons for 'Ja' and 'Nein'.
- Definition des Lastprofils mit monatlicher Entzugsenergie?** (bei 'nein' muss die tägliche Sondenlaufzeit vorgegeben werden) with radio buttons for 'Ja' and 'Nein'.
- tägliche Sondenlaufzeit oder monatliche Entzugsenergie (minus bei Kühlung):** A table for monthly values:

Monat	Wert [kWh]
im Januar	372
im Februar	334
im März	279
im April	210
im Mai	93
im Juni	60
im Juli	62
im August	62
im September	90
im Oktober	217
im November	270
im Dezember	341
- Entzugsleistung / Einspeisleistung in Sonden:**
 - Entzugsleistung Sonden bei Heizbetrieb [kW]: 1.0 (positives Vorzeichen)
 - Einspeisleistung Sonden bei Kühlbetrieb [kW]: 1.0 (positives Vorzeichen)
 - Dauerbetrieb der Sonden Ende Februar (Tage): 2
 - Entzugsleistung im Dauerbetrieb [kW]: 1.00 (Spitzenwert Februar)
- Simulationsdauer:** Simulationsdauer [Jahre]: 3 (Maximal 60 Jahre)
- Freecooling:** Freecooling bei neg. Entzugsleistung with radio buttons for 'Ja' and 'Nein'.
- Sondenrücklauf:** 20.00 °C

At the bottom, it states 'Programm EWS, Lizenz für Probeversion © Huber Energietechnik AG, Zürich'.

Abbildung 7-7: Einstellmöglichkeiten des Programms EWS zum Entzug

Im Gegensatz zum Earth Energy Designer sind keine Optimierungsmöglichkeit und kein Verlauf gegeben. Es werden Kenngrößen zum Verhalten der Wärmepumpe gegeben, allerdings ist das Programm ebenfalls für Elektrowärmepumpen gedacht, so dass Randbedingungen und Ergebnisse an eine Gaswärmepumpe angepasst werden müssen.

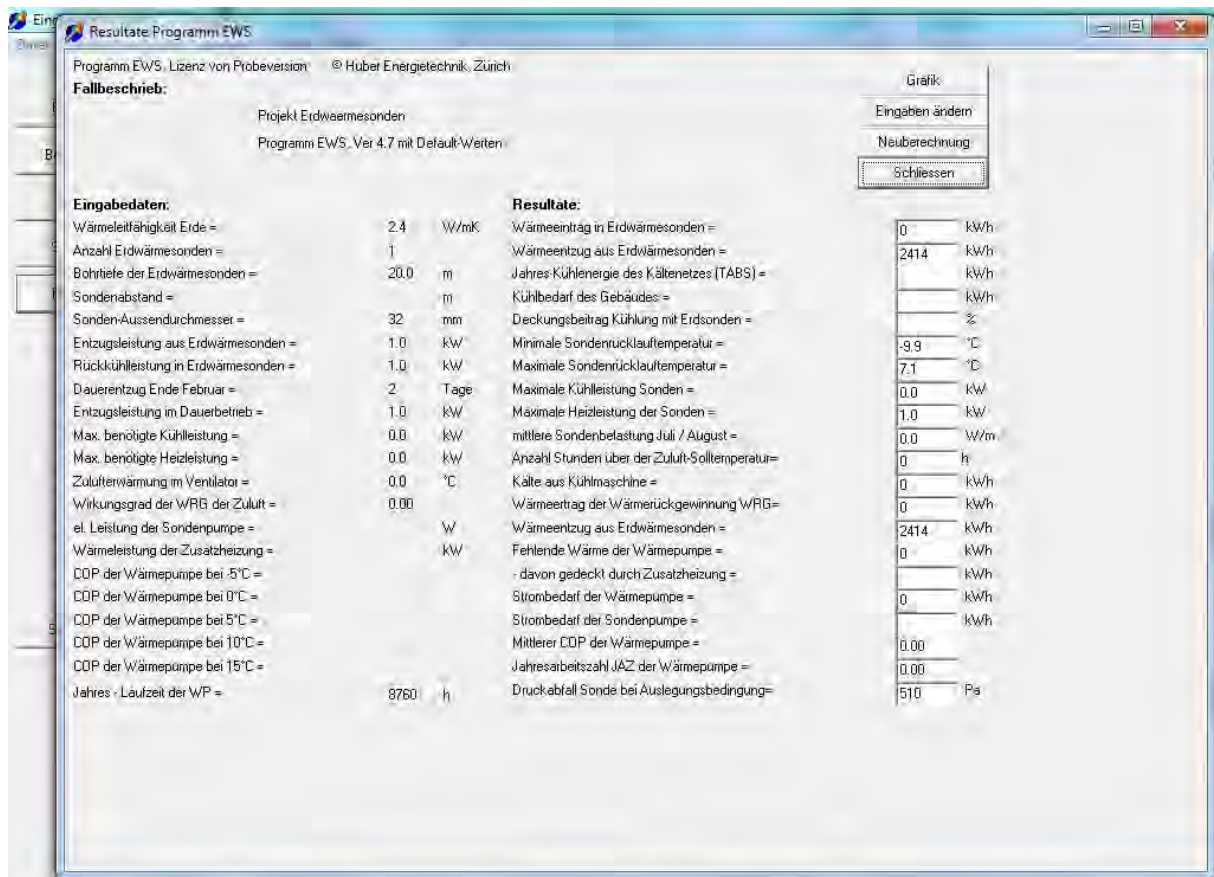


Abbildung 7-8: Ergebnisdarstellung des Programms EWS

8 Normen- und Regelwerk

8.1 Bestimmungen in Deutschland

Die erste Unterteilung der Wärmequellen kann zwischen geothermischer und nicht-geothermischer Nutzung getroffen werden. Luft und Solar als Umweltwärmequelle fallen unter den nicht-geothermischen Teil und sind nicht genehmigungspflichtig. Bei Luftkollektoren muss allerdings beachtet werden, dass die entstehenden Schallemissionen die gesetzlichen Grenzwerte nicht überschreiten. Die jeweiligen Grenzwerte der DIN 18005 und TA Lärm/VDI 2058 sind im Anhang zu finden.

Geothermie ist in Deutschland unterteilt nach oberflächennaher und tiefer Geothermie. Tiefe Geothermie fängt ab einer Teufe von 100 m an. Sie gilt als bergfreier Bodenschatz und für ihre Nutzung ist in jedem Fall ein bergrechtliches Verfahren durchzuführen. Bis zu einer Teufe von 100 m spricht man von oberflächennaher Geothermie und die Nutzung ist nicht eindeutig geregelt. Hier ist die jeweilige Verwaltungspraxis der Länderbergbehörden zu befolgen. Diese Unterscheidung gilt primär für Erdsonden, wobei die meisten Erdsonden in einem Bereich von 80 – 100 m verbaut sind. Tiefergehende Sonden oder Brunnen werden meist für industrielle Zwecke (Stromerzeugung/Fernwärme) genutzt.

Bei einem Betrieb mit Erdwärmesonden wird Grundwasser weder entnommen noch eingeleitet, allerdings kann durch die thermischen Einflüsse ein wasserrechtlicher Benutzungstatbestand vorliegen. Deshalb sollte jedes Vorhaben der unteren Wasserbehörde angezeigt und geprüft werden. Ungeachtet dessen ist eine Erdwärmesondenbohrung gemäß dem BBergG der zuständigen Bergbehörde des jeweiligen Bundeslandes anzuzeigen. Eine Bohrung über 100 m Teufe kann betriebsplanpflichtig sein, dies wird im Einzelfall durch die Bergbehörde festgestellt.

Erdwärmekollektoren werden in nur 1 m – 2 m Tiefe verlegt und sind nur von wasserrechtlicher Relevanz, wenn sie bei geringen Grundwasserständen verbaut werden und sind dann anzeigepflichtig. Erdwärmekollektoren ohne Kontakt zum Grundwasser und einem Mindestabstand von 1 m zum höchsten Grundwasserstand und außerhalb von Wasserschutzgebieten können anzeigefrei errichtet werden. Es wird jedem Planer empfohlen, die Machbarkeit des geplanten Vorhabens mit der zuständigen unteren Verwaltungsbehörde abzustimmen.

Die Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle durch eine Brunnenanlage beinhaltet die Entnahme und die Einleitung mit geänderter Temperatur, es ist in jedem Fall eine wasserrechtliche Genehmigung nach dem Wasserhaushaltsgesetz erforderlich.

8.1.1 Bestimmungen der einzelnen Bundesländer

Fast jedes Bundesland hat einen Leitfaden für die Nutzung von geothermischer Energie herausgegeben, in dem die Regelungen für die Errichtung einer Wärmepumpenanlage zusammengefasst sind. Bremen und Thüringen geben nur eine Checkliste aus. Allerdings legen einige dieser Leitfäden das Hauptaugenmerk auf Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren werden, wenn überhaupt, nur am Rande erwähnt.

Tabelle 8-1: Übersicht über die Leitfäden der einzelne Bundesländer

Bundesland	Erdwärmesonden	Erdwärmekollektoren
Baden-Württemberg	Eigener Leitfaden	Eigener Leitfaden
Bayern	x	x
Berlin	Ein Leitfaden, Schwerpunkt Sonden	
Brandenburg	Ein Leitfaden, Schwerpunkt Sonden, kurze Behandlung von Grundwasser, Bauteilaktivierung und Tiefengeothermie	
Bremen	Einseitiges Dokument zu Erdwärmesonden	Kein Dokument verfügbar
Hamburg	Ein Leitfaden, Schwerpunkt Sonden	
Hessen	Ein Leitfaden, Schwerpunkt Sonden	
Mecklenburg-Vorpommern	x	x
Niedersachsen	Ein Leitfaden, Schwerpunkt Sonden, kurze Behandlung von Grundwasser	
Nordrhein-Westfalen	Ein Leitfaden, Schwerpunkt Sonden, kurze Behandlung von Grundwasser	
Rheinland-Pfalz	Eigener Leitfaden	Kein Leitfaden => Standardauflagen als Dokument verfügbar
Saarland	Ein Leitfaden, Schwerpunkt Sonden	
Sachsen	Eigener Leitfaden	Kein Leitfaden
Sachsen-Anhalt	x	x
Schleswig-Holstein	Ein Leitfaden, Schwerpunkt Sonden	
Thüringen	x	x

Baden Württemberg hat jeweils für Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren einen eigenen Leitfaden veröffentlicht (Vergl. Tabelle 8-1).

Die Errichtung von Erdwärmesonden oder Erdwärmekollektoren ist in Wasserschutzgebieten der Klassen I und II nicht zulässig. Bei Errichtung in Gebieten mit einer anderen Wasserschutzklasse sind verschiedene Bedingungen zu erfüllen. Für Erdwärmesonden, soweit in den Leitfäden erwähnt, wird der Einbau eines bauteilgeprüften Druckwächters gefordert. Im Falle einer Leckage der Sonde bzw. des Kollektors wird dadurch die Pumpe umgehend abgeschaltet und verhindert, dass Wärmeträgerflüssigkeit heraus gepresst wird. Weiterhin soll der Druckwächter im Falle einer Leckage durch ein Warnsignal auf die Störung im Betrieb hinweisen. In Baden Württemberg wird bei einer Verwendung von wassergefährdenden Wärmeträgerflüssigkeiten zusätzlich gefordert, dass sich unter dem Erdwärmekollektor eine 1 m dicke sehr schwach durchlässige Schicht oder eine 2 m dicke schwach durchlässige Schicht befindet. Diese Schicht kann auch nachträglich eingebracht werden, wobei zu beachten ist, dass nur natürliche mineralische Verbindungen oder Bentonitplatten verwandt werden dürfen. Der Einsatz von Folien ist nicht zulässig.

Zur Wartung ergibt sich kein bundeseinheitliches Bild, so verlangt das Bundesland Berlin zum Beispiel eine Wartung all fünf Jahre durch einen Fachbetrieb, während Hamburg nur die Empfehlung für eine jährliche Wartung ausspricht (Siehe Tabelle 8-2).

Tabelle 8-2: Übersicht über die Wartungs-/Kontrollintervalle in den verschiedenen Bundesländern

Bundesland	Wartungs-/Kontrollintervall
Baden-Württemberg	Monatliche Kontrolle (Sonden); alle drei Monate Kontrolle (Kollektoren)
Bayern	x
Berlin	Alle 5 Jahre durch einen Fachbetrieb
Brandenburg	Keine Angabe
Bremen	x
Hamburg	Jährliche Wartung empfohlen
Hessen	Regelmäßige Prüfung durch den Betreiber
Mecklenburg-Vorpommern	x
Niedersachsen	Keine Angabe
Nordrhein-Westfalen	Regelmäßige Wartung (etwa alle zwei Jahre) durch eine fachkundige Person
Rheinland-Pfalz	Mindestens alle drei Monate Kontrolle durch den Betreiber
Saarland	Vorgeschriebener Wartungsvertrag über alle 5 Jahre (Sonden)
Sachsen	Keine Angabe
Sachsen-Anhalt	x
Schleswig-Holstein	Monatlich Kontrolle Druckwächter (Sonden)
Thüringen	x

Weiterführend sind aber Angaben zu der Stilllegung von Erdwärmekollektoren/-sonden gemacht. Bei einer Stilllegung muss die Wärmeträgerflüssigkeit komplett abgepumpt werden und die Rohre mit geeigneten Materialien verpresst und verschlossen werden. [Nie06] [RP07] [Ha09] [Ber10] [BaWü08] [NRW04] [He07] [Bra09] [SW06] [BaWü05] [Saa08] [Sac07] [Bre]

8.2 Europaweite Bestimmungen

Der Anwendungsbereich der zurzeit geltenden „Richtlinie 90/396/EWG des Rates vom 29. Juni 1990 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Gasverbrauchseinrichtungen“ [Gasgeräte-Richtlinie] umfasst Geräte, die zum Kochen, zum Heizen, zur Warmwasserbereitung, zu Kühl-, und Beleuchtungs- oder Waschzwecken verwendet und mit gasförmigen Brennstoffen bei einer normalen Wassertemperatur von gegebenenfalls nicht mehr als 105°C betrieben werden. [...]“ Damit gilt sie auch für Gaswärmepumpen und muss bei Inverkehrbringen solcher beachtet werden.

Weitere europäische Bestimmungen sind (2007/742/EG), diese Kommissionsentscheidung beschäftigt sich mit den Anforderungen an Elektro-, Gasmotor- oder Gasabsorptionswärmepumpen für die Vergabe des EU-Umweltzeichens, und die Verordnung Nr. 1516/2007, die sich mit der Dichtheit von Wärmepumpen, die als Kältemittel fluorierte Kohlenwasserstoffe einsetzen, befasst.

Je nach verwendetem Kältemittel ist das entsprechende Sicherheitsdatenblatt zu beachten, darüber sind die sicherheitstechnischen und umweltrelevanten Anforderungen der Euronorm EN 378 zu erfüllen.

Die Suche nach Bestimmungen europaweit gestaltete sich aufgrund der unterschiedlichen Amtssprachen als schwierig. Das Hauptaugenmerk wurde auf die deutschsprachigen DACH-Länder gelegt, darüber hinaus wurde England und Schweden, als großer (Elektro)-Wärmepumpenmarkt näher betrachtet. Informationen zu anderen europäischen Ländern stammen aus Drittquellen und für die Richtigkeit kann keine Gewähr gegeben werden.

Auf europäischer Ebene gibt es von der European Heat Pump Association (EHPA) aus die Möglichkeit für Installateure ein Zertifikat für die Installation von Wärmepumpe zu machen. Dieses bezieht sich allerdings auf Elektrowärmepumpen, daran beteiligen sich zurzeit Installateure aus Österreich, Belgien, Tschechien, Finnland, Frankreich, Deutschland, Portugal, Slowakei, Schweden und Großbritannien.

8.2.1 Österreich

Die Installation von Gaswärmepumpen hat in Österreich nach „Technische Richtlinie für Errichtung und Änderung von Niederdruck-Gasanlagen“ (TR Gas) des ÖVGW zu erfolgen. In dieser Richtlinie sind zugleich die Anforderungen an den Brandschutz geregelt.

Wichtig für Wärmepumpenanlagen ist die ÖNORM 7755 Teil 1 – 3.

Für die Kältemittel gilt europaweit und somit auch in Österreich die EN 378, sowie die entsprechenden Sicherheitsdatenblätter.

Bei einer Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle ist eine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich. Die Errichtung ist per Anzeigeverfahren (Wasserrechtsnovelle) geregelt und eine Bewilligung gilt für 25 Jahre. Zuständig für die Bewilligung ist die jeweils zuständige Bezirksverwaltungsbehörde. Dabei sind Planungsunterlagen, technische Beschreibungen und eine hydrologische Standortbeurteilung vorzulegen. Die genauen erforderlichen Unterlagen sind bei der zuständigen Bezirksbehörde zu erfragen.

Eine Einbringung von Flach- und Erdkollektoren erfordert innerhalb von Grundwasserschutzgebieten eine wasserrechtliche Bewilligung, diese wird ebenfalls bei der Bezirksverwaltungsbehörde beantragt. Dabei sind Planunterlagen und technische Daten vorzulegen. Welche Unterlagen im Detail benötigt werden, soll bei der zuständigen Bezirksbehörde erfragt werden. Bei einer Tiefenbohrung besteht außerhalb eines Wasserschongebiets lediglich eine Anzeigepflicht bei der zuständigen Bezirkshauptmannschaft. Innerhalb eines Wasserschongebiets ist eine wasserrechtliche Genehmigung notwendig. Für weitere Informationen wird auf die zuständige Bezirkshauptmannschaft verwiesen.

Wärmepumpen mit Luftkollektoren benötigen keine behördliche Genehmigung, allerdings wird darauf aufmerksam gemacht, dass auf eine mögliche Lärmbelästigung der Nachbarn zu achten ist. [Kä09] [OÖ11]

8.2.2 Schweiz

In der Schweiz muss bei einer Installation das Regelwerk für Gasinstallation [...] (G1) des SVGW beachtet werden. Die Raumanforderungen bezüglich des Brandschutzes sind in den Gasleitsätzen des SVGW und in den kantonalen Brandschutzrichtlinien geregelt. Das Regelwerk ist an die Technische Regel für Gasinstallation des DVGW angelehnt.

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) der Schweiz hat eine Vollzugshilfe herausgegeben, in der Bewilligungskriterien und Entscheidungshilfen aufgeführt werden. Davon ausgenommen ist tiefe Geothermie. Die Genehmigung ist schlussendlich auf kantonaler Ebene einzuholen. [CH09]

Tabelle 8-3: Genehmigungspflicht für versch. Erdkollektoren im Schweizer Recht

	üB ³	A _U	Z _U ¹	Areal	S3	S2	S1
Erdwärmesonden	+	b		-	-	-	-
Erdregister und Wärmekörbe	+	+ ⁴		- ^{2/4}	- ^{b/5/4/7}	-	-
Energiepfähle und ähnliche thermoaktive Elemente	+	b		- ^{2/4}	- ^b	-	-
Entnahmebrunnen und Versickerungsbauwerke für die Nutzung von Grundwasser zu Heiz- und Kühlzwecken	+	b		-	-	-	-
Koaxialbrunnen	-	-		-	-	-	-

Die Wasserschutzzonen sind Zone S1 (Fassungsbereich), die sich über Grundwassererfassungen und – anreicherungsanlagen sowie deren unmittelbare Umgebung erstreckt. S2 (engere Schutzzone) wird so definiert, dass die Fließdauer des Grundwassers vom äußeren Rand der Zone S2 mindestens zehn Tage bis zur Grundwasserfassung oder –anreicherungsanlage beträgt. Die weitere Schutzzone S3 liegt um Zone S2 und muss mindestens so groß sein, wie der Abstand von S1 bis zum äußeren Rand der Zone S2.

In der Zone A_U dürfen keine Anlagen errichtet werden, die eine Gefahr für das Gewässer darstellen, außerdem darf keine Anlage erstellt werden, die unter dem mittleren Grundwasserspiegel liegt. Ausnahmen sind möglich. Z_U ist der Zuströmbereich; üB sind übrige Bereiche, die nicht von der bisherigen Einteilung erfasst wurden. Areal sind Flächen, die zukünftig als eine der Wasserschutzzone klassifiziert werden

Bedeutung der Zeichen und Indices (Tabelle 8-3)

+ Aus hydrogeologischer Sicht unproblematisch. Keine Bewilligung nach Art. 32 GSchV erforderlich; die Einhaltung sämtlicher weiterer Vorschriften bleibt vorbehalten.

b kann fallweise durch die zuständige Behörde zugelassen werden. Bewilligung nach Art. 32 GSchV erforderlich

+^b Grundsätzlich unproblematisch. Bewilligung nach Artikel 32 GSchV erforderlich

- Nicht zugelassen

^{-b} Nicht zugelassen; die zuständige Behörde kann nach Prüfung des Einzelfalls Ausnahmen bewilligen

¹ Im Zuströmbereich Z_U gelten die von den Kantonen für die jeweiligen Z_U verfügbaren spezifischen Schutzmassnahmen. Zudem gelten die Bestimmungen und Nutzungsbeschränkungen der jeweils überlagerten Gewässerschutzbereiche oder Schutzzonen. Ist in Karst- und Kluftgesteinsgebieten ein Zuströmbereich an Stelle einer Zone S3 ausgeschieden worden, so gelten die Bestimmungen für die Zone S3, ausser für die Materialausbeutung und die Wärmenutzung aus Boden und Untergrund.

² Die zuständige Behörde kann in Ausnahmefällen die Bewilligung zur Erstellung einer Baute oder Anlage in der künftigen Zone S3 erteilen, wenn Lage und Ausdehnung der künftigen Grundwasserschutzzonen aufgrund hydro- geologischer Abklärungen bereits festgelegt sind. Bei ausnahmsweise bewilligten Bauten oder Anlagen gelten die Nutzungsbeschränkungen der zukünftigen Zonen (Anh. 4 Ziff. 23 Abs. 2 GSchV).

³ Den Kantonen wird empfohlen, die Bewilligungspflicht auch auf den Bereich üB auszudehnen.

⁴ Abstand zum höchstmöglichen Grundwasserspiegel mindestens 2 m.

⁵ Keine Direktverdampferanlagen. Flüssigkeitsverluste müssen leicht erkannt werden können.

⁶ Das Gefährdungspotential von Koaxialbrunnen (halboffene Systeme) ist in Bezug auf das Grundwasser extrem hoch. Zum Gefährdungsbild der direkten Grundwassernutzung kommt wegen der fehlenden Abdichtung entlang der Bohrung die Schaffung von neuen vertikalen Wegsamkeiten hinzu, dessen Verlauf nicht kontrollierbar ist. Bei Koaxialbrunnen muss durch geophysikalische und hydrogeologische Tests der Nachweis erbracht werden, dass keine Zu- und Wegflüsse in das bzw. aus dem Bohrloch auftreten können. Sonst sind sie grundsätzlich nicht zulässig.

⁷ Liegen Erdregister und Wärmekörbe nicht im Untergrund, sondern im Boden, ist eine Bewilligung in der Zone S3 grundsätzlich möglich.

Es wird den Kantonen vom BAFU empfohlen, auch die übrigen Bereiche (üB) zu reglementieren.

In der Schweiz dürfen nur vom Umweltministerium BAFU freigegebene Kältemittel verwendet werden, eine Aufstellung findet man in der BAFU-Vollzugshilfe „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund“. Weiterhin ist auch in der Schweiz für die Kältemittel die EN 378 und die zugehörigen Sicherheitsdatenblätter zu beachten.

Bei einer Stilllegung ist die Wärmeträgerflüssigkeit komplett abzupumpen und bei Sondenanlagen sind die Rohre mit aushärtendem Material zu verpressen. Im Anhang sind weiterhin Anforderungen an die Hinterfüllung von Erdwärmesonden angegeben. Erdregister sind mit einem Druckwächter zu versehen und eine regelmäßige Wartung (kein Zeitraum angegeben) ist vorgeschrieben.

Zu den Vorgaben für die Anlage sind weiterhin ein erklärender Teil und ein formaler Teil mit enthalten. Der erklärende Teil beschäftigt sich mit der Wirkungsweise von Wärmepumpen und verschiedenen Wärmequellen. Der formale Teil enthält Genehmigungsformulare und Planungsunterlagen für Wärmepumpenanlagen.

Neben der BAFU-Praxishilfe, die die Belange bezüglich des Gewässerschutzes regelt, ist die SIA-Norm 384/6 das zweite entscheidende Dokument für die Planung und Ausführung von Erdsonden. Dabei ist zu beachten, dass sich diese Norm nur auf Sonden bezieht und Erdkollektoren außen vor lässt. Es werden Projektierung, Berechnung, Anforderungen an Material und Konstruktion, die Ausführung und der Betrieb und Wartung behandelt. Als Anhänge sind Protokolle zu Bohrung, Prüfung und Abnahme enthalten. Weiterhin beschäftigt sich ein normativer Anhang mit den erforderlichen Prüfungen. Als rein informative Anhänge sind Angaben zu Kennwerten, allgemeine Projektierungshinweise und Ausführung der Bohrung sowie Angaben zur Ausrüstung des Bohrunternehmens zu finden. [CH09]

8.2.3 England

In England, Schottland und Wales sind Wärmepumpen mit Erdkollektoren (sowohl Sonde als auch Flächenkollektor) generell erlaubt. Allerdings wird empfohlen bei den lokalen Behörden nachzufragen, um Schwierigkeiten zu vermeiden bzw. die Erfüllung der Kriterien zu bestätigen oder die zusätzlichen Bestimmungen bei Errichtung einer Wärmepumpenanlage in geschützten Bauzonen (conservation areas) zu erfüllen.

Bei Wärmepumpen mit Luftkollektoren hingegen müssen bestimmte Bedingungen befolgt werden.

- Einhalten eines vorgegebenen Planungsschemas³
- Volumenstrom der angesaugten Luft kleiner 0,6 m³/h
- Aufrüstung durch zusätzliche Luftkollektoren ist genehmigungspflichtig
- Abstand von einem Meter zur Grundstücksgrenze
- Installation auf Spitzdächern ist nicht erlaubt, bei Installation auf einem Flachdach muss der Kollektor ein Meter vom Rand installiert werden
- die Wärmepumpe darf nur für Heizzwecke benutzt werden

[DECC]

8.2.4 Schweden

Schweden verfügt sowohl über eine Zertifizierung von Geräten und Bohrungen als auch über eine Zertifizierung der Installateure. Bei einer nicht zufriedenstellenden Installation gibt es für den Endkunden die Möglichkeit bei der nationalen Behörde für Verbraucherbeschwerden (*Allmänna reklamationsnämnden, ARN*) eine Beschwerde

³ www.microgenerationcertification.org

einzureichen. Die autorisierten Installateure haben sich verpflichtet den Empfehlungen dieser Behörde zu folgen.

Für die Installation einer Luft-Wärmepumpe gibt es keine gesetzliche Regelung, es wird nur auf die mögliche Lärmbelastigung durch den Ventilator hingewiesen.

Für eine Wärmepumpe, die als Wärmequelle eine Erdwärmesonde oder Kollektoren in Erdreich oder See nutzt, ist eine Erlaubnis erforderlich. Diese Erlaubnis wird auf städtischer Ebene durch die Umwelt- und Gesundheitsbehörde erteilt.

Im Gegensatz zu Deutschland wird in Schweden keine Verpressung der Sondenbohrung gefordert. Der Wärmeübergang zwischen Sonde und Erdreich wird über eine Füllung mit Grundwasser hergestellt. [SWE1] [SWE2]

8.2.5 Drittländer

In den **Niederlanden** fällt die Geothermie unter das Bergrecht und ist als im Untergrund vorhandene und aus natürlichen Ursachen entstandene Wärme definiert. Für Anlagen die kein Grundwasser entnehmen gibt es keine Regelung, bei Grundwasserentnahme muss das Grundwasser-Gesetz befolgt werden. Das Grundwasser-Gesetz sieht folgende Einteilung vor

- bis 10 m³/h nur Anzeige und Registrierung
- mehr als 10 m³/h Genehmigung und Abschätzung der Umwelteinflüsse erforderlich
- bei mehr als 1.500.000 m³/Jahr Prüfung, ob eine Umweltverträglichkeitsprüfung notwendig ist
- bei mehr als 3.000.000 m³/Jahr ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung immer notwendig

Die Genehmigung erfolgt auf Provinzebene. [GeoN09]

Polen regelt die hydrothermale Geothermie über das Gesetz für Bergbau und Geologie. Dabei können durch Konzessionsabgaben oder Ähnliches hohe Kosten entstehen, die bis zu 20-30 Prozent des geothermischen Wärmepreises betragen können. Erdwärmekollektoren werden über das Baurecht geregelt. [GeoN09]

In **Portugal** wird nur die tiefe Geothermie gesetzlich erfasst, für die oberflächennahe Geothermie gibt es nur im Falle einer Grundwasserentnahme schwache Regelungen. [GeoN09]

Rumänien sieht Geothermie als Bodenschatz an und erfasst sie über das Berggesetz. Nutzung muss vom Staat konzessioniert werden, allerdings ist oberflächennahe Geothermie nicht mit einbezogen. [GeoN09]

Irland regelt die geothermische Energie rechtlich nicht, lediglich Eingriffe in den Grundwasserhaushalt sind genehmigungspflichtig. Im Rahmen des Förderprogramms „Greener Homes“ (2006-?) existieren Regelungen zu Qualitätssicherung und Umweltschutz, allerdings sind diese nur relevant für die Bewilligung von Fördergeldern. [GeoN09]

9 Normen und Richtlinien

In Deutschland existiert zurzeit die VDI 4650 für die energetische Bewertung von Gaswärmepumpen. Dabei gilt das erste Blatt für die Bewertung von Elektrowärmepumpen und Blatt zwei für Gaswärmepumpen. Hierbei ist zu beachten, dass das zweite Blatt dabei nur für gasbetriebene Sorptionspumpenanlagen gilt. Erfasst sind dadurch allerdings auch Gaswärmepumpen mit einem zusätzlichen Brennwertgerät. Für eine Bewertung von gasmotorisch angetriebenen Wärmepumpen ist diese Richtlinie allerdings nicht gedacht.

Mit dieser Richtlinie ist es möglich einen Nutzungsgrad und eine Heizzahl zu berechnen, so dass Gaswärmepumpenanlagen sowohl mit herkömmlichen Gasheizgeräten als auch mit Elektrowärmepumpen verglichen werden können.

Diese Richtlinie bezieht sich auf ältere Richtlinien, so sind die DIN 4701-10, die DIN 4702-8 und die DIN 13203 Teil 1 bis 3 Grundlagen für die VDI 4650.

Des Weiteren wurden bei der Anwendung der Richtlinie einige Schwierigkeiten festgestellt. So ist es nicht bei jeder Wärmepumpe ohne weiteres möglich die Parameter, wie in der Richtlinie gefordert, einzustellen. Weiterhin ist der Kühlbetrieb nicht erfasst.

Die DIN EN 12309-1 behandelt die Sicherheitsanforderungen an gasbefeuerte Ad-/Absorptionsgeräte mit einer Nennwärmebelastung nicht über 70 kW. Es werden Anforderungen an die Konstruktion wie auch Anforderungen an den Brenner gestellt. Weiterhin sind in dem Dokument Betriebsanforderungen wie z.B. Dichtheit und Zündung definiert. Für die Prüfung sind unter anderem die allgemeinen Prüfbedingungen und Anforderungen an die Betriebssicherheit geregelt. Der zweite Teil beschäftigt sich mit den Anforderungen im Heiz- und Kühlbetrieb und den entsprechenden Prüfverfahren wie z.B. Aufbau und Einstellungen. Diese Norm ist maßgeblich für die Zulassungsprüfung.

Zurzeit in der Erstellungsphase ist die Richtlinie VDI 4645, die sich mit der Auslegung von Wärmepumpen für Ein- und Mehrfamilienhäuser befasst. Mit dieser Richtlinie soll dem Handwerker ein Werkzeug zur einfachen und genauen Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen gegeben werden. Es ist damit zu rechnen, dass

diese Richtlinie Ende 2011 als Gründruck vorliegt. Eine Bewertung kann deshalb noch nicht vorgenommen werden.

Für die technische Installation sind die Regeln des DVGW anzuwenden (DVGW G 600 – Technische Regel für Gasinstallation (TRGI)).

Für die Aufstellung sind je nach Wärmepumpentyp noch weitere Bedingungen einzuhalten. Zum einen gibt es die Feuerungsverordnung, die den Brandschutz regelt und zum anderen werden Wärmepumpen mit giftigen Kältemittel betrieben. Hierfür gilt die EN 378 Kälteanlagen und Wärmepumpen – sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen. Je nach verwendetem Kältemittel sind auch die entsprechenden Sicherheitsdatenblätter zu beachten.

Die VDI 4640 beschäftigt sich mit der Auslegung der Wärmequelle, dabei werden Angaben über die Nutzung von Grundwasser und Erdwärme gemacht. Im Abschnitt über Erdwärmenutzung wird auf die Auslegung und Konstruktion von Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden und Massivabsorber eingegangen. Weiterhin werden auch seltenere Erdkollektorformen wie z.B. Spiralabsorber angesprochen. Die Richtlinie beschäftigt sich nur mit der Wärmequellenseite und lässt die Wärmepumpe außen vor.

In der DIN EN 16147 wird die Brauchwassererwärmung mit Wärmepumpenanlagen behandelt. Diese Norm ist allerdings nur für Elektrowärmepumpen gültig, in der Norm werden Wärmequellentemperaturen angegeben, welche nicht aus den bisherigen Normen und Richtlinien übernommen werden können, da die Brauchwassererwärmung das komplette Jahr durch geschieht und so im Sommer die Wärmepumpe auf höheren Quellentemperaturen zugreifen kann. Der Unterschied ist hierbei beim Luftkollektor an größten, aber auch bei Erdkollektoren sind einige Grad Unterschied zu erwarten. Darum ist eine abweichende Quellentemperatur zum reinen Heizbetrieb wie der VDI 4650 sinnvoll.

In der Norm sind die Zapfprofile aus der DIN EN 13203 übernommen, so dass eine Vergleichbarkeit zu Prüfungen von Brennwertgeräten gegeben ist.

10 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 10-1 zeigt eine Außenansicht des Versuchshauses und eine Thermografieaufnahme.

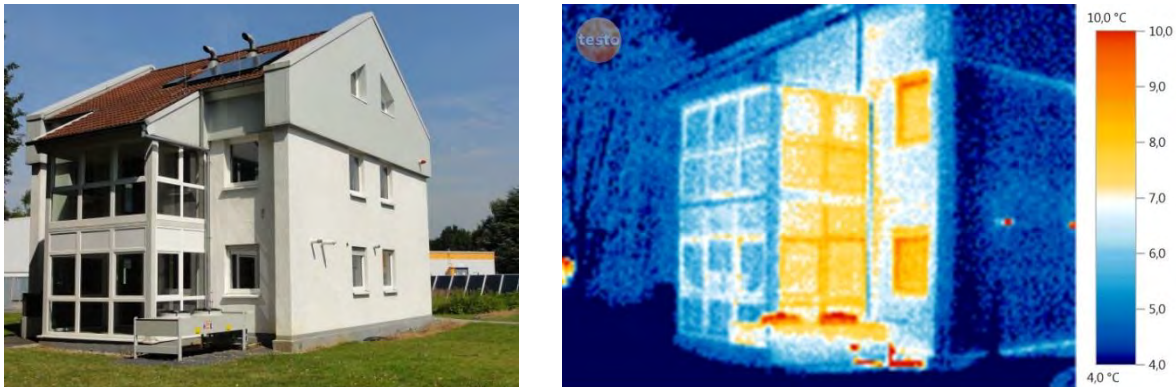


Abbildung 10-1: Versuchshaus mit Solarkollektoren im Hintergrund und Trockenkühler zum gleichzeitigen Betrieb mehrerer Anlagen. Vor dem Haus sind 3 Erdkollektoren für Wärmepumpen installiert.

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 10-2 aufgezeigt.

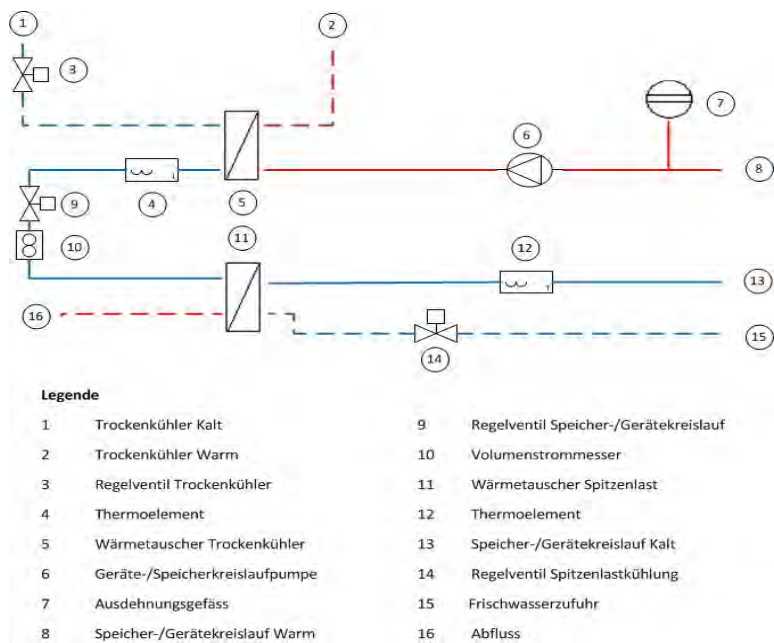


Abbildung 10-2: Schematische Darstellung der Anbindung von Heizungsanlagen im Versuchshaus an den Trockenkühler

Die Anlagen zur Umweltwärmeeinkopplung über Erdbodenflächenkollektoren sind in Abbildung 10-3 abgebildet. Insgesamt sind drei Flächenkollektoren unterschiedlicher Verlegearten und Rohrkombinationen als Wärmequelle für die im Haus installierte Gaswärmepumpe verlegt. Die in Abbildung 10-3 dargestellte hydraulische Verschaltung erlaubt eine Umschaltung der Kollektoren im Betrieb.

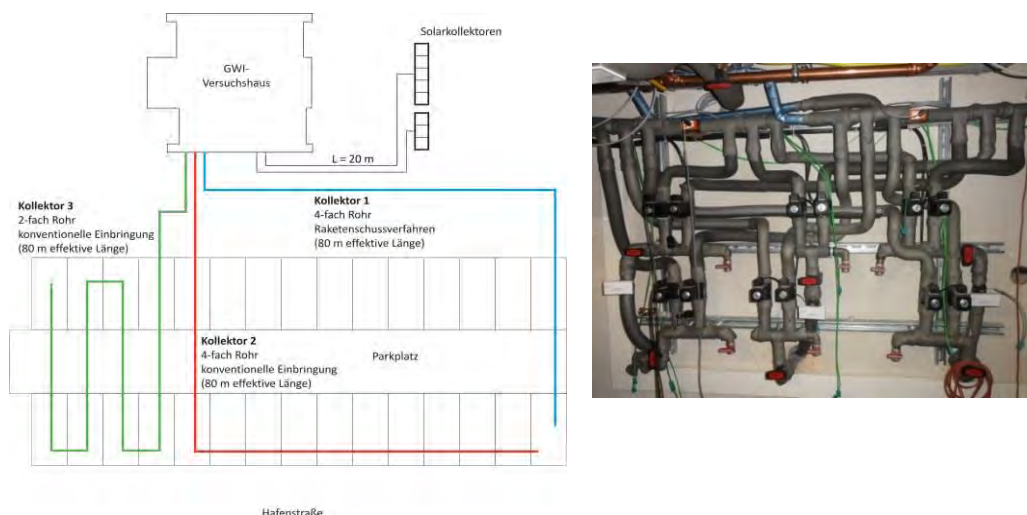


Abbildung 10-3: Vor dem Versuchshaus verlegte Flächenkollektoren und Hydraulik zur Umschaltung der Flächenkollektoren

Die zwei Solarkollektoren (Abbildung 10-4) versorgen das Gasbrennwertgerät und die Gaswärmepumpe (System Vaillant) mit erneuerbarer Energie.



Abbildung 10-4: 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.

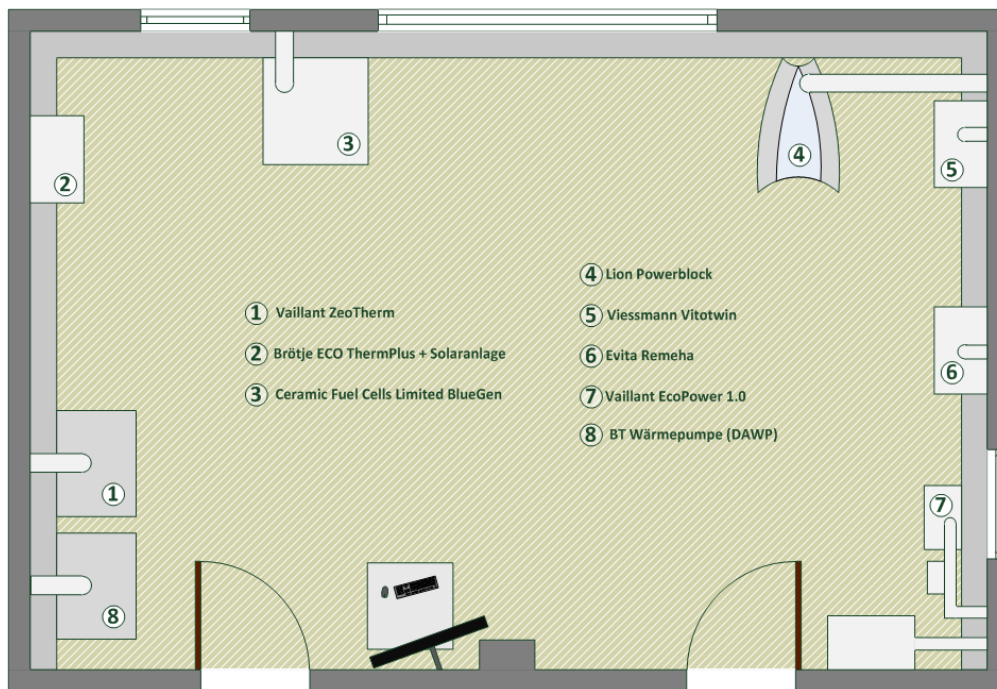


Abbildung 10-5: Aufstellungssituation im Ausstellungsraum (schematisch), nicht eingezeichnet ist die Bosch-Wärmepumpe

In Abbildung 10-5 ist der derzeitige Installationsstatus im Versuchshaus schematisch dargestellt. Es sind Gaswärmepumpen, Mikro-KWK-Geräte sowie Brennwert 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.

Die folgenden Fotos aus dem Demonstrationszentrum (Abbildung 10-6) 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 10-7 deutlich.



Abbildung 10-6: KWK-Geräte (links), Wärmepumpen, Brennwertkessel und Brennstoffzelle (rechts)



Abbildung 10-7: Installationsstationen und Speicher in den Kellerräumen

11 Definition von Optimaleinstellungen, Darstellung von Handlungsempfehlungen

11.1 Optimaleinstellungen

Der Einsatz von Gaswärmepumpen erfordert eine umfassendere Auslegung des Wärmeversorgungssystems als bei Brennwertgeräten. Wichtig sind hier die verfügbare Umweltwärmequelle und die Wärmebedarfscharakteristik des Objekts. Anhand dieser Punkte kann eine Vorauswahl des Gaswärmepumpensystems vorgenommen werden. Eine Gaswärmepumpe sollte bei niedrigen Heizkreistemperaturen und hohen Umweltwärmequellentemperaturen betrieben werden (vgl. Abbildung 1-2: Temperaturverhältnisse in einem Wärmepumpenprozess). Die Heizkreistemperaturen können über den Einsatz ausreichend großer Wärmeübertragerflächen gesenkt werden. Die Umweltwärmequellentemperatur ist abhängig von den klimatischen Bedingungen der Umgebung, des Quellentyps und kann nicht ohne weiteres beeinflusst werden. Hier ist auf eine entsprechende Auslegung im Zusammenspiel des Quellentyps mit den verdampferseitigen Anlagenteilen und dem Kältemittel zu achten. Es sollten vorher alle Umweltwärmequellen in Betracht gezogen werden, um zu vermeiden, dass eine teurere und aufwändigere Lösung als nötig eingesetzt wird. Bei der Auslegung der Quelle muss speziell bei Erdsonden auf eine ausreichende Regeneration des Erdreichs am Einsatzort Wert gelegt werden, um eine sukzessive Abkühlung des Untergrunds zu vermeiden.

Der ideale Lastpunkt ist von System zu System unterschiedlich, manche Prozesse brauchen eine Mindestenergie für den Wärmepumpenprozess. Unterhalb dieses Punktes wird der Wärmepumpenprozess nicht bestmöglich genutzt. Andere Prozesse wiederum laufen bei einer möglichst kleinen Last mit der bestmöglichen Effizienz und verlieren kontinuierlich mit steigender Last an Effizienz. Dies ist für die Auslegung in Bezug auf den Wärmebedarf des Gebäudes und die Bedarfe an Trinkwarmwasser bedeutend.

Die untersuchten Gassorptionswärmepumpen eignen sich durchweg hervorragend für die Versorgung auch von hochgrädigen Heiznetzen und der wärmepumpenbasierten Warmwasserbereitung. Aber auch hier gilt, dass aufgrund der Physik für niedergrädige Heizsysteme die maximalen Nutzungsgrade erzielt werden können. Für das jeweilige Objekt kann für alle Heizungstechnologien allgemeingültig gefordert werden, dass die Grädigkeiten zur Befriedigung des Komfortbedarfs nur so hoch wie nötig und nicht wie möglich einzustellen sind. Vor allem für den Zielmarkt der Heizungssanierung in Altbauten bedeutet dies, dass die

Heiznetztemperaturen auf 55 °C oder weniger gesenkt werden sollten und, dass die Warmwasserbereitstellung mit maximal 55 °C erfolgen sollte. Höhere Warmwassertemperaturen für Anti-Legionellenprogramme sollten nach dem Stand der Technik und den legislativen Anforderungen nur intermittierend eingestellt werden.

Weiterhin sollte verhindert werden, dass die Geräte im taktenden Betrieb laufen. Einige Systeme benötigen erst eine gewisse Zeit, um den Wärmepumpenprozess aufzuheizen. Bei vielen Starts wird diese Anfangsenergie mehrfach in das System investiert, ohne einen direkten Nutzen daraus zu ziehen. Diesem Punkt kann durch die sorgfältige Abstimmung der Regelung und Pufferspeicher begegnet werden. Bei den betrachteten Gasadsorptionswärmepumpen kleiner Leistung liegen die maximalen Nutzungsgrade im niedrigen Teillastbetrieb, im Vollastbetrieb nähern sich die Wirkungsgrade denen eines guten Brennwertgeräts. Für die Gasabsorptionswärmepumpen werden die höchsten Nutzungsgrade nahe bzw. bei Vollastbetrieb erzielt, d.h. hier wäre dieser Betriebsbereich bevorzugt mit dem obligatorischen Einsatz eines Pufferspeichers zu wählen. Der Einsatz von Pufferspeichern reduziert zudem die Takthäufigkeit und wirkt sich damit günstig auf Emissionen und Wartungsaufwand aus.

Für die Diffusionsabsorptionswärmepumpe gilt, dass das System beim Starten die Ammoniakssäule aufheizen muss und erst einmal Energie in das System eingebracht werden muss, ohne dass Heizenergie genutzt werden kann. Für die übrigen Parameter gilt das gleiche, wie schon vorher angesprochen – möglichst niedrige Heizkreistemperaturen, möglichst hohe Umweltwärmequellentemperaturen und eine niedrige Last, um das Verhältnis von eingesetzter Gasenergie zu eingekoppelter Umweltwärme zu Gunsten der Umweltwärme zu verschieben – begünstigt einen effizienten Betrieb.

Ebenso wichtig sind eine optimale Einbindung in für diese Technologie besonders geeignete Systeme, Interaktion mit eventuell anderen Wärmeerzeugern und eine optimierte regelungstechnische Einbindung. Um das Effizienzpotenzial der Gassorptionswärmepumpensysteme ausschöpfen zu können, ist eine schlüssige regelungstechnische Einbindung in das Wärmeversorgungssystem des Objektes notwendig. Das umfasst die effiziente Nutzung von Wärmespeichern mit entsprechenden Hysteresen, die Kaskadierung bei bivalenten Anlagen mit einer effizienzorientierten Vorrangschaltung für den Wärmepumpenbetrieb. Intelligente Regelungen des Gesamtsystems können diesbezüglich als Schlüssel zu hocheffizienten Anlagen mit geringerem Wartungsaufwand gesehen werden.

Für die Akzeptanz der Gassorptionswärmepumpen sind des Weiteren bei der Installation entsprechende Maßnahmen bezüglich der Schall- und Körperschallemissionen vorzusehen. Hier sind besonders bei Luft/Wasser-Systemen

die Emissionen durch das Quellengebläse auf die Umgebung zu beachten, die durch einen geeigneten Standort oder eine schalltechnische Abschirmung minimiert werden können. Der Eintrag von Körperschall bei Systemen mit Lösungspumpen (Kompressoren) in das Objekt kann durch flexible Heizungs-, Abgasanschlüsse und Positionierung auf dämmenden Matten gemindert werden.

11.2 Handlungsempfehlungen

Gaswärmepumpen sind gegenüber Fehlern in der Installation anfälliger als bisher eingesetzte Gasbrennwertgeräte. Eine falsche Einstellung oder Auslegung schlägt sich stärker in einem schlechten Wirkungsgrad nieder. Hier ist zu empfehlen, dass das Handwerk dafür sensibilisiert wird und entsprechende Schulungen nutzen kann. Empfehlenswert ist auch die Entwicklung und Weitergabe von Planungshilfen, um auch Handwerkern, die zum ersten Mal eine Gaswärmepumpe installieren/auslegen, vor groben Fehlern zu bewahren. Zurzeit befindet sich die VDI Richtlinie 4645 in der Ausarbeitung, diese soll als Leitfaden für die Auslegung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen dienen. Diese Richtung sollte weiterverfolgt werden und darauf aufbauend sollten entsprechende Planungstools entwickelt werden und so dem Handwerker die Arbeit erleichtert werden und eventuell vorhandene Hemmnisse abbauen. Wichtig ist auch, dass der Handwerker für die Auslegung und Auswahl der Wärmequelle geschult ist. Dies wird auch in der VDI 4645 behandelt, weitere Planungstools sind hier auch für die Zukunft angebracht.

Neben der Schulung für die Auslegung und Installation ist es auch ratsam, dem Handwerker einen Leitfaden für die Genehmigungsverfahren an die Hand zu geben, um sicherzustellen dass alle relevanten Sachen im Vorfeld abgeklärt werden. Hier ist es auch ratsam die Anforderungen zu harmonisieren. Die jeweiligen Bundesländer haben zum Teil unterschiedliche Anforderungen, so dass ein klarer Leitfaden unnötig vergrößert wird.

Eine Förderung kann helfen den Markteintritt zu beschleunigen und sollte neu aufgelegt werden. Diese sollte dabei möglichst einfach gehalten werden und keine zusätzlichen Installationen wie z. B. von Wärmemengenzählern erfordern.

Literaturverzeichnis

- [Ba83] Prof. Fritz Baukau, Wärmepumpentechnik, Oldenbourg Verlag München Wien 1983
- [StaWo00] Stahlberg, Wolfgang, Wolf, Gerhard, Stand der Gaswärmepumpentechnik in Deutschland, Januar 2000
- [IELe09] Quelle: IGWP 2009 Darstellung: IE Leipzig
- [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
- [VDI10] VDI 4650-2 Stand 15-07-2010
- [HeVi12] Schema einer Wärmepumpe mit Grundwassernutzung, <http://www.heizvision.de>, 17.04.2012
- [HeVi12a] Schema einer Wärmepumpe mit Erdkollektornutzung, <http://www.heizvision.de>, 17.04.2012
- [HeVi12b] Schema einer Wärmepumpe mit Erdsonde, <http://www.heizvision.de>, 17.04.2012
- [HeVi12c] Schema einer Wärmepumpe mit Luftkollektornutzung, <http://www.heizvision.de>, 17.04.2012
- [GEFGA12] Verlauf der Bodentemperaturen für die Monate Februar, Mai, August, November, Gesellschaft zur Entwicklung und Förderung von Geothermie-Anlagen mbH, <http://www.gefga.de>, 12.07.2012

- [VDI01] VDI 4640 Blatt 2, Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Stand 2001-09
- [Pa80] Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow; Hemisphere Publishing Corp., Washington, 1980.
- [No93] Noll, B: Numerische Strömungsmechanik, Grundlagen; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993.
- [LaSpa74] Launder, B.E.; Spalding, D.B.: The Numerical Computation of Turbulent Flows; Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, pp. 269-289.
- [Ha01] Al-Halbouni, A.: Entwicklung NOx-emissionsminimierter Heizkesselfeuerungen; Shaker Verlag Aachen 2001; ISBN 3-8265-8535-6
- [LaSpa72] Launder, B.E.; Spalding, D.B.: Mathematical Models of Turbulence; London; Academic Press 1972
- [Flu13] FLUENT 13.0 Documentation
- [Glü] Glück, Bernd, Erdwärmekollektor-Simulationsmodell "Erdwärmekollektor" zur wärmetechnischen Beurteilung von Wärmequellen, Wärmesenken und Wärme-/Kältespeichern
- [Bur04] Burger, Helmut et al., Überschlägige Ermittlung der erforderlichen Kesselleistung, IKZ-HAUSTECHNIK, Strobel Verlag, Ausgabe 18/2004
- [Saa08] Ministerium für Umwelt (Saarland), Leitfaden Erdwärmenutzung, 2008

- [BaWü05] Umweltministerium Baden-Württemberg, Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, Mai 2005

- [SW06] Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Leitfaden für oberflächennahe Erdwärmeanlagen, August 2006

- [Bra09] Brandenburgische Energie Technologie Initiative, Nutzung von Erdwärme in Brandenburg, August 2009

- [He07] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Erdwärmenutzung in Hessen, 2007

- [NRW04] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme, 2004

- [BaWü08] Umweltministerium Baden-Württemberg, Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmekollektoren, 2008

- [Ber10] Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Erdwärmenutzung in Berlin, April 2010

- [Ha09] Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Leitfaden zur Erdwärmenutzung in Hamburg, Juli 2009

- [RP07] Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz, Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, Mai 2007

- [Nie06] Niedersächsisches Umweltministerium, Leitfaden Erdwärmenutzung in Niedersachsen, Dezember 2006

- [Sac07] Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden ,
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie ,Juni 2007
- [Bre] Geologischer Dienst für Bremen, Technische und rechtliche
Hinweise zur Installation von Erdwärmesonden in Bremen
- [CH09] Bundesamt für Umwelt, Wärmenutzung aus Boden und Untergrund,
2009
- [GeoN09] Sanner, Burkhard; Mands, Erich, Erdgekoppelte Wärmepumpen in
Deutschland und Europa: ein Wachstumsmarkt, in bbr-Sonderheft
Oberflächennahe Geothermie 2009
- [DECC] Department of Energy and Climate Change, <http://www.decc.gov.uk/>
- [SWE1] SP Technical Research Institute of Sweden, <http://sp.se>
- [SWE2] Sanner, B, GUIDELINES, STANDARDS, CERTIFICATION AND
LEGAL PERMITS FOR GROUND SOURCE HEAT PUMPS IN THE
EUROPEAN UNION, 9th International IEA Heat Pump Conference,
20 – 22 May 2008, Zürich, Switzerland
- [Kä09] Merkblatt Grundwasserwärmepumpe, Oktober 2009
- [OÖ11] Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Januar 2011
- [BINE] BINE Informationsdienst: Wärmepumpen. Fachinformationszentrum
Karlsruhe, Büro Bonn, Dezember 2001
- [BWP] Bundesverband Wärmepumpe e.V.: Internetpräsentation
<http://www.waermepumpe.de/waermepumpe/waermequellen/erdwaerme.html>

- [ETI] Brandenburgische Energie Technologie Initiative (ETI): Nutzung von Erdwärme in Brandenburg. Leitfaden für Bauherren, Planer und Fachhandwerker, 1. Auflage, 2009
- [GeoBay] Initiative klimafreundliches Bayern: Oberflächennahe Geothermie – Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund. Bayrisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV), München, Juli 2005
- [LeitEW] Bundesverband Wärmepumpe e.V.: Leitfaden Erdwärme. Berlin, September 2011
- [LeitSH] Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR): Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes. hansadruck, Kiel, September 2011
- [ÖWAV207] ÖWAV-Regelblatt 207: Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, 2009
- [SEWS] Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Erdwärmesonden. Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächen-naher Geothermie, Dresden, 28.02.2011
- [SVG] Schweizerische Vereinigung für Geothermie (SVG): Erdwärmesondenfelder und tiefe Erdwärmesonden. Technische Notiz, Neuchâtel, Schweiz, 01/2002
- [VDI4650-2] Verein Deutscher Ingenieure, Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresheizzahl und des Jahresnutzungsgrads von Sorptionswärmepumpenanlagen - Gas-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung, Entwurf, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2011
- [Viess1] 1. VDI-Fachkonferenz: Wärmepumpen – Umweltwärme effizient nutzen. S. 111 – 117, Stuttgart, Juni 2010

[ZHAW] Hubbuch, Markus: Optimierung von Erdwärmesonden. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Wädenswil, Schweiz, <http://www.erdsondenoptimierung.ch>

Anhang A

Tabelle 0-1: Grenzwerte des Schalldruckpegels 0,5 m vor dem Fenster eines schutzbedürftigen Raumes

Gebietstyp		DIN 18005	TA Lärm/VDI 2058
Krankenhäuser, Schulen, Alten- und Pflegeheim	Tag		45
	Nacht		35
Reine Wohngebiete	Tag	50	50
	Nacht	35	35
Allgemeine Wohngebiete	Tag	55	55
	Nacht	40	40
Dorf- und Mischgebiete	Tag	60	60
	Nacht	45	45
Kerngebiete	Tag	65	60
	Nacht	50	45
Gewerbegebiete	Tag	65	65
	Nacht	50	50
Industriegebiete	Tag		70
	Nacht		70

Projektpartner:



www.dvgw-innovation.de



Gaswärmepumpe plus Umweltwärme im System Gebäude- / Anlagentechnik

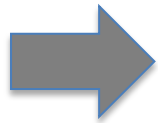
G 5-03-10

Stand: 30.10.2012

- Hintergrund und Zielsetzung
- Beschreibung der Gaswärmepumpen
- Laborergebnisse
- Feldtestdatenauswertung
- Wärmequellen
- Kernaussagen/Fazit

Hintergrund

- Gaswärmepumpen gelten als **zukunftsweisende Technologie**, mit der eine **Primärenergieeinsparung** und eine **Senkung der CO₂-Emissionen** möglich ist.
- Zu Projektbeginn 2010 befanden sich die Gaswärmepumpen überwiegend im Entwicklungsstand (Prototypenstadium) oder in weiterführenden Feldtestuntersuchungen.



Daher wurden unterstützende Untersuchungen vor dem Markteintritt der unterschiedlichen Technologien angestrebt.

Zielsetzung

- Die Bewertung und Optimierung von Technologiekonzepten unter Berücksichtigung der Umweltwärmequellen.
- Abstimmung der Technologiekonzepte auf zukünftige Anwendungssituationen und auf primärenergetisch hocheffiziente Betriebsweisen.

Hintergrund und Zielsetzung

- Beschreibung der Gaswärmepumpen
- Laborergebnisse
- Feldtestdatenauswertung
- Wärmequellen
- Kernaussagen/Fazit

Es wurden vier verschiedene Gaswärmepumpensysteme untersucht.



Diffusions-Absorptions-
gaswärmepumpe von
Bosch-Nefit (10 kW)
[Konzept]



Gas-Absorptions-
wärmepumpe mit
Luftquelle von Bosch
und Robur (41 kW)



Gas-Absorptions-
wärmepumpe mit
Sole-/
Wasserquelle der
Firma Bosch und
Robur (41 kW)



Zeolith-Adsorptions-
gaswärmepumpe der
Firma Viessmann
(10 kW)

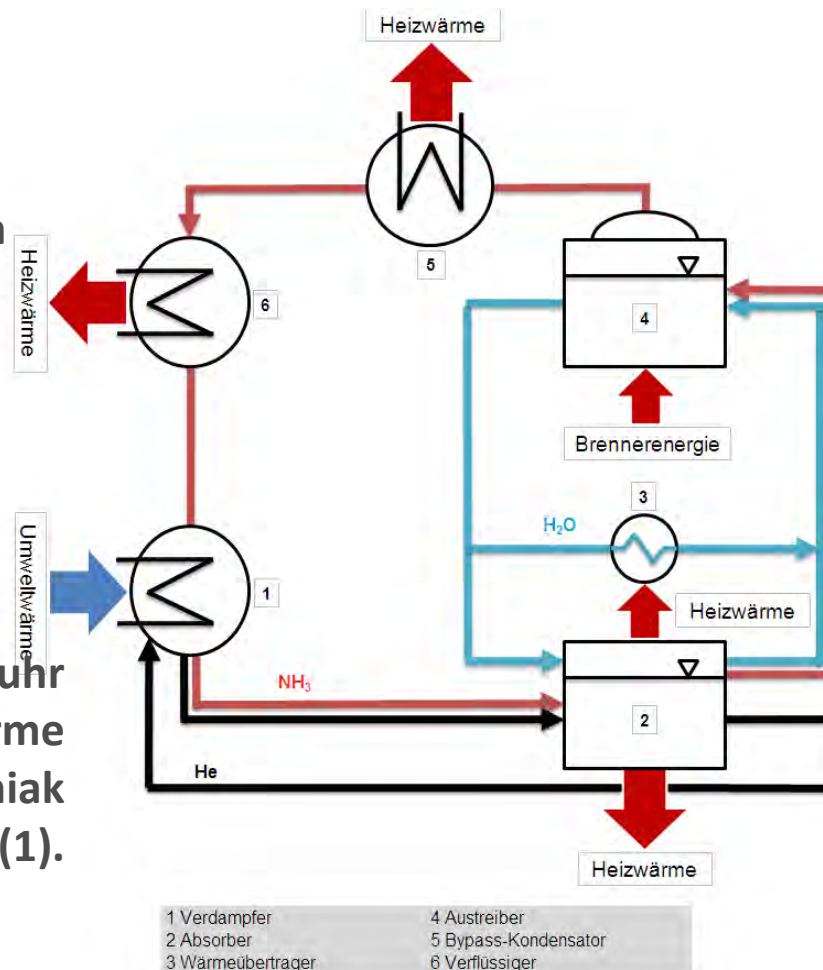
Verfahrensschaubild der Diffusionsabsorptionswärmepumpe.

Ammoniak kondensiert, die Kondensationswärme wird zum Heizen genutzt (5,6).

Ammoniak wird mit Hilfe eines Gasbrenners ausgetrieben (4).

Durch die Zufuhr von Umweltwärme wird Ammoniak verdampft (1).

Ammoniak wird absorbiert, die Absorptionswärme wird zum Heizen genutzt (2).



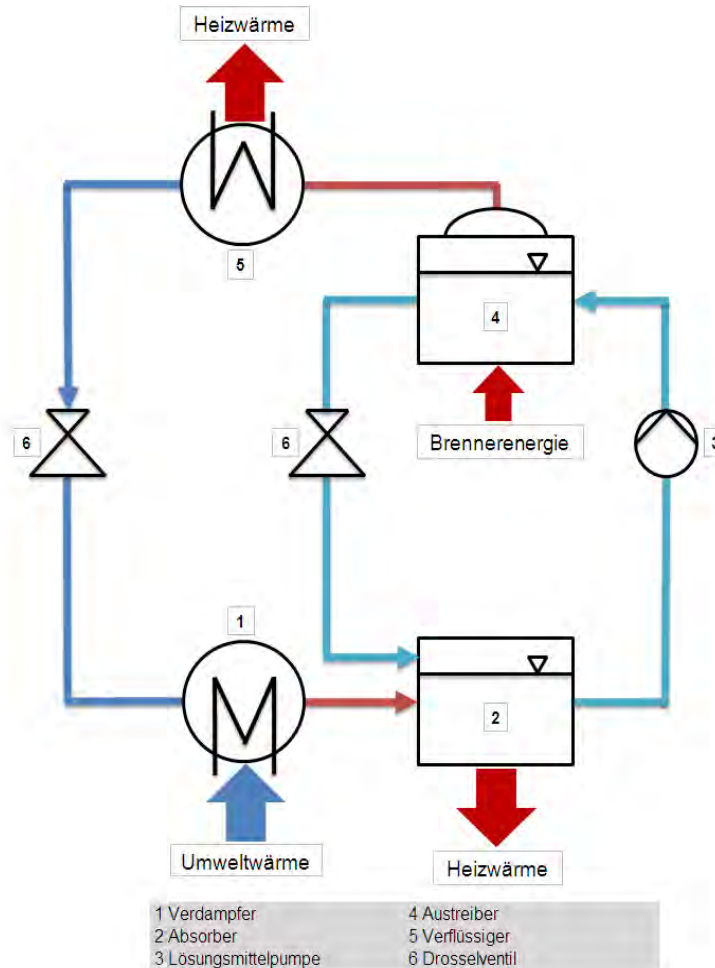
Verfahrensschaubild der Gasabsorptionswärmepumpe.

Ammoniak kondensiert, die Kondensationswärme wird zum Heizen genutzt (5).

Durch die Zufuhr von Umweltwärme wird Ammoniak verdampft (1).

Ammoniak wird mit Hilfe eines Gasbrenners ausgetrieben (4).

Ammoniak wird absorbiert, die Absorptionswärme wird zum Heizen genutzt (2).

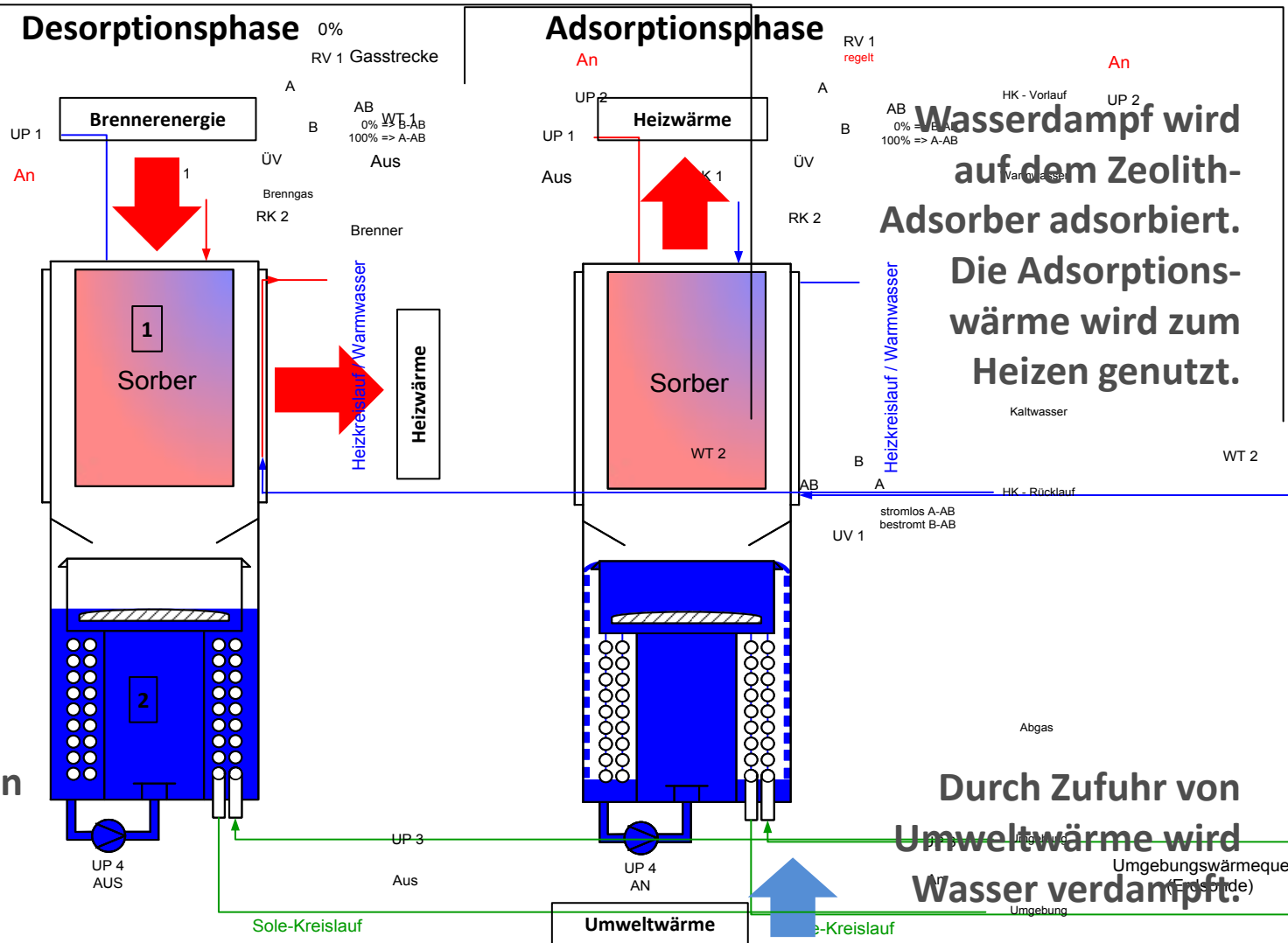


Desorptionsphase

Adsorptionsphase - Regelbetrieb

Der mit Wasser (Kältemittel) beladene Zeolith-Adsorber (1) wird mittels Brennerenergie erwärmt, Wasser wird desorbiert. Kondensationswärme wird zum Heizen genutzt.

Wasser fließt in den Verdampfer (2).



Wasserdampf wird auf dem Zeolith-Adsorber adsorbiert. Die Adsorptionswärme wird zum Heizen genutzt.

Durch Zufuhr von Umweltwärme wird Wasser verdampft.

- Hintergrund und Zielsetzung
- Beschreibung der Gaswärmepumpe
- Laborergebnisse
- Feldtestdatenauswertung
- Wärmequellen
- Kernaussagen/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

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

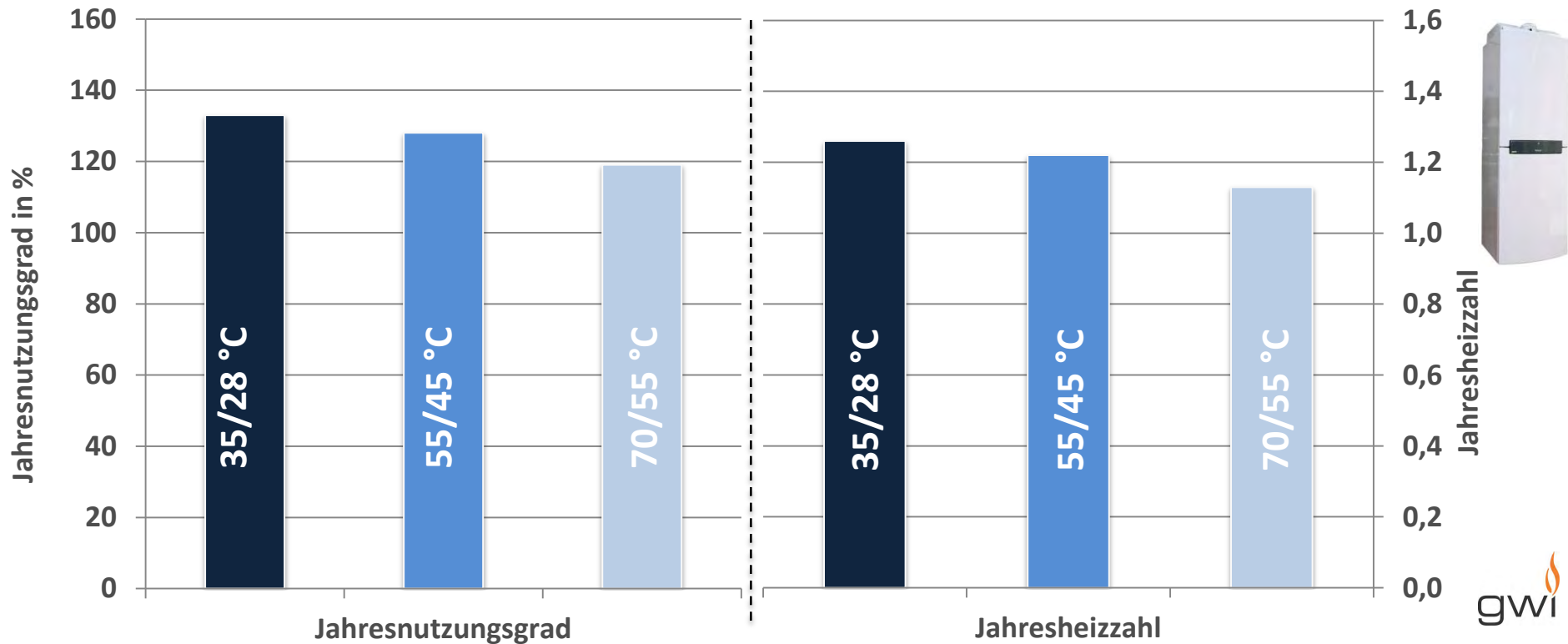
Die Leistungszahl ist die typische Bewertungsgröße für elektrisch betriebene Wärmepumpen.

P_{th} = thermische Leistung

P_{el} = elektrische Leistungsaufnahme

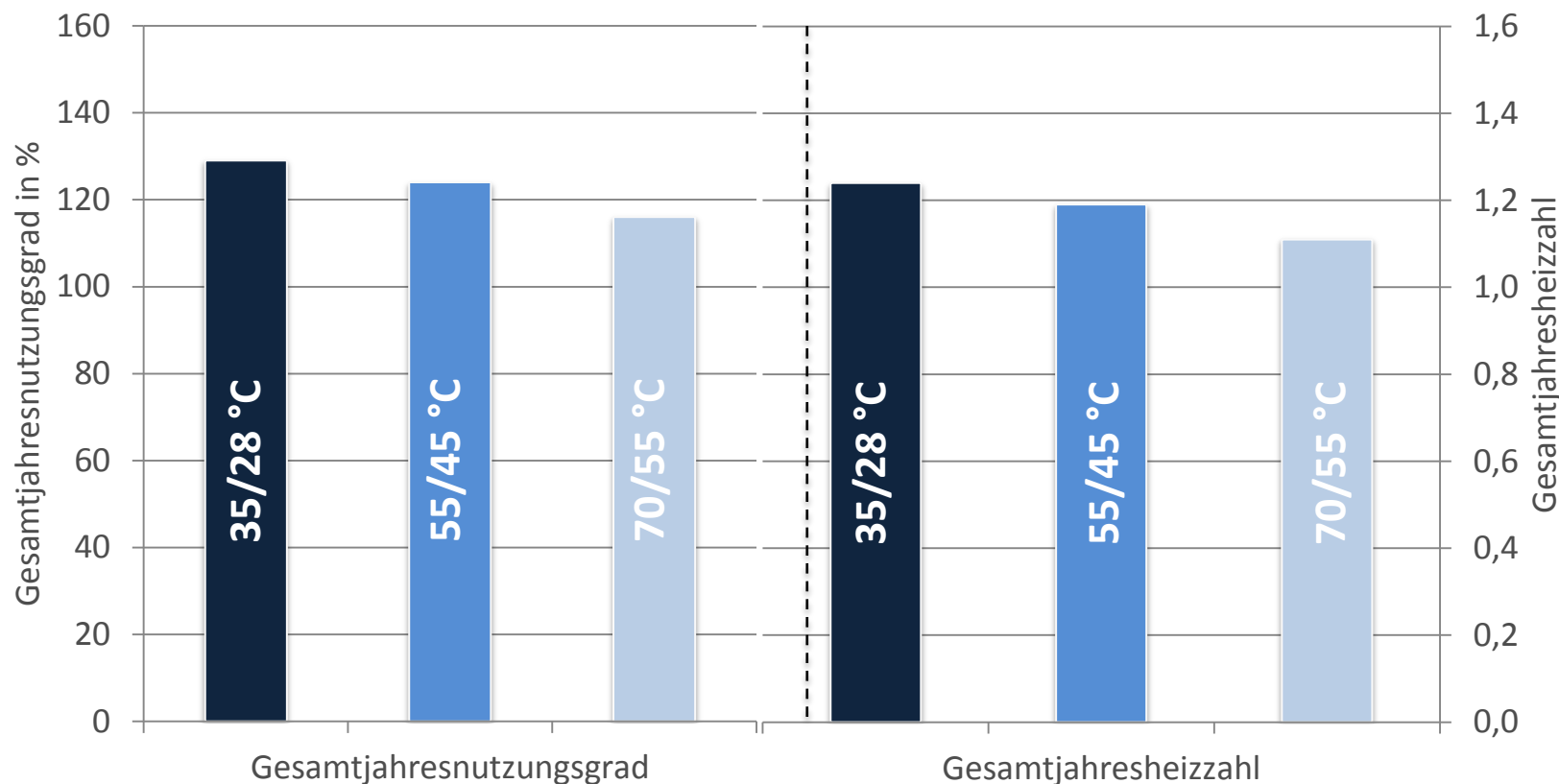
P_{Gas} = Wärmebelastung

Bei der Raumheizung erreicht die Gaswärmepumpe bei Heizkreistemp. von 35/28 °C und 55/45 °C Jahresnutzungsgrade bis 130 % und Jahresheizzahlen über 1,2.



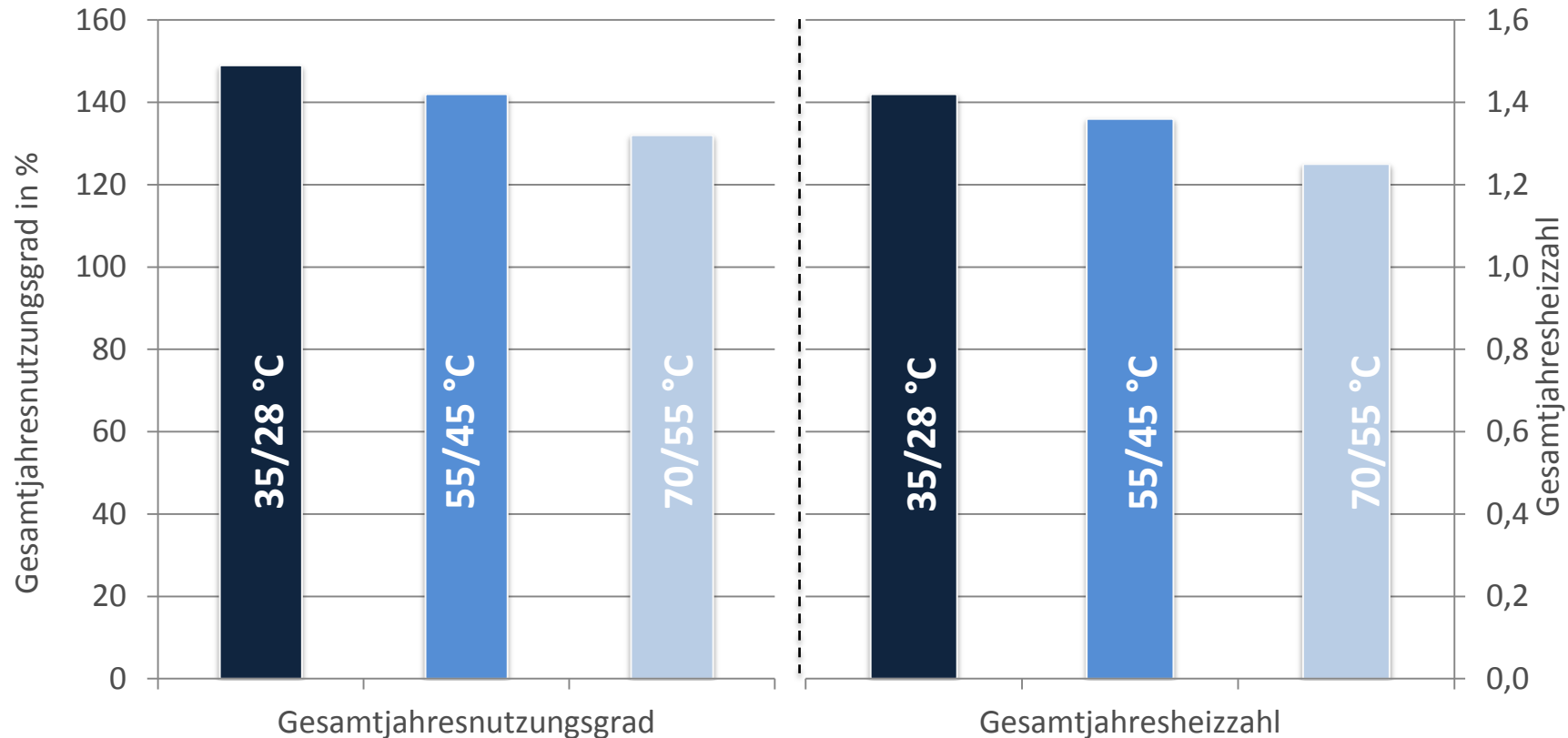
- Für jeden Heizkreis wurden Messungen bei 13, 30, 39, 48 und 63 % der Maximalleistung gemessen, um den entsprechenden Jahresnutzungsgrad zu ermitteln.
- Die Teillastpunkte bei 13 % und 30 % wurden im taktenden Betrieb gemessen.

Es werden bei Heizkreistemperaturen von 35/28 °C und 55/45 °C
Gesamtjahresnutzungsgrade über 120 % und -heizzahlen über 1,2 erreicht.



- Für jeden Heizkreis wurden Messungen bei 13, 30, 39, 48 und 63 % der Maximalleistung gemessen, um den entsprechenden Gesamtjahresnutzungsgrad zu ermitteln.
- Die Teillastpunkte bei 13 % und 30 % wurden im taktenden Betrieb gemessen.

Es werden bei Heizkreistemperaturen von 35/28 °C und 55/45 °C Gesamtjahresnutzungsgrade über 140 % und -heizzahlen über 1,3 erreicht.



- Für jeden Heizkreis wurden Messungen bei 13, 30, 39, 48 und 63 % der Maximalleistung gemessen, um den entsprechenden Gesamtjahresnutzungsgrad zu ermitteln.
- Die Teillastpunkte bei 13 % und 30 % wurden im taktenden Betrieb gemessen.



Bei der Raumheizung erreicht die Gaswärmepumpe bei Heizkreistemp. von 35/28 °C und 55/45 °C Jahresnutzungsgrade bis 133 % und Jahresheizzahlen über 1,2.

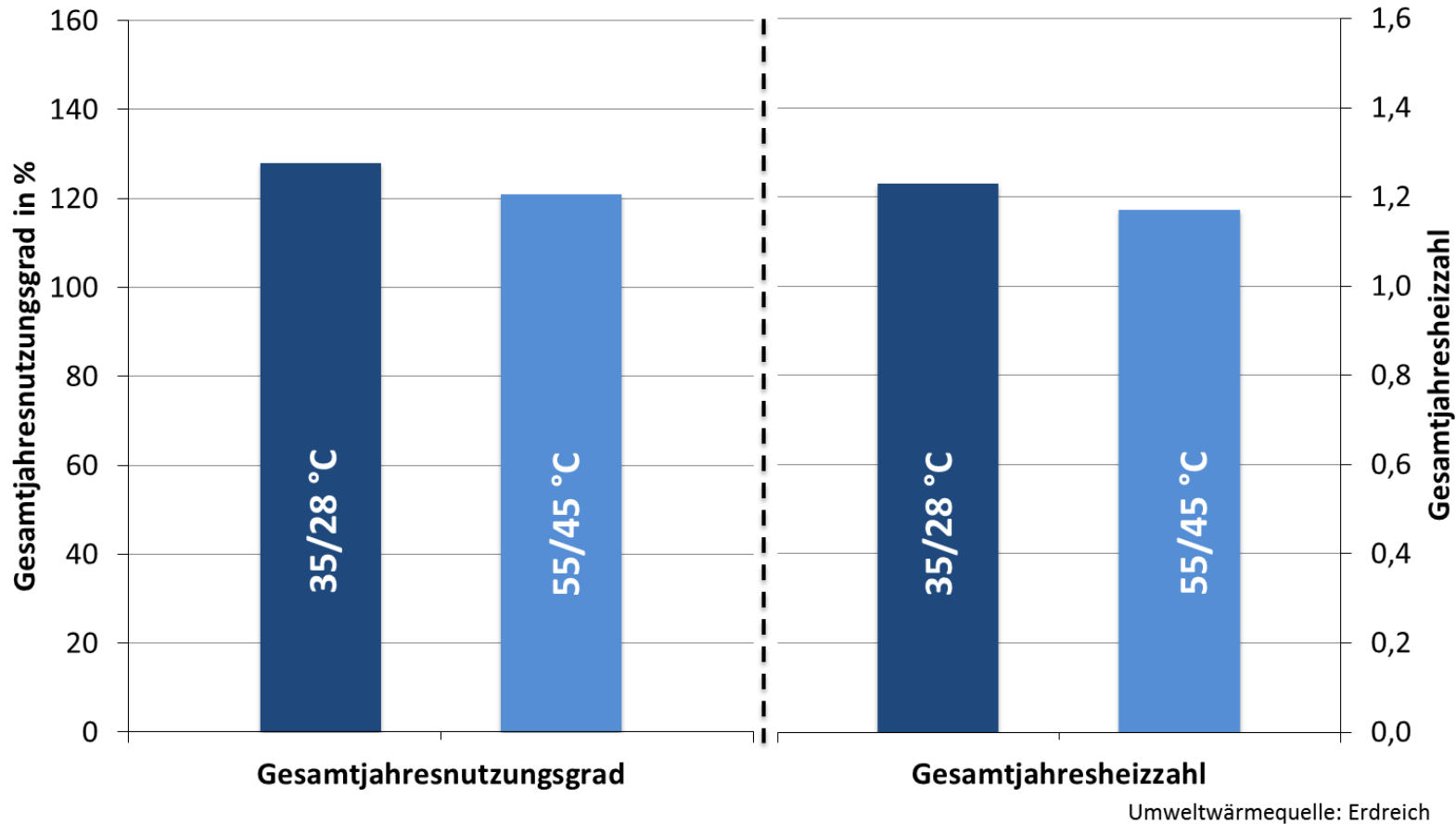


Umweltwärmequelle: Erdreich

Für jeden Heizkreis wurden Messungen der Teillastpunkte bei 13, 30, 39, 48 und 63 % der Maximalleistung durchgeführt und die Kennzahlen gemäß der VDI 4650-2 berechnet.

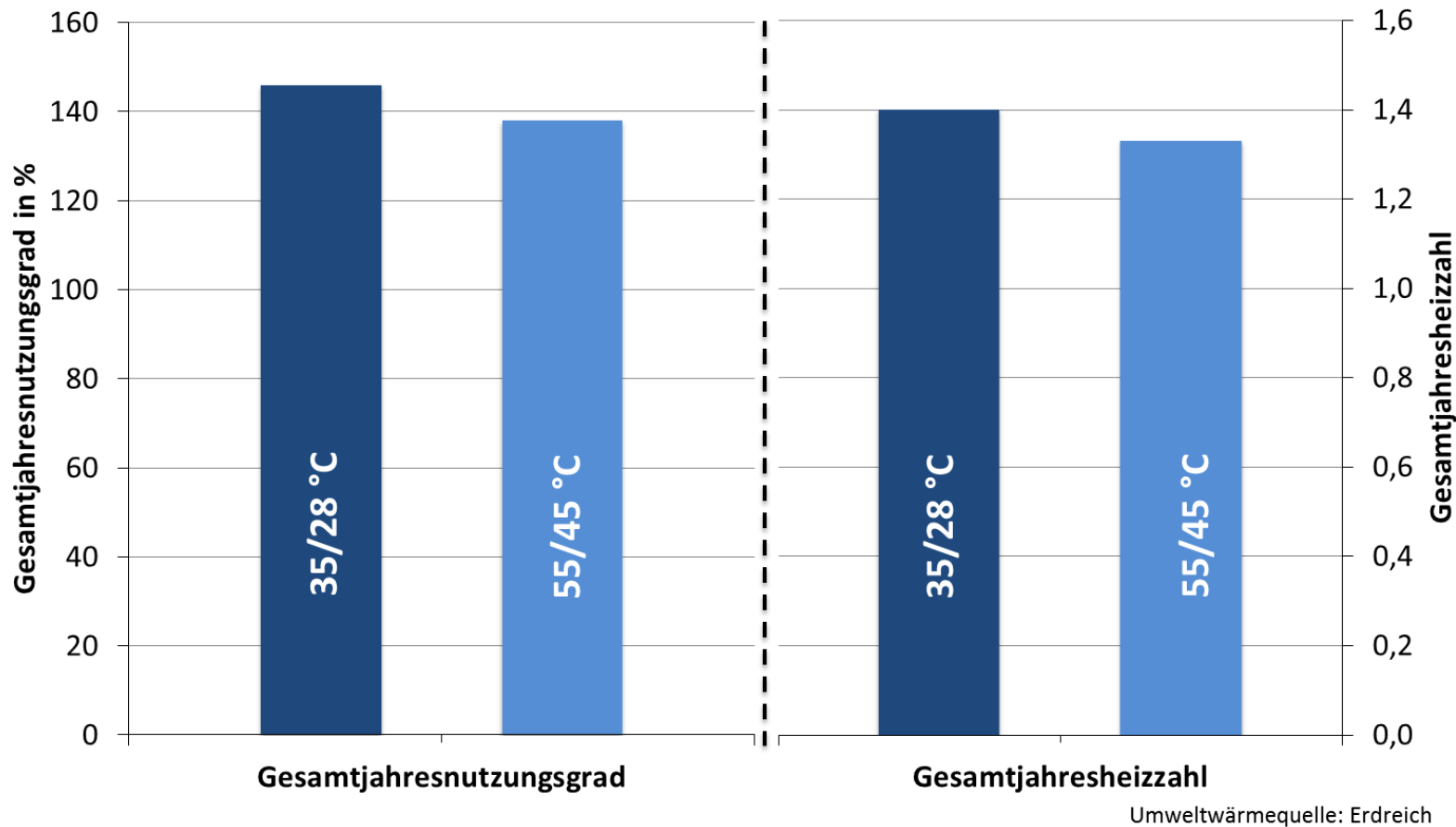


Es werden bei Heizkreistemperaturen von 35/28 °C und 55/45 °C
Gesamtjahresnutzungsgrade über 120 % und -heizzahlen über 1,17 erreicht.



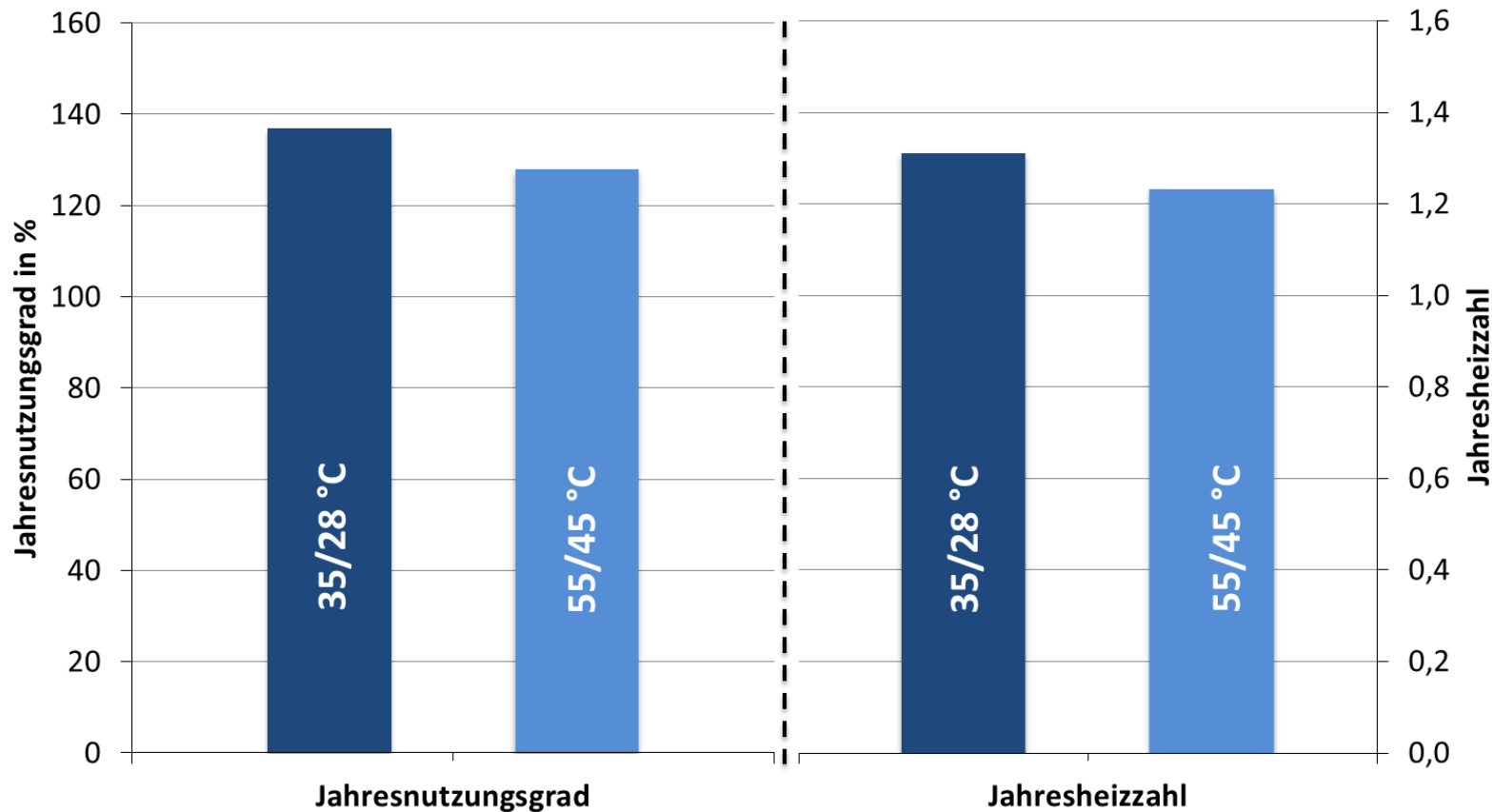
Annahme gemäß VDI 4650-2: Anteil WW-Bereitung 18 %

Es werden bei Heizkreistemperaturen von 35/28 °C und 55/45 °C
Gesamtjahresnutzungsgrade über 138 % und -heizzahlen über 1,3 erreicht.



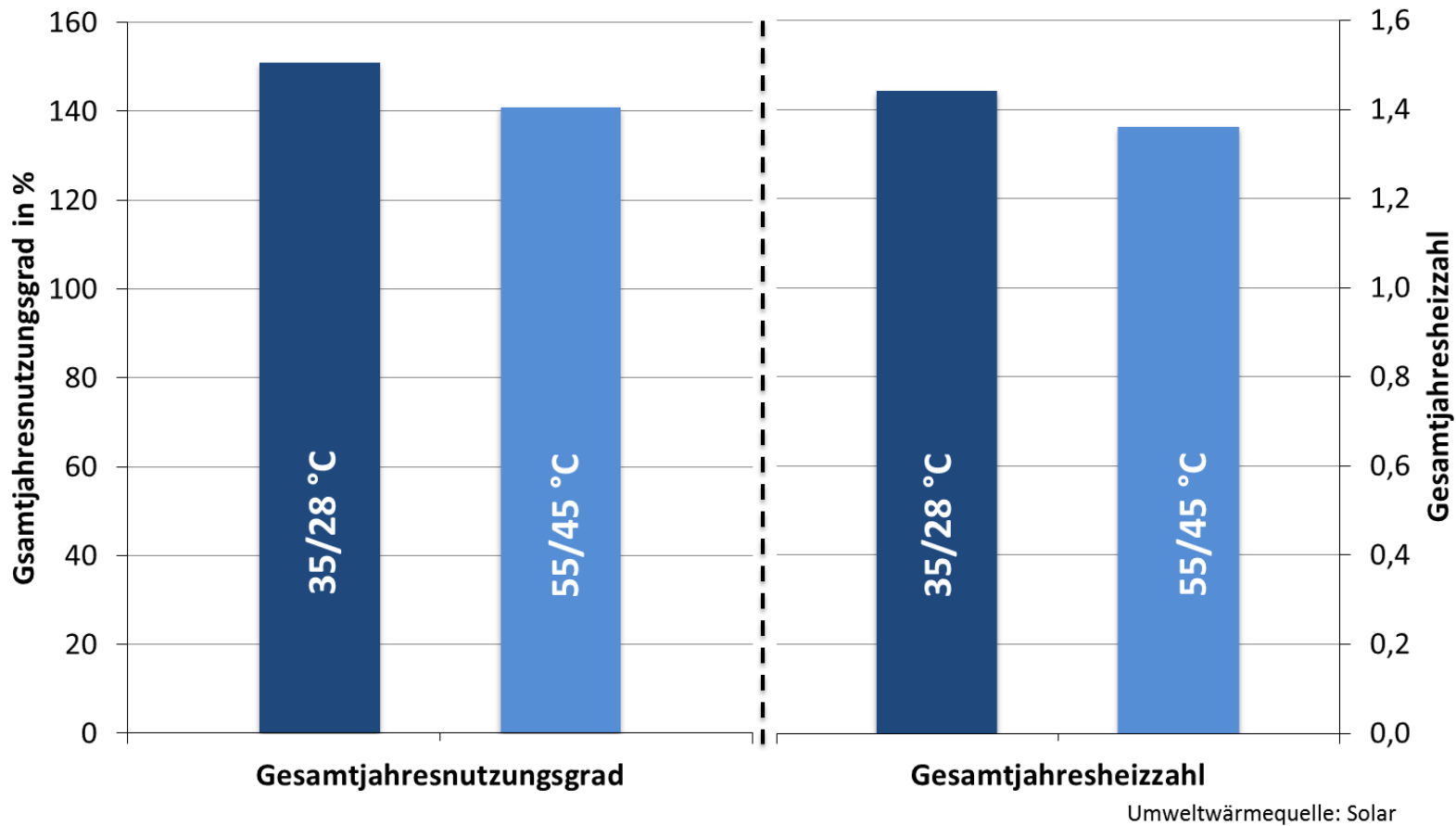
Annahme gemäß VDI 4650-2: Anteil WW-Bereitung 18 %; solarer Deckungsgrad WW-Bereitung 60 %

Bei der Raumheizung erreicht die Gaswärmepumpe bei Heizkreistemp. von 35/28 °C und 55/45 °C Jahresnutzungsgrade bis 137 % und Jahresheizzahlen über 1,2.

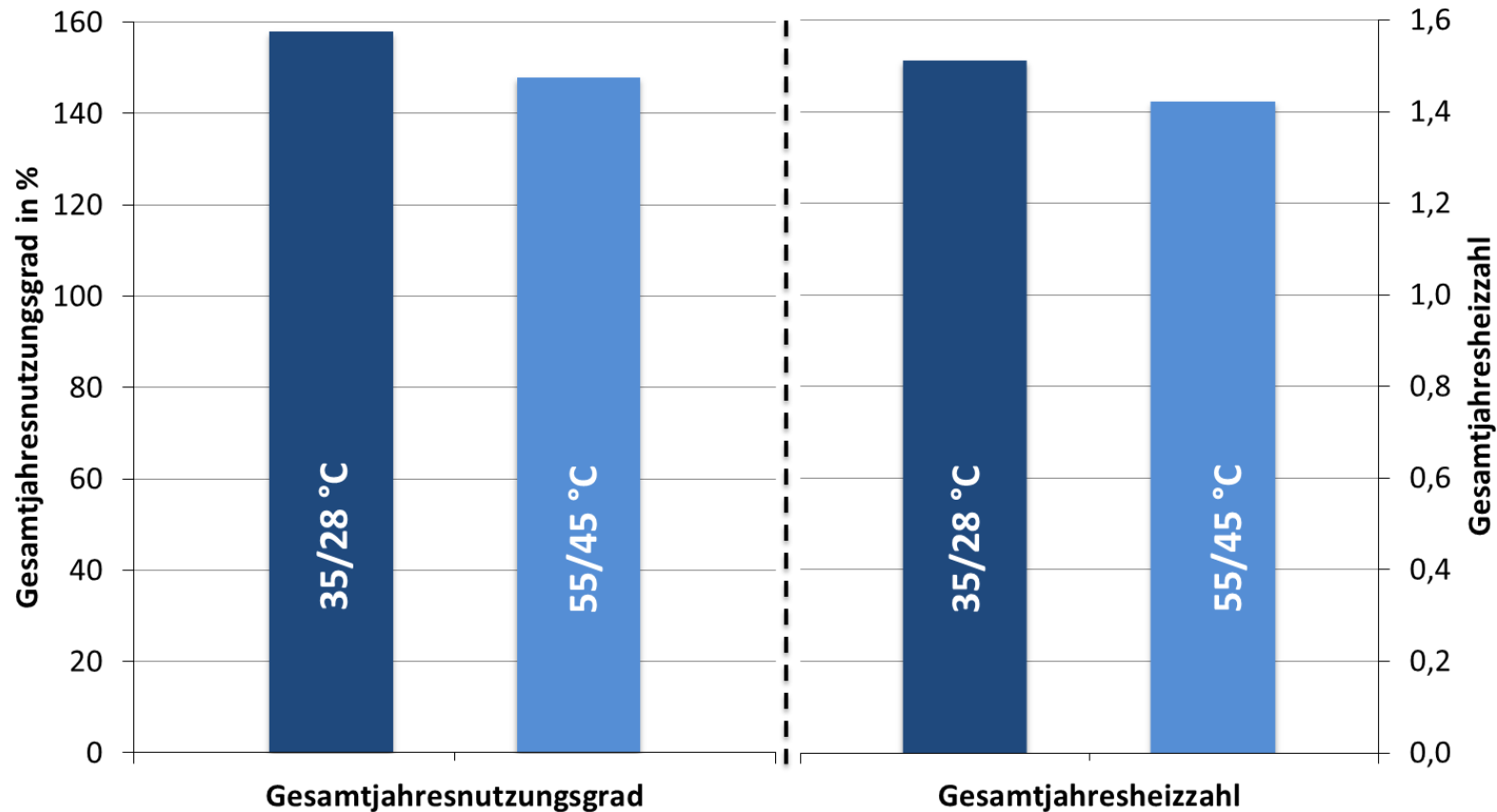


Für jeden Heizkreis wurden Messungen der Teillastpunkte bei 13, 30, 39, 48 und 63 % der Maximalleistung durchgeführt und die Kennzahlen gemäß der VDI 4650-2 berechnet.

Es werden bei Heizkreistemperaturen von 35/28 °C und 55/45 °C
Gesamtjahresnutzungsgrade über 140 % und -heizzahlen über 1,3 erreicht.

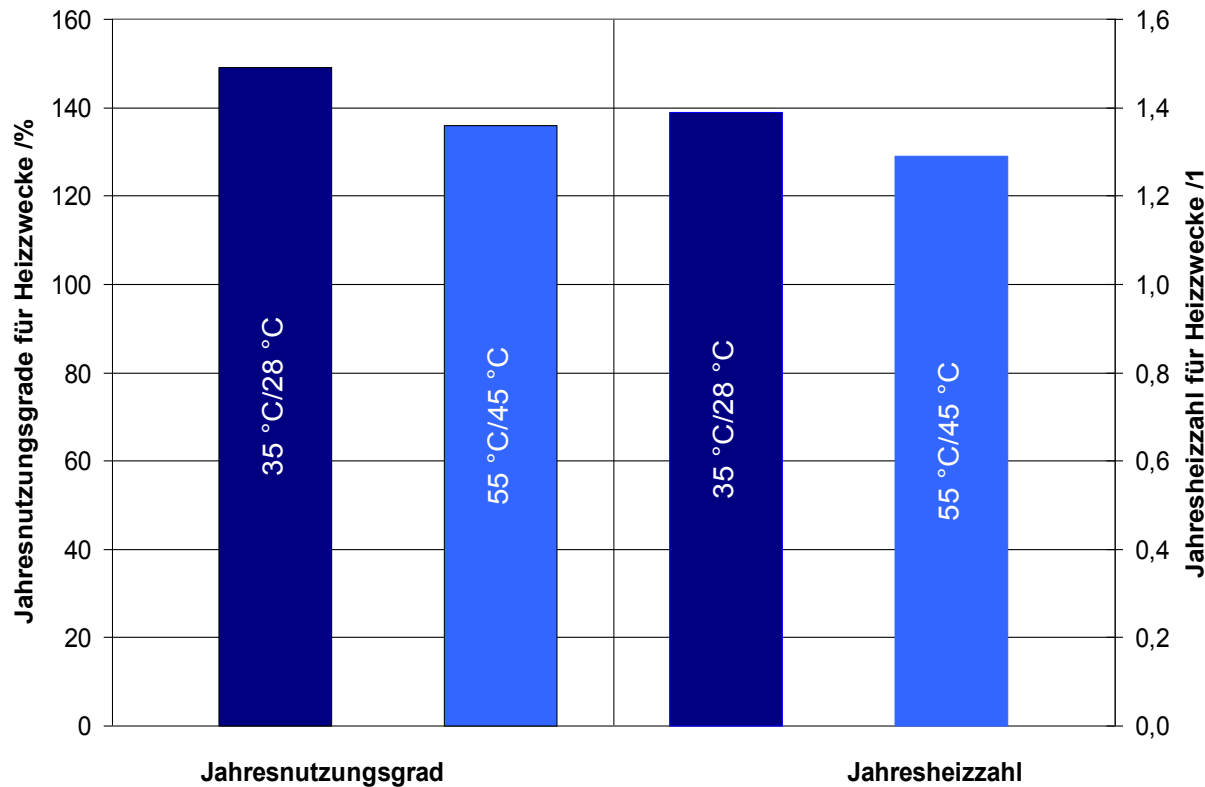


Es werden bei Heizkreistemperaturen von 35/28 °C und 55/45 °C Gesamtjahresnutzungsgrade über 145 % und -heizzahlen über 1,4 erreicht.



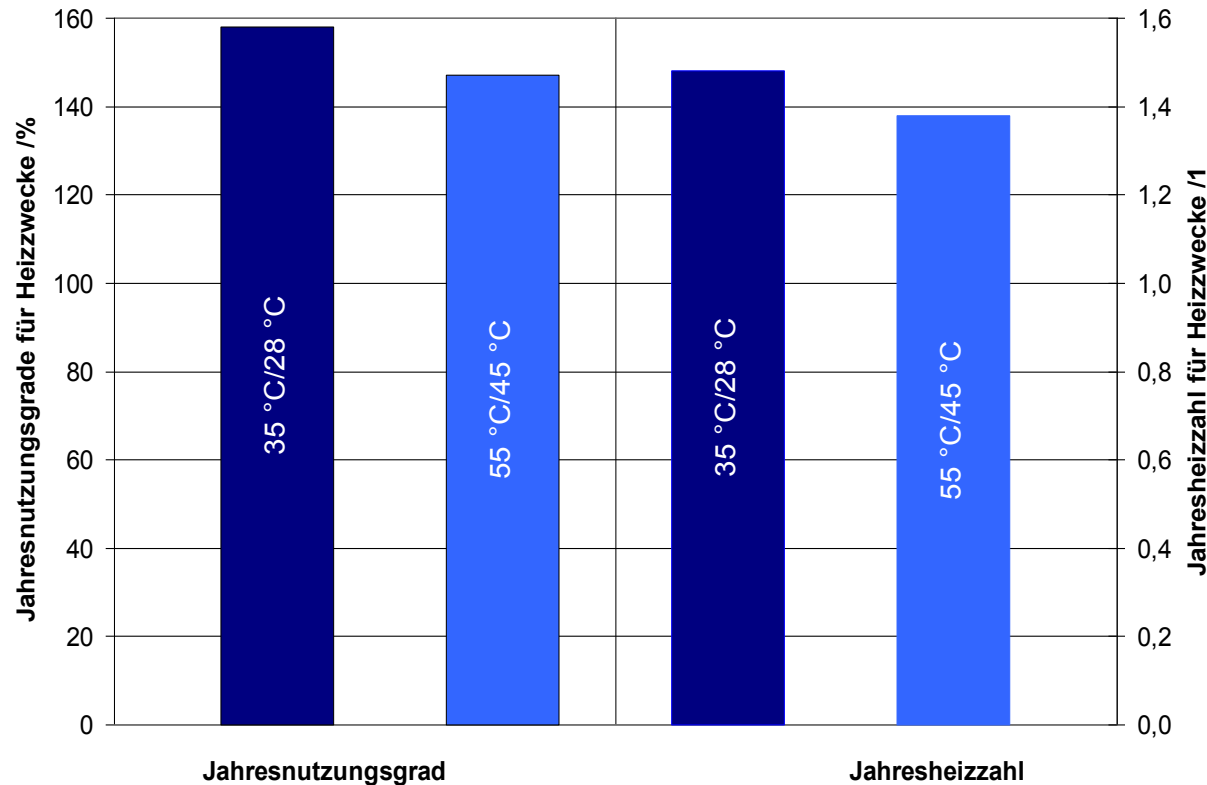
Annahmen gemäß VDI 4650-2: Anteil WW-Bereitung 18 %; solarer Deckungsgrad für Heizungsunterstützung 5 %; solarer Deckungsgrad WW-Bereitung 60 %

Messergebnisse Raumheizung Gaswärmepumpe Bosch-Robur (Luft/Wasser)



- Messungen erfolgten in der Klimakammer am HLK Stuttgart (Koord. EBI)
- Nennaußentemperatur -10 °C, alle Teillastpunkte außer 63 % wurden im taktenden Betrieb gemessen.
- Optimierung: hocheffizientes Quellengebläse eingeführt
- Jahresheizzahlen $\geq 1,3$

Messergebnisse Raumheizung Gaswärmepumpe Bosch-Robur (Sole/Wasser)



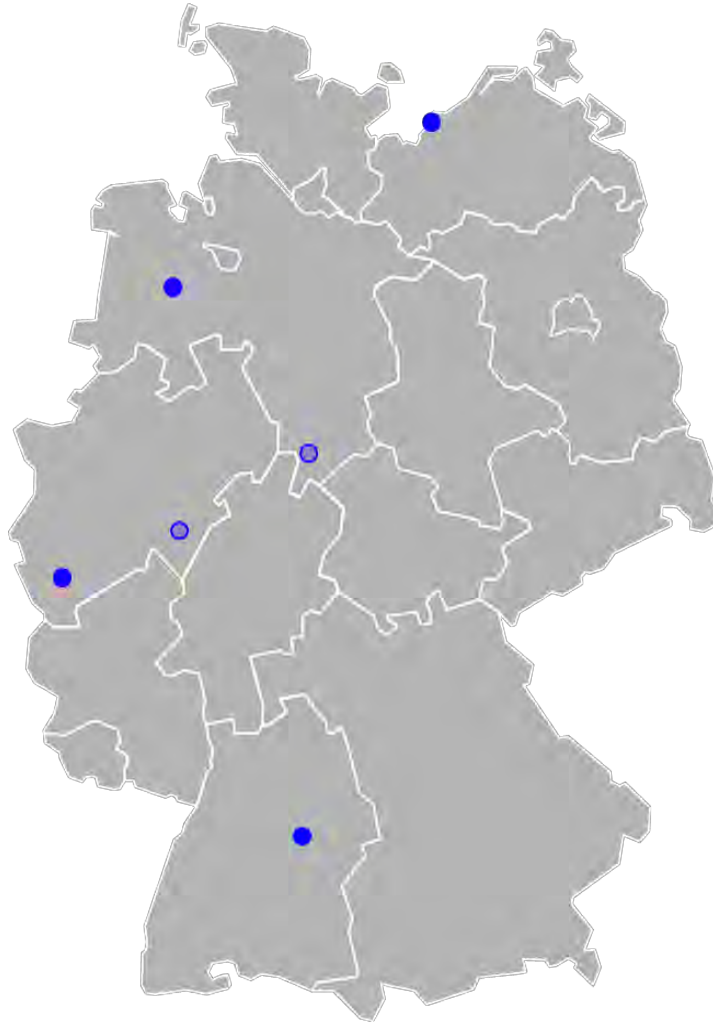
- Messungen erfolgten bei DVGW-EBI
- Alle Teillastpunkte außer 63 % wurden im taktenden Betrieb gemessen.
- Für Wasser/Wasser-GWP etwas höhere Jahresnutzungsgrade (ca. 4 – 5 %).
- Jahresheizzahlen > 1,3

Fazit

- **Luft/Wasser-GWP:** Jahresheizzahl $z_h \geq 1,3$ durch Einführung eines hocheffizienten Quellengebläses (ca. 20 % weniger elektr. Leistungsaufnahme)
- **Sole/Wasser-GWP:** Jahresheizzahl $z_h \geq 1,4$ (gilt analog für Wasser/Wasser-GWP)
- **MAP-Anerkennung** für alle Systeme



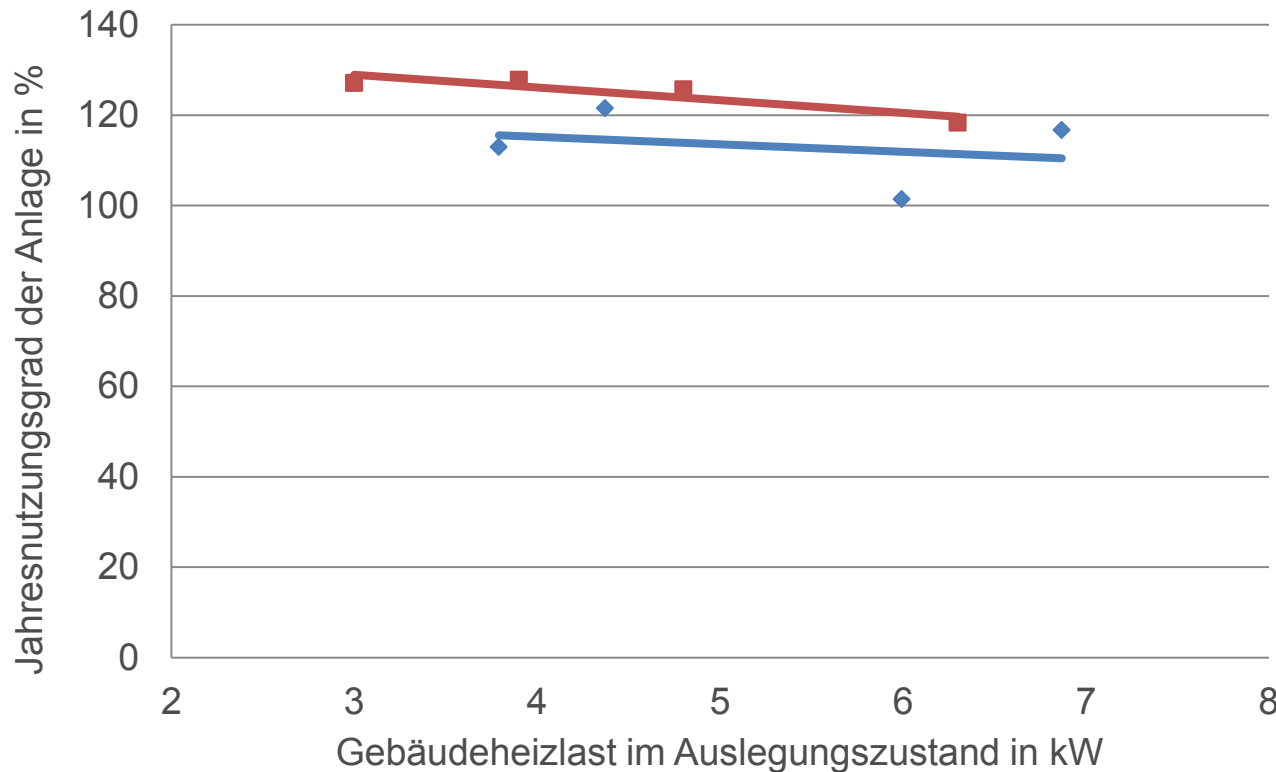
- Hintergrund und Zielsetzung
- Beschreibung der Gaswärmepumpen
- Laborergebnisse
- **Feldtestdatenauswertung**
- Wärmequellen
- Kernaussagen/Fazit



**Übersicht der vom GWI
ausgewerteten Feldtest-
anlagen und deren Standorte
in Deutschland.**

- Phase 1: 4 Anlagen
- Phase 2: 2 Anlagen

Vergleich von Feldtestdaten und Laborergebnissen Bosch-Nefit, Wärmequelle Erdwärmesonde



Randbedingungen VDI 4650-2

- Systemtemperaturen
35°C/28°C

- 18 % Jahresheizwärme-
bedarf für die Warmwasser-
bereitung

◆ IGWP-Feldtestdaten

■ GWI-Laborwerte nach
VDI 4650 Blatt 2

- Der Vergleich von vier Feldtestanlagen der IGWP*) mit GWI-Laborergebnissen nach VDI 4650-2 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (insgesamt lagen Daten von 6 Anlagen vor, 4 Datensätze wurden ausgewertet. Gründe: unterschiedliche Feldtestphasen).
- Eine Überdimensionierung hat keine negativen Auswirkungen auf den Jahresnutzungsgrad. Eine Senkung der Gebäudeheizlast führt zu höheren Jahresnutzungsgraden.



Jahresnutzungsgrade Bosch-Nefit GWP12 Generation 2 (Warmwasseranteil 11 %, Heizungsanteil 89 %)

Typ: Bosch Thermotechnik DAWP

Wärmequelle:

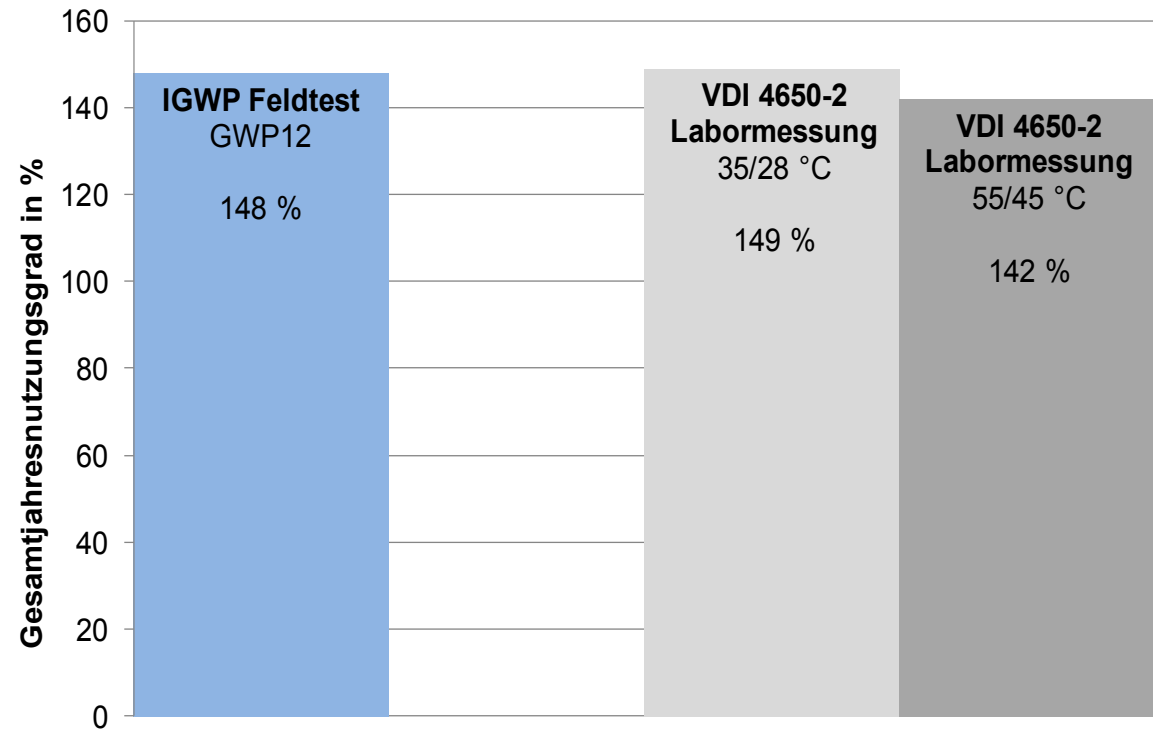
- Erdreich (Sole)

Heizsystem:

- Fußbodenheizung

Warmwasserbereitung:

- 400l Speicher + solare WW-Unterstützung
- Zirkulation: ja



Vergleich

1. VDI-Gesamtjahresnutzungsgrade

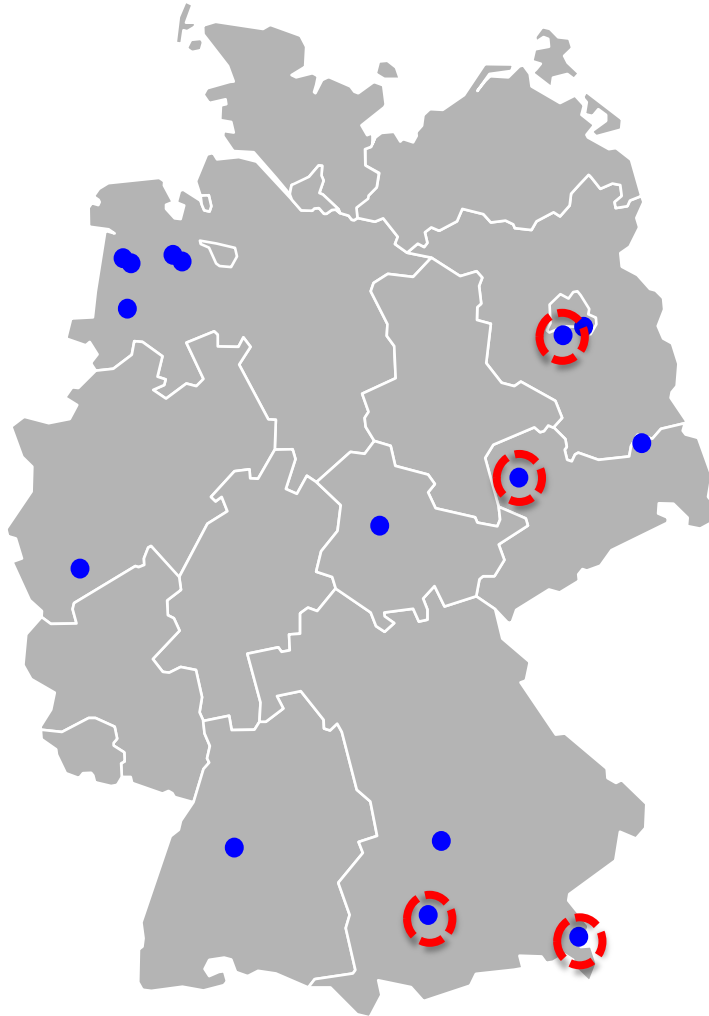
Die Gesamtjahresnutzungsgradunterschiede treten auf Grund der unterschiedlichen mittleren Heizkreistemperaturen in den Systemen 35/28°C zu 55/45°C auf.

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.

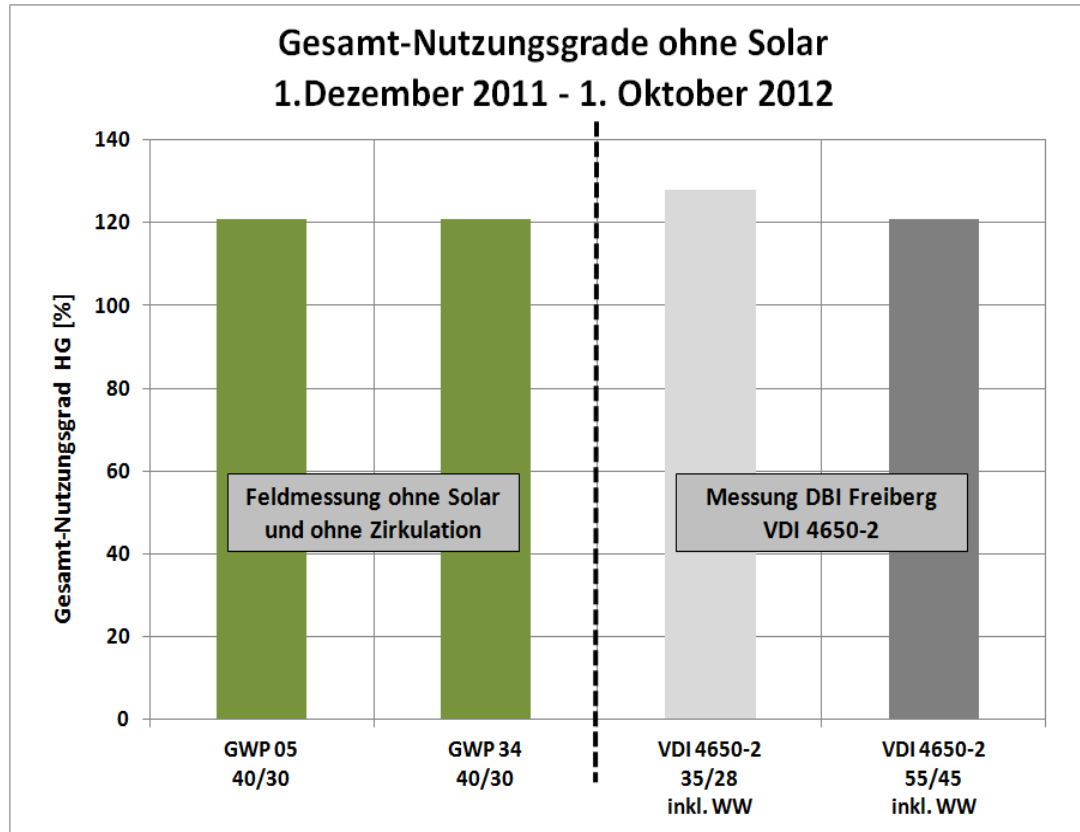
Fazit

Die aufgeführten Gesamtjahresnutzungsgrade zeigen das hohe Potenzial der Gaswärmepumpentechnik auf.



Übersicht der Feldtestanlagen und deren Standorte in Deutschland.

- 15 Feldversuchsanlagen
- 2 Laboranlagen
- 4 näher betrachtete Feldversuchsanlagen:
 - 2 Anlagen ohne thermische Solaranlage
 - 2 Anlagen mit thermischer Solaranlage zur Unterstützung der WW-Bereitung



Randbedingungen VDI 4650-2

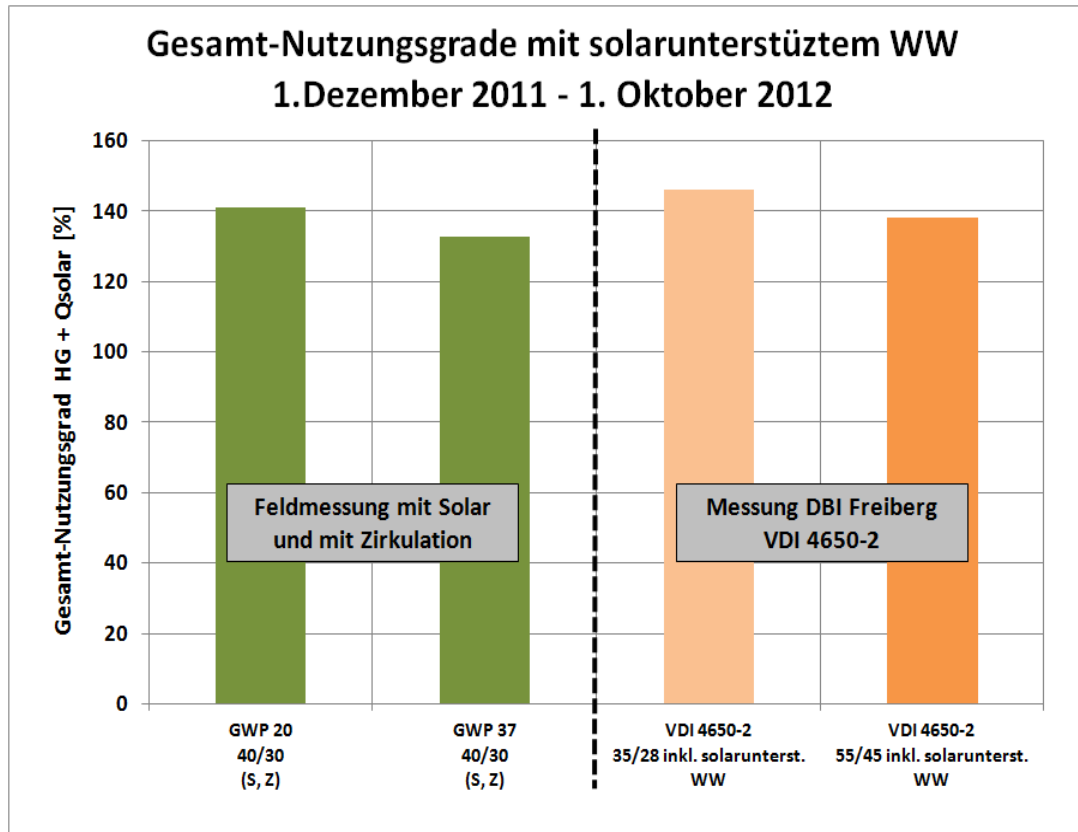
- - Systemtemperaturen 35°C/28°C bzw. 55°C/45°C
- 18 % Jahresheizwärmebedarf für die Warmwasserbereitung
- Wärmequelle: Erdwärmesonde

Feldmessung

- Systemtemperaturen: 40°C/30°C
- Betrachtungszeitraum: 1. Dez. 2011 – 1. Oktober 2012
- GWP 05: 22% Heizwärmebedarf für die Warmwasserbereitung im Betrachtungszeitraum
- GWP 34: 21% Heizwärmebedarf für die Warmwasserbereitung im Betrachtungszeitraum



- Gute Übereinstimmung des Normnutzungsgrades gemäß VDI 4650-2 mit den tatsächlich im Feld ermittelten Gesamtnutzungsgraden
- Betrachtungszeitraum Feldmessung kein komplettes Jahr



Randbedingungen VDI 4650-2

- Systemtemperaturen 35°C/28°C bzw. 55°C/45°C
- 18 % Jahresheizwärmebedarf für die Warmwasserbereitung
- 60% solarer Deckungsanteil WW
- Wärmequelle: Erdwärmesonde



Feldmessung

- Systemtemperaturen: 40°C/30°C
- Betrachtungszeitraum: 1. Dez. 2011 – 1. Oktober 2012
- Therm. Solaranlage zur Unterstützung der WW-Bereitung
- Zirkulation

- Gute Übereinstimmung des Normnutzungsgrades gemäß VDI 4650-2 mit den tatsächlich im Feld ermittelten Gesamtnutzungsgraden.
- Zirkulation wird in der VDI 4650-2 nicht berücksichtigt.
- Betrachtungszeitraum Feldmessung kein komplettes Jahr.

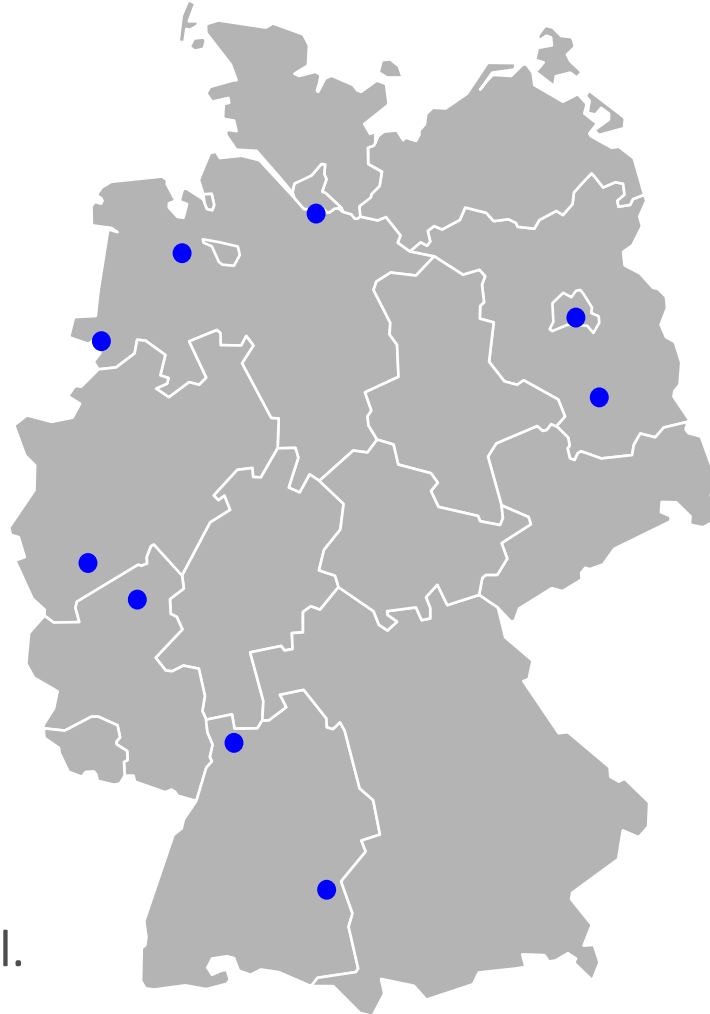
Analysierte Robur-Anlagen (DVGW-EBI)

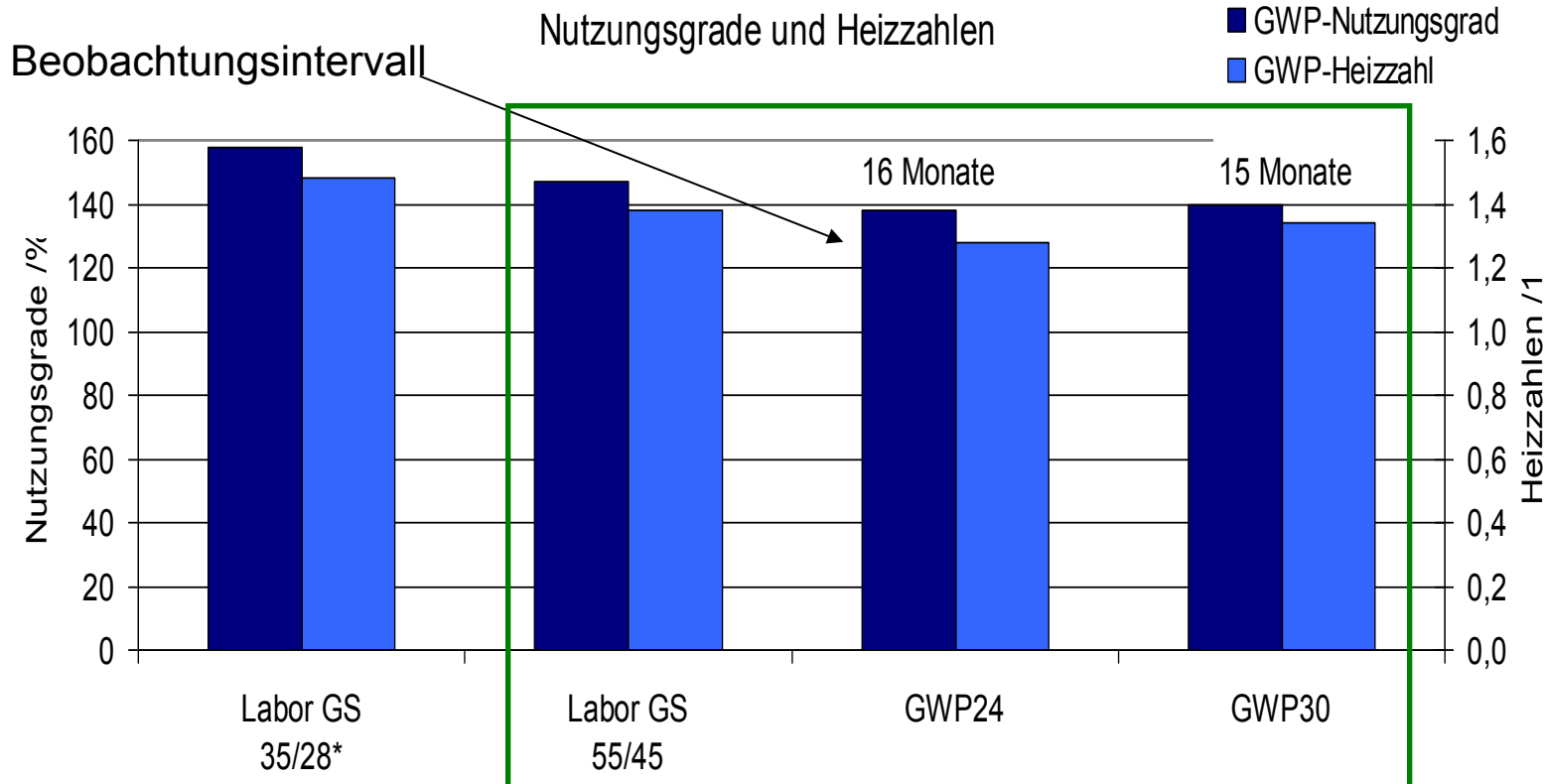
4 Anlagen in Feldtestphase 1

- Sole/Wasser-Anlagen
- erweiterte Feldmesstechnik
- Datenpunkte alle 0,25 h

3 Anlagen in Feldtestphase 2

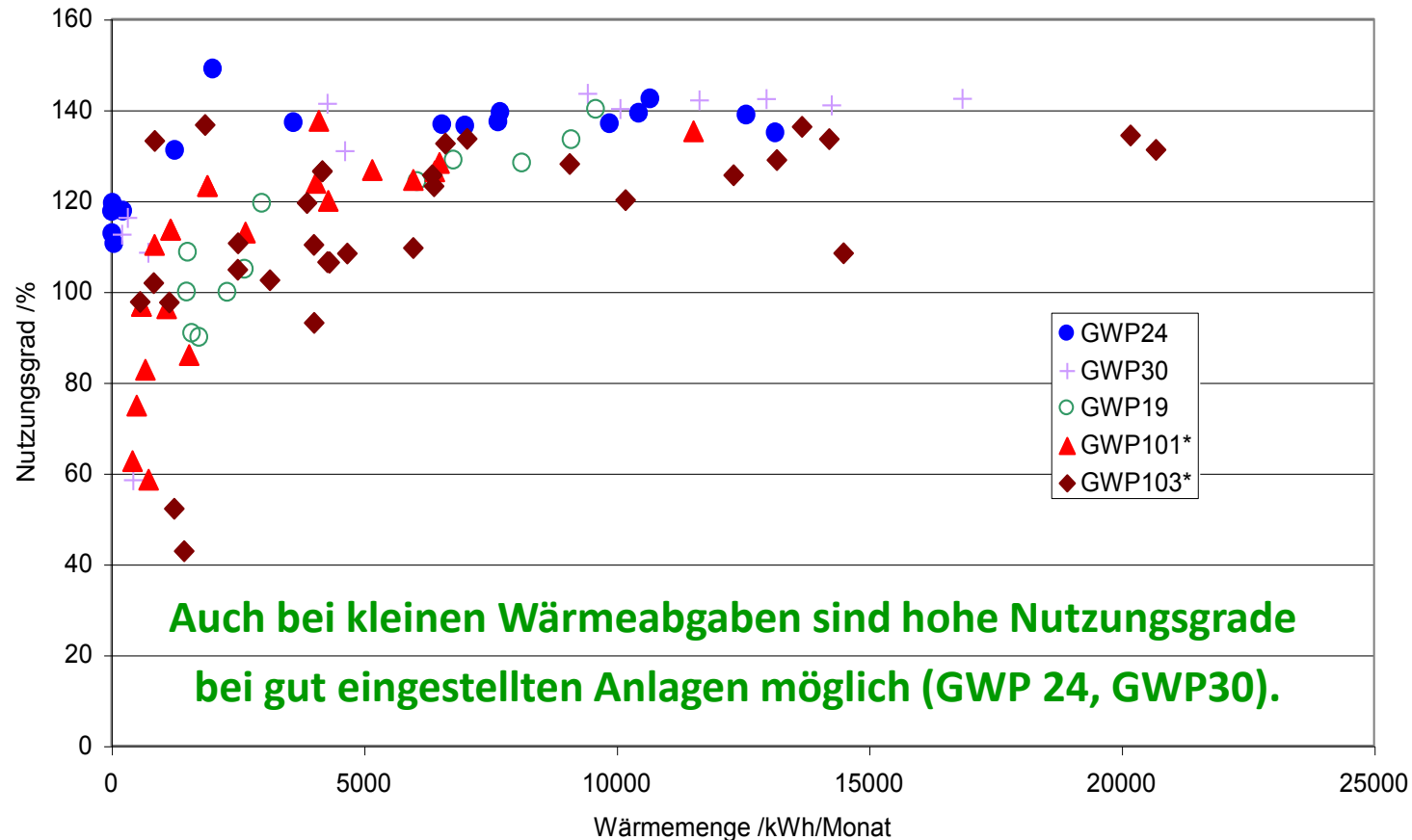
- 2 Sole/Wasser-Anlagen
- 1 Luft/Wasser-Anlage (kurze Laufzeit)
- Feldmesstechnik
- Datenpunktraster variabel, typ. monatl.
(Tage - Monate)





- Positiv: rel. geringe Abweichung zwischen Labordaten u. Felddaten, Eignung der VDI 4650-2 (s. GWP24 u. GWP30)
- Heiznetze 45 - 55 °C (Vorlauftemperatur)

Nutzungsgrade gegen monatliche GWP-Wärmeabgabe



- Nutzungsgrade als Funktion der monatlichen Wärmeabgabe
- * kennzeichnet Anlagen mit teilweise interpolierten Monatswerten

Fazit

- Abweichungen bei den Effizienzkennzahlen zwischen Feldtestergebnissen und Laborwerten z. T. nur im einstelligen Prozentbereich.
- Hohe Effizienzen auch bei hochgrädigen Heiznetzen und Warmwassererzeugung.
- monovalente Sole/Wasser-Anlagen für Heizwärme- und Warmwasser-versorgung effizient möglich (Verfügbarkeit, Vereinfachung der Anlage
⇒ Kostenreduktion).

Optimierungspotenziale

- Verfügbarkeit (Lösungspumpe, Riemenantrieb)
- Regelungstechnische Einbindung
- Masterregelung, Wärmespeicher
- Geräusch- und Wärmeentwicklung
- Service, Dokumentation und Schulung
- Bereits eingeführt: effizientes, geregeltes Quellengebläse bei Luft-GWP

**WICHTIG: Die GWP als Bestandteil eines Systems sehen,
um vorhandene Effizienzpotenziale auszuschöpfen!**

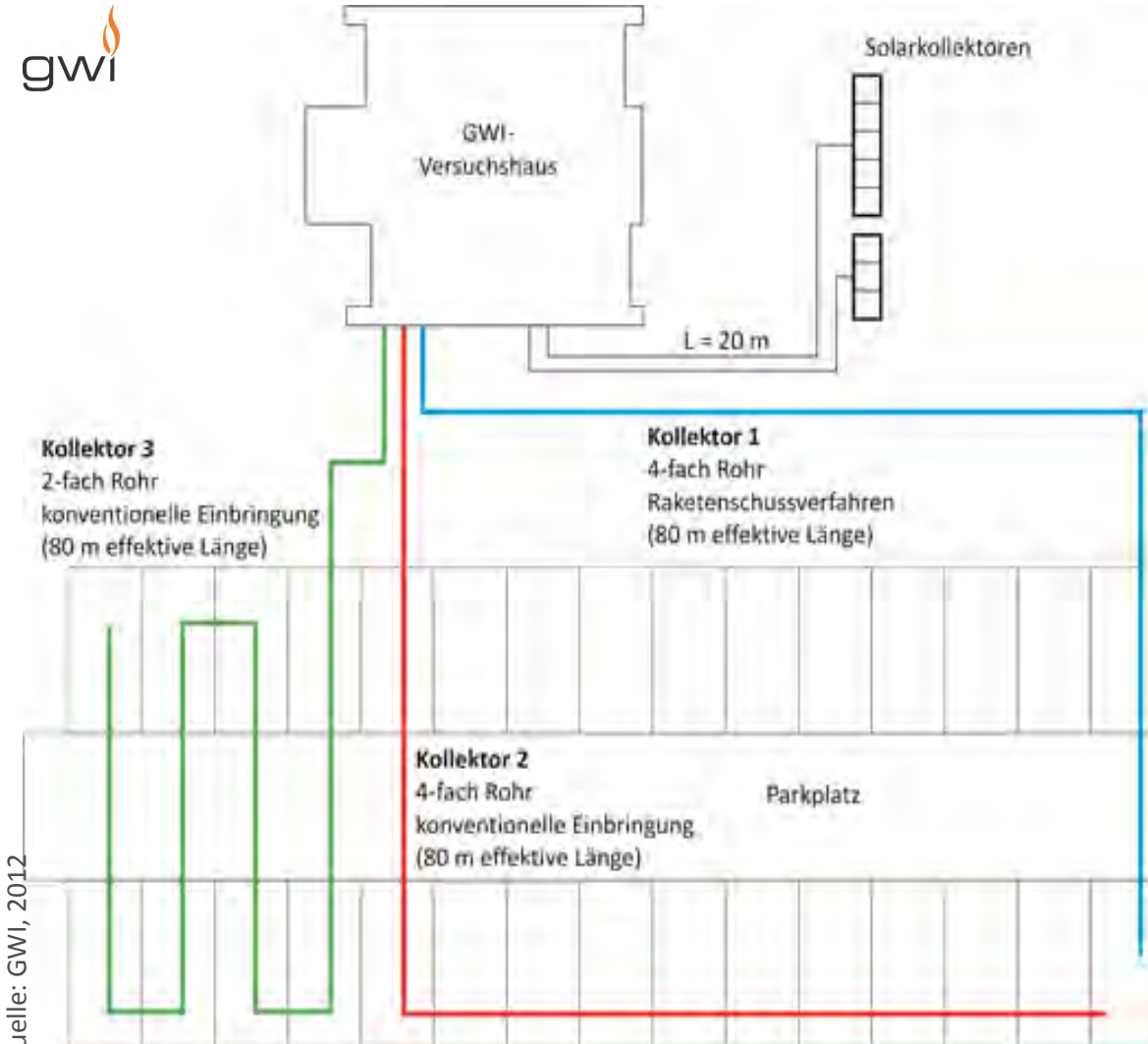
- Hintergrund und Zielsetzung
- Beschreibung der Gaswärmepumpen
- Laborergebnisse
- Feldtestdatenauswertung
- **Wärmequellen**
- Kernaussagen/Fazit

- Die Effizienz ist bei Verwendung einer Erdwärmesonde und bei Grundwassernutzung am höchsten. Die damit verbundenen Kosten sowie der Aufwand beim Genehmigungsverfahren sind zu berücksichtigen.
- Bei GWP kann die Umweltwärmequelle kleiner dimensioniert werden als bei EWP.
- Solarstrahlung kann über Solarkollektoren als Umweltwärmequelle für Gaswärmepumpen genutzt werden.



Alternative Wärmequellen - Erdflächenkollektoren am GWI

Übersicht



- Die im GWI eingesetzten Erdkollektoren wurden oberflächennah (Tiefe ca. 1,2 m) verlegt.
- Die Erdkollektoren sind mittels einer Simulation auf ihre Effizienz hin analysiert worden.
- Die Detailbetrachtung von verschiedenen Erdkollektoren führte zu verschiedenen Parameteranalysen (Stoffdaten des Erdreiches, Strömungsparameter, Rohrmaterial, Geometrie, Anordnung etc.).
- Das Ergebnis ist eine Datenmatrix als unterstützende Planungs- und Überprüfungshilfe.

Alternative Wärmequellen - Erdflächenkollektoren am GWI

Installationsbeispiel

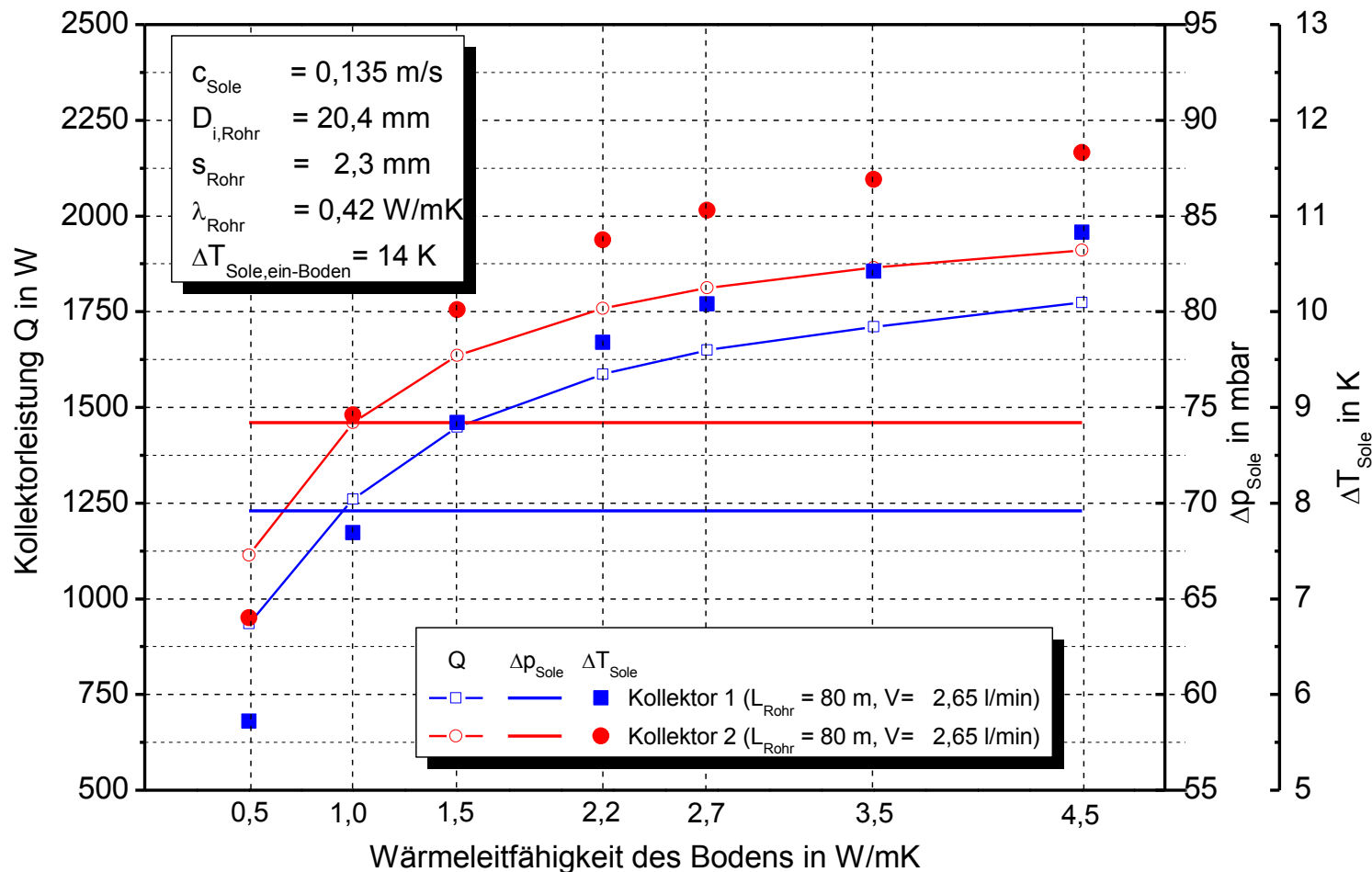
Kollektor 2 –
Konventionelle Einbringung



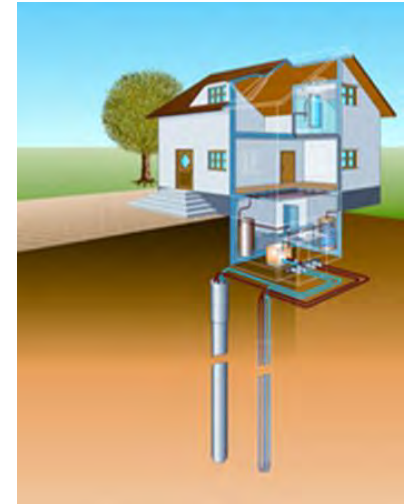
Kollektor 1 – Installation im
Raketenschussverfahren



Als Simulationsergebnis konnten Parameterabhängigkeiten (insbesondere Wärmeleitfähigkeit des Bodens zu Kollektorleistung) der untersuchten 2- und 4-fach-Rohr Erdkollektoren aufgezeigt werden.



- Paarweise gebündelte U-förmige Kunststoffrohrschleifen aus hochfestem Polyethylen werden in Tiefenbohrungen eingebracht.
- Die Sondenlänge ist abhängig vom Wärmebedarf des zu beheizenden Objektes und von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs.
- Die Bohrung wird nach dem Einbringen des Rohrbündels mit einem hoch wärmeleitfähigen, dauerhaft abdichtenden Spezialzement verpresst, um den Wärmetransport vom Erdreich zur Sonde zu gewährleisten.
- In den Sonden zirkuliert ein Wasser-Sole-Gemisch, das als Wärmeträgermedium fungiert.
- Die zur Auslegung der Erdwärmesonde relevante Kenngröße ist die spezifische Entzugsleistung. Sie ist eine Funktion der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und beträgt in Abhängigkeit vom Untergrund zwischen 20 und 90 Watt pro Meter Sondenlänge.



Modell Wärmepumpenheizung
mit Erdwärmesonde
Quelle: Bundesverband
Wärmepumpe e.V.

- Nutzung zu Heizzwecken und zur passiven Kühlung von Einfamilienhäusern (1 bis 2 Sonden).
- Beim Einsatz mehrerer Sonden müssen Mindestabstände zwischen den Sonden eingehalten werden, um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden).
- Sondenfelder (Multisondensysteme) kommen zur Wärme- oder Kälteversorgung von Gewerbe- und Industriebauten bzw. Wohnsiedlungen zum Einsatz.
- Bei der Auslegung von komplexen Erdwärmeanlagen werden computergestützte Simulationsprogramme zur numerischen Modellierung des Sondenfeldes eingesetzt.
- Da bei größeren Erdwärmeanlagen die natürliche Regeneration des Erdreichs begrenzt ist, ist ein Wechselbetrieb von Heizen und Kühlen ein optimaler Einsatzfall (höhere Entzugsleistungen von Wärme und Kälte möglich).
- Ausgeglichene Energiebilanz zwischen Heiz- und Kühlbetrieb ist für eine nachhaltige Betriebsweise notwendig.

- Hintergrund und Zielsetzung
- Beschreibung der Gaswärmepumpen
- Laborergebnisse
- Feldtestdatenauswertung
- Wärmequellen
- Kernaussagen/Fazit

- Die guten Ergebnisse im Rahmen der Feldtestuntersuchungen (vier Anlagen) bestätigen die **Robustheit des Systems** mit:
 - einer hohen Betriebsverfügbarkeit und
 - sehr guter Effizienz.
- Die Anforderungen aus dem **MAP über eine Gesamtjahresheizzahl > 1,3** werden erfüllt (Raumheizung und Warmwasserbereitung, Fußbodenheizungssystem 35/28 °C).
- Die Anforderungen des **EEWärmeG** werden mit einem **regenerativen Anteil > 15 %** erfüllt.
- Ein **optimaler Einsatz** der Gaswärmepumpe liegt bei **niedrigen Heizkreistemperaturen, hohen Umweltwärmequellentemperaturen** und **niedriger Heizlast**.
- Ein effizienter Betrieb ist auch bei höheren Heizkreistemperaturen gegeben.

- Gute Ergebnisse im Feld (15 Anlagen) bestätigen die Robustheit des Systems mit:
 - einer hohen Betriebsverfügbarkeit und
 - sehr guter Effizienz.
- Die Anforderungen aus dem MAP über eine Gesamtjahresheizzahl $> 1,3$ werden mit solar unterstützter Trinkwassererwärmung erfüllt.
- Die Anforderungen des EEWärmeG werden mit einem regenerativen Anteil $> 15\%$ erfüllt.
- Ein optimaler Einsatz der GWP liegt bei Flächenheizungen mit niedrigen Heizkreistemperaturen.
- Ein effizienter Betrieb ist auch bei höheren Heizkreistemperaturen gegeben.

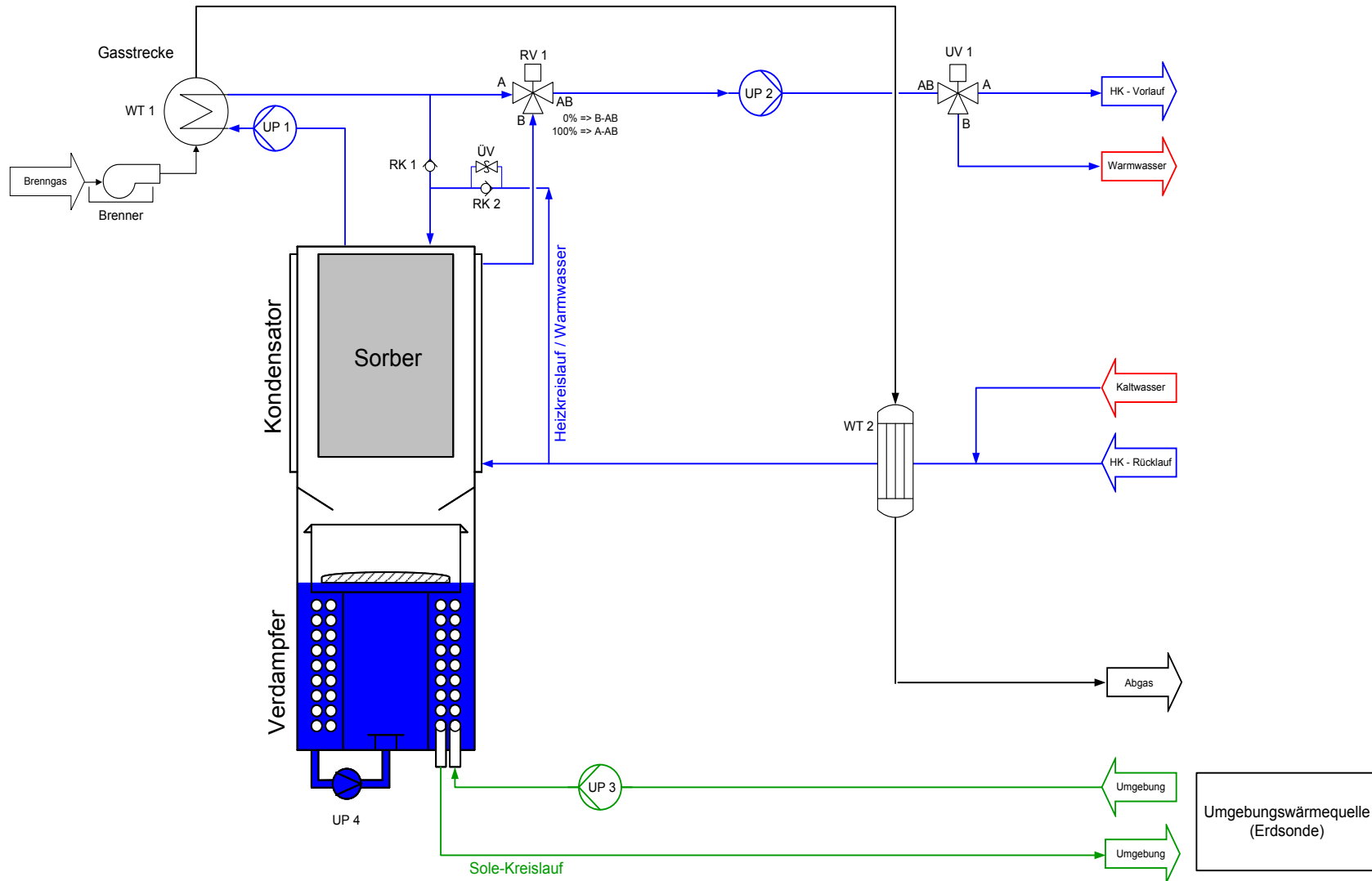
- Die am Prüfstand des DBI ermittelten Gesamtjahresnutzungsgrade gem. der VDI 4650-2 können im Feld bestätigt werden.
- Die in der VDI 4650-2 beschriebene Vorgehensweise zur Auslegung der Erdsonden für GWP kann anhand der Feldtestergebnisse ebenfalls bestätigt werden.
- Einfache Installation und Inbetriebnahme der VITOSORP 200-F
 - laut der am Feldtest beteiligten Installationsunternehmen vergleichbar mit Brennwert + Solar
- Hohe Zufriedenheit der Anlagenbetreiber wurden durch eine Umfrage bestätigt
 - Alle Anlagenbetreiber würden die Anlage nach Markteinführung im Bekanntenkreis weiterempfehlen

- Luft/Wasser-GWP: **Jahresheizzahl $\zeta_h \geq 1,3$**
 - **sehr gute Teillasteffizienzen (13 – 63 %)**
 - **Durch die Einführung eines optimierten Quellengebläse** konnten die MAP-Anforderungen erfüllt werden
- Sole/Wasser-GWP: **Jahresheizzahl $\zeta_h \geq 1,4$**
- Abweichungen bei den Effizienzkennzahlen zwischen Feldtestergebnissen und Laborwerten z.T. im einstelligen Prozentbereich.
- **Auch bei kleineren Wärmeabgaben bleibt der Nutzungsgrad nachweislich stabil.**
- **hohe Effizienzen auch bei hochgrädigen Heiznetzen (Radiatoren) und Warmwassererzeugung.**
- **Optimierungsansätze** wurden aus dem Projekt mit dem Schwerpunkt der regelungstechnischen Einbindung in das Wärmesystem abgeleitet.

- **Das Handwerk muss intensiv eingebunden werden:**
 - Planungshilfen/-tools zur Verfügung stellen
 - Schulung zu Planung und Genehmigung
 - Höhere Sorgfalt bei der Ausführung (Fehlerpotenzial bei der Installation und dem Betrieb)
- Intensive Unterweisung der Nutzer / Betreiber, um Verständnis für den Zusammenhang Nutzerverhalten, höherer Solltemperaturen und Effizienz etc. zu erzeugen.
- **MAP-Antrag vereinfachen und technische Anforderungen drastisch vereinfachen**, z. B. Verzicht auf Wärmemengenzähler.
- Weiterer **Harmonisierungsbedarf** bei Normen und Richtlinien.
- **Umweltwärmequellen besser verfügbar** machen:
 - Senkung der Kosten und
 - Vereinfachung des Genehmigungsverfahrens.

Backup

Gesamtkonzept



Jahresnutzungsgrade GWP20 Generation 3 (Warmwasseranteil 16 %, Heizungsanteil 84 %)

Typ: Viessmann Vitosorp 200-F

Wärmequelle:

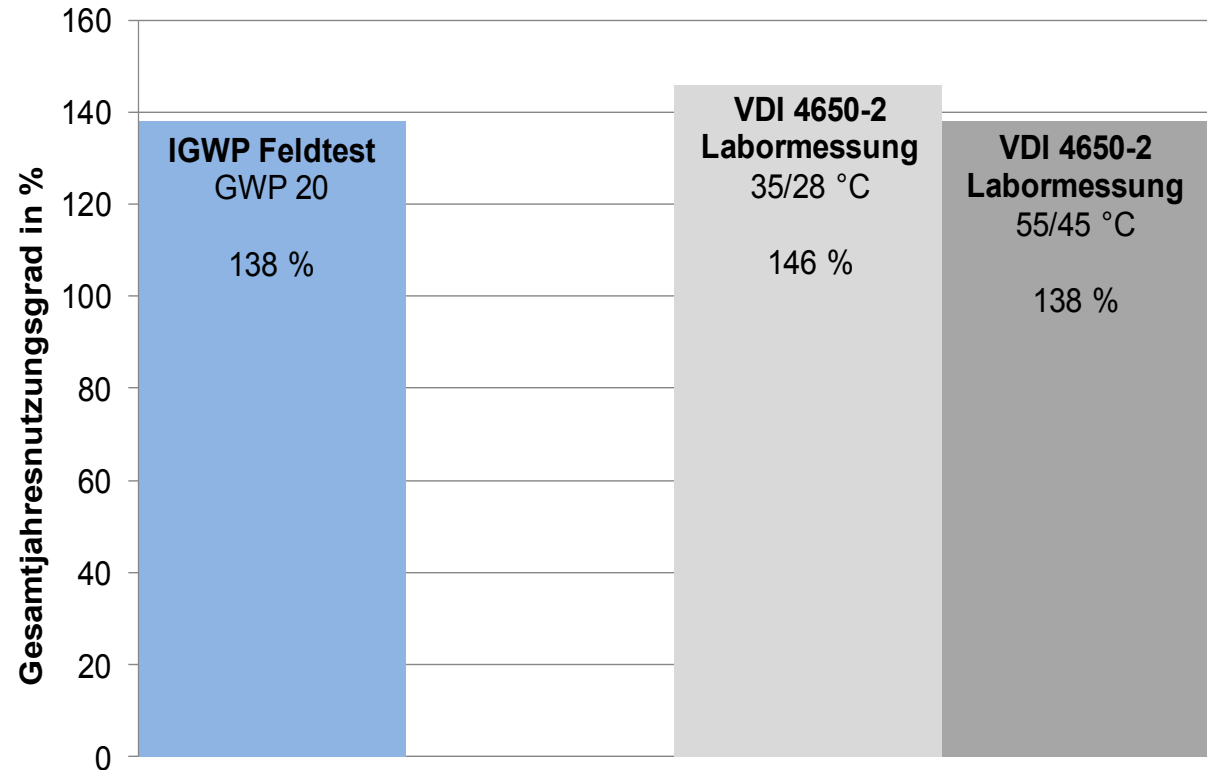
- Erdreich (Sole)

Heizsystem:

- Fußbodenheizung

Warmwasserbereitung:

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



Jahresnutzungsgrade GWP30 (Warmwasseranteil 0 %, Heizungsanteil 100 %)

Typ: Robur GAHP GS

Wärmequelle:

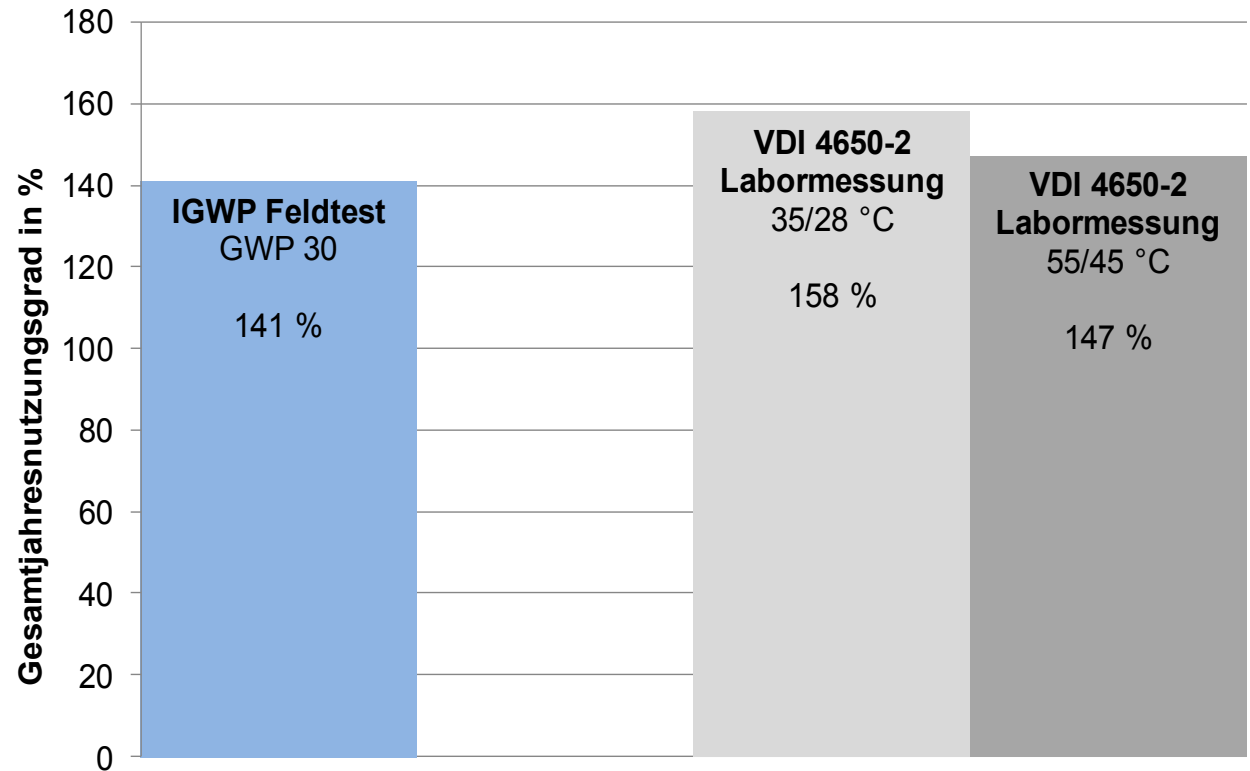
- Erdreich (Sole)

Heizsystem:

- Radiatoren

Warmwasserbereitung:

- keine



Vergleich

1. VDI-Gesamtjahresnutzungsgrade

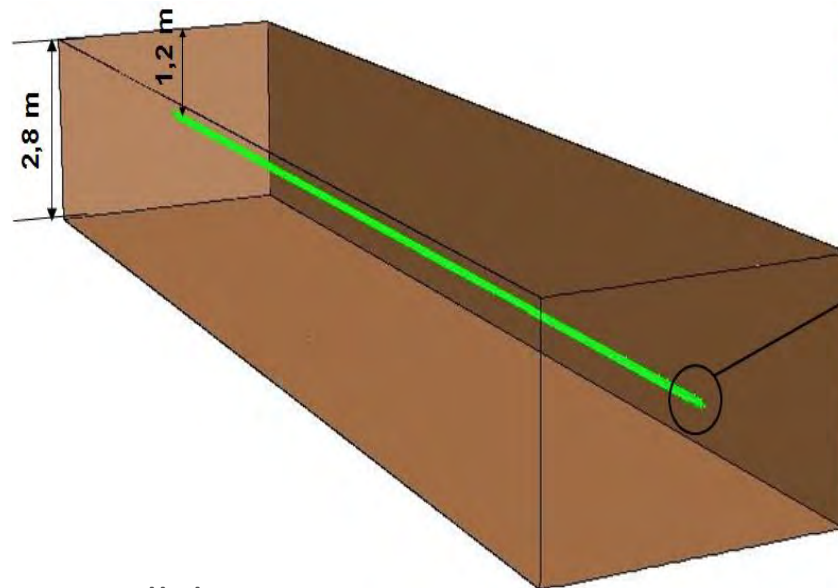
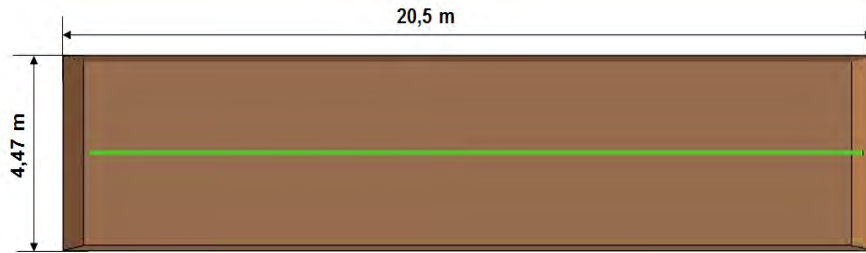
Die Gesamtjahresnutzungsgradunterschiede treten auf Grund der unterschiedlichen mittleren Heizkreistemperaturen in den Systemen 35/28°C zu 55/45°C auf.

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

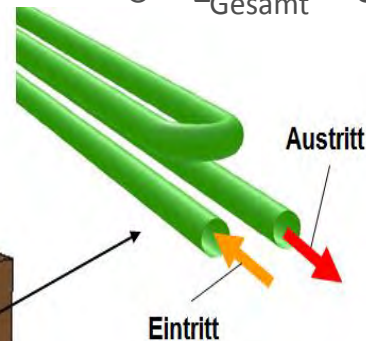
Die aufgeführten Gesamtjahresnutzungsgrade zeigen das hohe Potenzial der Gaswärmepumpentechnik auf.

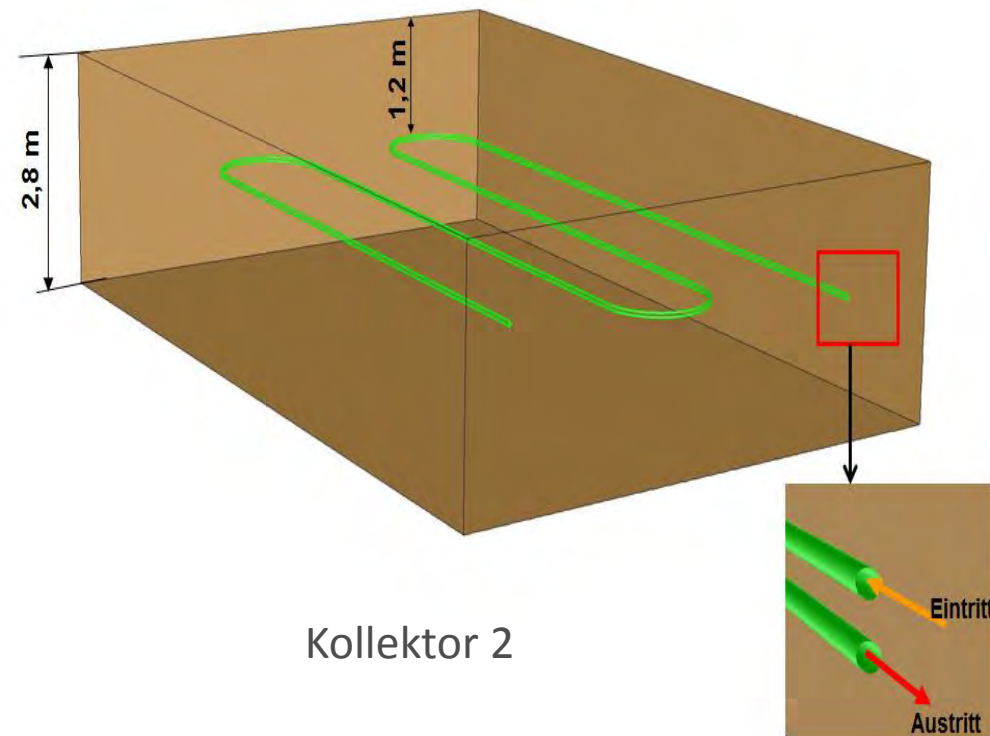


Kollektor 1

Geometrie des Kollektors 1

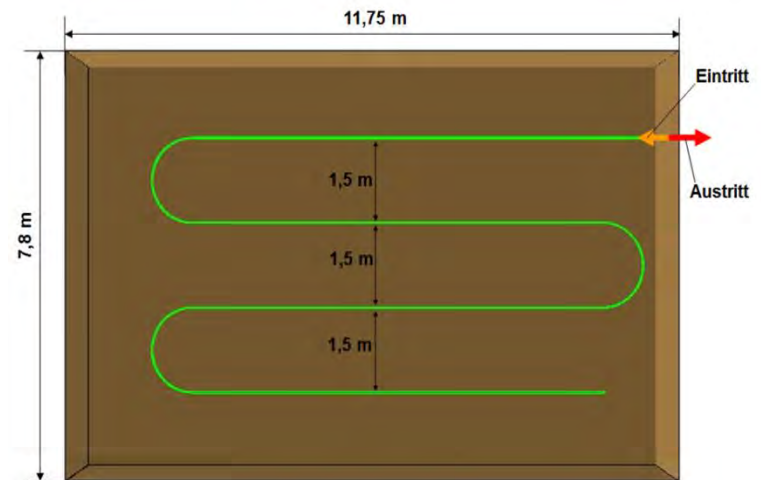
- 4-fach-Rohr
- konventionelle Einbringung
- $D_i = 20,4 \text{ mm}$
- $s = 2,3 \text{ mm}$
- $D_a = 25,0 \text{ mm}$
- $L_{\text{Gesamt}} = 80 \text{ m}$





Geometrie des Kollektors 2

- 2-fach-Rohr
- konventionelle Einbringung
- $D_i = 20,4 \text{ mm}$
- $s = 2,3 \text{ mm}$
- $D_a = 25,0 \text{ mm}$
- $L_{\text{Gesamt}} = 80 \text{ m}$





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