

Anhang 1 zu Teil 4 der Verfahrensbeschreibung

Ergänzende Betrachtungen zum Einfluss von Temperaturdifferenzen auf den Wärmefluss und die Effizienz der Anlagen

Die in Teil 4 in den Anlagen 8 und 9 dargestellten unterschiedlichen Temperaturverläufe werfen die Frage auf, wie sich die jeweiligen Temperaturdifferenzen ΔT_E zum ungestörten Erdreich auf den Wärmefluss auswirken.

- Wie verändern die höheren Erdreichtemperaturen nach der Übertragung von Wärme in den Primärkreis der Wärmepumpe den Wärmefluss im Nahbereich der Erdsonde ?
- Welche Rolle spielt die jeweils verbleibende Temperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich?
- Wie sehr wird der Wärmefluss im weiteren Umkreis durch die erhöhten Temperaturen im Nahbereich beeinträchtigt?
- Wie wirken sich diese Einflüsse auf die Effizienz der Anlagen aus?

Für eine genauere Betrachtung bietet sich als Beispiel die Regeneration einer Wärmequelle durch Umwandlung von Strom in Wärme an, weil sich hier sehr große Temperaturunterschiede zu einer Anlage ohne ein Wärmetauschersystem ergeben. Die in der Verfahrensbeschreibung als Anlage 9 enthaltene Grafik wird deshalb nochmals als Anlage 1 beigelegt.

Vergleicht man die Werte ΔT_o und ΔT_u der oberen und unteren Kennlinien hinsichtlich der jeweiligen Temperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich, so muss man annehmen, dass der weitere Wärmefluss stark beeinträchtigt wird.

Nach einer Wärmeübertragung ist bei einem neuen Ladevorgang der Wärmepumpe der Temperaturverlauf im Erdreich gekennzeichnet durch die obere Kennlinie R (grüne Linie) mit den Werten für ΔT_o . Die jeweiligen Temperaturdifferenzen zum ungestörten Erdreich unterscheiden sich deutlich von der oberen Kennlinie B (rote Linie) einer Anlage ohne Wärmetauscher.

Wie die Tabellenwerte am Rand der Grafik zeigen ändern sich aber nicht die mit der Wärmestromdichte zusammenhängenden Temperaturdifferenzen zwischen der jeweils oberen und unteren Kennlinie für die Bezugswerte (rote Linien) und die entsprechenden Werte nach einer Regeneration (grüne Linien), weil die Temperaturdifferenz an der Erdsonde ($r = 1$) unverändert 7 K beträgt.

Um die jeweiligen Temperaturunterschiede besser erkennen zu können sind die Werte in Anlage 2 tabellarisch aufgelistet worden.

Vergleicht man nun die Temperaturunterschiede ΔT_r im Nahbereich der Erdsonde für die einzelnen Teilabschnitte $r=1$ bis $r=2$, $r=2$ bis $r=3$ und so fort, so zeigen sich deutliche Veränderungen durch die Wärmeübertragung. Genau diese Unterschiede zwischen den Temperaturwerten ΔT_r in den Teilbereichen sind aber maßgebend für den Wärmefluss. Der Vergleich zeigt, dass nach der Übertragung von Wärme der Wärmefluss deutlich langsamer sein wird als zuvor.

Andererseits ist zu berücksichtigen, dass Wärmepumpenanlagen gemäß dem derzeitigen Stand der Technik bei winterlichen Betriebsbedingungen mit deutlich niedrigeren Quellentemperaturen arbeiten müssen. Die Heizleistung der Wärmepumpe ist aber in starkem Maße abhängig von der Quellentemperatur, wie die als Anlage 3 beigelegte Tabelle zeigt.

Insofern führt eine höhere Quellentemperatur als Folge der Verfahrensänderung dazu, dass aufgrund der höheren Heizleistung die Ladevorgänge kürzer und die Pausen zwischen den einzelnen Ladevorgängen länger sein werden. Dies wirkt sich wiederum positiv auf den Wärmefluss aus.

Diese gegensätzlichen Tendenzen bedeuten: Im Nahbereich der Erdsonde steht zwar genügend Wärme mit einer höheren Temperatur als zuvor für den nächsten Ladevorgang zur Verfügung, es ist jedoch für den "Nachschub" an Wärme aus dem umgebenden Erdreich mehr Zeit erforderlich.

Sofern man nur den von den Temperaturdifferenzen abhängigen Wärmefluss betrachtet, könnte man Beeinträchtigungen erwarten. Im Sommerhalbjahr wäre das kein Problem, in der Heizperiode mit einem doch deutlich größeren Wärmebedarf würde es aber zu einem Rückgang der Quellentemperatur kommen.

Dieser lässt sich jedoch zumindest weitgehend dadurch verhindern, dass in den Nachtstunden, in denen das Stromnetz stets eine Schwachlastphase hat, nach einer Freigabe durch ein SG-Signal überschüssiger Strom insbesondere aus Windkraftanlagen von der Wärmepumpe in Wärme umgewandelt und diese dann in den Erdsonden und in dem umgebenden Erdreich gespeichert wird (power-to-heat).

Bei einer umfassenden Regeneration der Wärmequelle ergeben sich im Nahbereich der Erdsonde jedoch derart hohe Erdreichtemperaturen, dass keine Wärme aus dem weiteren Umfeld mehr bis in den Nahbereich fließen kann. In dieser Zeit werden allerdings die entstandenen Temperatursenken außerhalb des Nahbereichs schon wieder ausgeglichen, die Quelle kann sich erholen.

Eine andere Beurteilung hinsichtlich einer Effizienzsteigerung ergibt sich, wenn

man in die Betrachtungen auch die nach einer Regeneration insgesamt deutlich höheren Temperaturwerte einbezieht. Wie sich die Quelltemperatur auf die erforderliche elektrische Leistung P_{el} auswirkt zeigt die in Teil 2 der Verfahrensbeschreibung als Anlage 2 enthaltene Tabelle, die hier nochmals als Anlage 4 beigelegt wird.

Im oberen Teil der Tabelle sind Quelltemperaturen von 12/7°C und 14/9°C nach einer Regeneration der Quelle aufgeführt, was zu einer Verringerung der elektrischen Leistung um mehr als 30% gegenüber einer Anlage gemäß dem Stand der Technik mit einer Solevorlauftemperatur von -2°C bei winterlichen Betriebsbedingungen führt.

Die Effizienz einer Wärmepumpenanlage ist somit nicht nur vom Wärmefluss abhängig, sondern auch von der im Erdreich gespeicherten thermischen Energie, die durch die Quelltemperaturen bestimmt wird.

Daraus folgt, dass man das Verfahren dahingehend optimieren kann, durch eine begrenzte Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpe in deren Quellenkreis, vor allem aber durch eine Regeneration der Quelle mittels der Umwandlung von (überschüssigem) Strom in Wärme die Betriebsbedingungen deutlich zu verbessern und so die Effizienz zu steigern und den Stromverbrauch zu verringern.

Die Temperatur der Wärmequelle selbst - die im Erdreich gespeicherte Wärme der Sonne - wird durch die Zuführung von Wärme bei einer Regeneration nicht erhöht. Diese Wärme verbleibt vor allem in der Erdsonde und nur bei sehr hohen Temperaturen zu einem geringen Teil auch im Nahbereich der Sonde und bewirkt lediglich, dass sich das Erdreich aufgrund der höheren Solerücklauftemperatur nicht mehr so stark abkühlt, der Wärmeentzug aus dem Erdreich also bei höheren Temperaturen erfolgt als bei Anlagen gemäß dem Stand der Technik.

Diese zugeführte Wärme kann auch über den aktuell erforderlichen Bedarf hinaus während der Heizperiode für nur kurze Zeit dezentral in den Erdsonden sowie in deren Nahbereich im Erdreich gespeichert werden. Dafür werden im Gegensatz zu den ganzjährigen Großwärmespeichern keine hohen Kosten für den Bau und den Betrieb entstehen und auch keine Wärmeverluste auftreten, wenn bei der Einlagerung die Temperatur nicht wesentlich höher ist als die Temperatur des Erdreichs. Dies würde dazu beitragen, dass die Betreiber von Windkraftanlagen bei einer Niedriglast ihre Anlagen nicht mehr zeitweise abschalten müssten, wenn mehr EE-Strom erzeugt werden kann als verbraucht wird.

Nur durch einen weiteren Ausbau der Windkraftanlagen wird es aber gelingen, die bevorstehende Abschaltung von Kernkraft- und Kohlekraftwerken durch die Erzeugung von Erneuerbarer Energie auszugleichen und so die Klimaziele doch

noch zu erreichen. Die Problematik von Überkapazitäten durch den Zubau von weiteren Windkraftanlagen dürfte sich also noch verstärken, wenn nicht dieser EE-Strom zu reduzierten Preisen (ohne die derzeit noch überhöhten Abgaben und Steuern) für eine klimaschonende Erzeugung von Wärme genutzt wird - die bei weitem hinsichtlich der Effizienz günstigste Art der Umwandlung von Strom in eine andere Energieform und auch hinsichtlich der Klimaziele besonders wirksam, weil die Erzeugung von Wärme mit mehr als 50 % am Endenergieverbrauch beteiligt ist.

Auch die Stromnetze als Mittler zwischen Stromerzeugung und Stromverbrauch werden gleich mehrfach profitieren. Um trotz der üblichen starken Schwankungen im Stromverbrauch immer die Netzstabilität erhalten zu können ist bisher in den Kraftwerken eine stets sofort einsetzbare Regelreserve vorzuhalten, diese könnte deutlich reduziert werden. Der Ausgleich von Lastschwankungen könnte mehr als bisher statt dessen durch das Abschalten von Wärmepumpen bei Lastspitzen und das Zuschalten bei zu geringer Last in den Nachtstunden erfolgen.

Dank der im Aufbau befindlichen Sektorkopplung der Energiesysteme wird es in vielen Bereichen zu Effizienzsteigerungen kommen, die auch die Energiewende im Wärmebereich fördern werden, die zu erwartende "Grüne Politik" der nächsten Jahre dürfte diese Entwicklung positiv beeinflussen.

Anlagen:

1. Regeneration der Wärmequelle durch Umwandlung von Strom in Wärme
2. Einfluss der Übertragung von Wärme auf die Erdreichtemperaturen im Nahbereich der Erdsonde (Tabelle)
3. Abhängigkeit der Heizleistung von Wärmepumpen von der Quelltemperatur
4. Einfluss der Quelltemperatur auf elektrische Leistung und Erdwärme



R	r	ΔT_o	ΔT_u
	1	1	8
	2	0,5	4,0
	3	0,33	2,67
	4	0,25	2,00
	5	0,20	1,60
	6	0,17	1,33
	7	0,14	1,14
	8	0,12	1,00
	9	0,11	0,89
	10	0,10	0,80

Anlage mit
Wärmetauscher
nach einer
Regeneration der
Wärmequelle

B	r	ΔT_o	ΔT_u
	1	10	17
	2	5,0	8,5
	3	3,3	5,7
	4	2,5	4,25
	5	2,00	3,40
	6	1,67	2,83
	7	1,43	2,43
	8	1,25	2,12
	9	1,11	1,89
	10	1,0	1,7

Anlage ohne
Wärmetauscher
(Bezugswerte)

Links: Temperaturen
an der Außenwand
der Erdsonde

Anlage 1 Regeneration der Wärmequelle durch Umwandlung von Strom in Wärme

B = Bezugswerte = Temperaturen ohne Wärmetauscher (VL - 2 °C / RL - 7 °C)
R = Temperaturen nach einer Regeneration der Quelle (VL 7 °C / RL 2 °C)

Anlage mit Wärmetauscher nach einer Regeneration der Wärmequelle

r	ΔT_o	ΔT_r	T (°C)	ΔT_u	ΔT_r	T (°C)
1	1		9	8		2
		0,5			4,0	
2	0,5		9,5	4,0		6
		0,17			1,33	
3	0,33		9,67	2,67		7,33
		0,08			0,67	
4	0,25		9,75	2,00		8,00
		0,05			0,40	
5	0,20		9,80	1,60		8,40
		0,03			0,27	
6	0,17		9,83	1,33		8,67
		0,03			0,19	
7	0,14		9,86	1,14		8,86
		0,02			0,14	
8	0,12		9,88	1,00		9,00
		0,01			0,11	
9	0,11		9,89	0,89		9,11
		0,01			0,09	
10	0,10		9,90	0,80		9,20

Anlage ohne Wärmetauscher gemäß dem Stand der Technik

r	ΔT_o	ΔT_r	T (°C)	ΔT_u	ΔT_r	T (°C)
1	10		0	17		-7
		5,0			8,5	
2	5,0		5	8,5		1,5
		1,7			2,8	
3	3,3		6,7	5,7		4,3
		0,8			1,45	
4	2,5		7,5	4,25		5,75
		0,5			0,85	
5	2,00		8,0	3,40		6,60
		0,33			0,57	
6	1,67		8,33	2,83		7,17
		0,24			0,40	
7	1,43		8,57	2,43		7,57
		0,18			0,31	
8	1,25		8,75	2,12		7,88
		0,14			0,23	
9	1,11		8,89	1,89		8,11
		0,11			0,19	
10	1,00		9,00	1,70		8,30

Anlage 2 Einfluss der Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis in den Quellenkreis auf die Erdreichtemperaturen im Nahbereich der Erdsonde

Simulation von Anlagen mit WP-OPT[®]

Dipl.-Phys. Christina Hönig, WPsoft GbR Dresden

1. Einführung

Für den Anwender von Wärmepumpenheizungen stellen Prognosen zum Betriebsverhalten der Anlage ein wesentliches Kriterium bei der Kaufentscheidung dar. Sie erwarten für einen langjährig störungsfreien Betrieb nicht nur die richtige Dimensionierung aller Systemkomponenten, sondern auch einen geringen Elektroenergieverbrauch.

Prognosen hierfür erfordern wegen der in Abbildung 1 dargestellten Temperaturabhängigkeit der technischen Daten von Wärmepumpenheizungen einen hohen rechentechnischen Aufwand.

Vorlauf- temp. (°C)	35	50	35	50	35	50	35	50
Quellen- temp. (°C)	Heizleistung in kW		Leistungsaufnahme in kW		Leistungszahl		Kälteleistung in kW	
-5	15,90	15,20	4,00	5,80	3,97	2,62	12,00	9,50
-2	17,50	16,60	4,10	5,80	4,27	2,86	13,70	11,00
0	18,90	17,30	4,10	5,80	4,61	2,98	14,80	12,00
2	20,00	18,60	4,10	5,80	4,88	3,21	16,00	12,90
5	22,00	20,30	4,10	5,80	5,37	3,50	18,10	14,70
7	23,40	21,40	4,10	5,80	5,71	3,69	19,60	15,90
10	25,80	23,40	4,20	5,80	6,14	4,03	21,80	17,80

Tabelle 1: Typische technische Daten einer Sole-Wasser-Wärmepumpe

Anlage 3 Abhängigkeit der Heizleistung von Wärmepumpen von der Quelltemperatur

Anlage gemäß dem Stand der Technik bzw. Anlage mit abgeschaltetem Wärmetauscher (Normalbetrieb) *

-2/-7 °C	Quelle 0/-5 °C	2/-3 °C	4/-1 °C	6/1 °C	8/3 °C	10/5 °C	12/7 °C	14/9 °C
313 K	$T_0 = 40\text{ °C} = 313\text{ K}$	313 K						
-4,5 °C	$T_u = -2,5\text{ °C} = 270,5\text{ K}$	-0,5 °C	1,5 °C	3,5 °C	5,5 °C	7,5 °C	9,5 °C	11,5 °C
44,5 K	$\Delta T = 42,5\text{ K}$	40,5 K	38,5 K	36,5 K	34,5 K	32,5 K	30,5 K	28,5 K
3,517	$\varepsilon = 3,682$	3,864	4,065	4,288	4,536	4,815	5,131	5,491
2,843 kW	$P_{el} = 2,716\text{ kW}$	2,588 kW	2,460 kW	2,332 kW	2,204 kW	2,077 kW	1,949 kW	1,821 kW
	-4,5 % gg. Bezugswert	-9,0 %	-13,5 %	-18,0 %	-22,5 %	-27,0 %	-31,5 %	-36,0 %
7,157 kW	$P_{EW} = 7,284\text{ kW}$	7,412 kW	7,540 kW	7,668 kW	7,796 kW	7,923 kW	8,051 kW	8,179 kW
	+1,8 % gg. Bezugswert	+3,6 %	+5,3 %	+7,1 %	+8,9 %	+10,7 %	+12,5 %	+14,3 %



Anlage mit zugeschaltetem Wärmetauscher (Übertragung) bei einer Erhöhung um 0,4 °C *

<u>Bezugswerte</u>	Quelle 0,4/-4,6 °C	2,4/-2,6 °C	4,4/-0,6 °C	6,4/1,4 °C	8,4/3,4 °C	10,4/5,4 °C
für alle folgenden Angaben zur elektrischen Leistung und zum Anteil der Erdwärme	$T_0 = 39,8\text{ °C} = 312,8\text{ K}$	312,8 K				
	$T_u = -2,1\text{ °C} = 270,9\text{ K}$	-0,1 °C	1,9 °C	3,9 °C	5,9 °C	7,9 °C
	$\Delta T = 41,9\text{ K}$	39,9 K	37,9 K	35,9 K	33,9 K	31,9 K
	$\varepsilon = 3,733$	3,920	4,127	4,356	4,613	4,903
	$P_{el} = 2,786\text{ kW}$	2,653 kW	2,520 kW	2,387 kW	2,254 kW	2,121 kW
	-2,0 % gg. Bezugswert	-6,7 %	-11,4 %	-16,0 %	-20,7 %	-25,4 %
	$P_{EW} = 7,254\text{ kW}$	7,387 kW	7,520 kW	7,653 kW	7,786 kW	7,919 kW
+1,4 % gg. Bezugswert	+3,2 %	+5,1 %	+6,9 %	+8,8 %	+10,6 %	
zusätzl. elektr. Leistung	+2,57 %	+2,51 %	+2,44 %	+2,36 %	+2,27 %	+2,12 %

Diese Werte ergeben sich nach einer zwischenzeitlichen **Regeneration der Quelle** (power-to-heat)

* Alle Berechnungen für eine Radiatorenheizung einer Anlage mit einer Heizlast von 10 kW und Heizkreistemperaturen von 45/35 °C

Anlage 4 Einfluss der Quelltemperatur bei einer Radiatorenheizungsanlage ohne bzw. mit zugeschaltetem Wärmetauscher auf die Anteile der elektrischen Leistung und der Erdwärme