

## **Anhang 1 zum Verfahren zur Steigerung der Effizienz von Wärmepumpenanlagen und zur Regeneration der Wärmequelle**

### **Auswirkungen der Verfahrensänderung auf die Erdreichtemperaturen im Nahbereich der Erdsonde und den Wärmefluss**

Ein Problem bei Sole/Wasser-Wärmepumpen besteht darin, dass für die Wärmeleitung im trockenen Erdreich relativ viel Zeit benötigt wird, so dass kein schneller Ausgleich von Temperaturdifferenzen möglich ist, wenn Wärme durch Erdsonden entzogen wurde. Der Wärmefluss ist dadurch begrenzt.

Die Temperaturverteilung um die Sonde herum wird bestimmt durch den Abstand zur Sonde. Die Flächen  $F$  um eine zylindrische Sonde vergrößern sich proportional zum Radius  $r$ , die Wärmestromdichte (der Wärmestrom pro Flächeneinheit) nimmt umgekehrt proportional zur Entfernung  $r$  ab. Die für den Wärmefluss notwendige Temperaturdifferenz  $\Delta T_E$  zum ungestörten Erdreich verändert sich somit ebenfalls proportional zur Wärmestromdichte.

Die als Anlage A1-1 beigelegte Grafik zeigt stark vereinfacht, wie man sich die Temperaturverteilung im Erdreich im Nahbereich der Erdsonde vorzustellen hat. Wegen der viel Zeit erfordernden Wärmeausbreitung im Erdreich ist für die Dauer des Ladevorgangs einer Wärmepumpe vor allem dieser Nahbereich für den Wärmeübergang in die Erdsonde von Bedeutung.

Alle Temperaturangaben (jeweils in °C) beziehen sich auf die eingezeichnete Erdsonde und deren Umfeld ab einer Tiefe von 10 m unter der Erdoberfläche, wo von einer ganzjährig gleichbleibenden Temperatur im ungestörten Erdreich von 10°C auszugehen ist.

Für eine Solevorlauftemperatur von +2°C müsste sich bei einer angenommenen Temperaturdifferenz von 2 K für den Wärmeübergang vom Erdreich zur Erdsonde eine Temperatur von 4°C an der Sonde außen einstellen, das wäre also eine Temperaturdifferenz  $\Delta T_E = 6$  K zum ungestörten Erdreich. Aber schon im Abstand von  $r = 2$  würde sich diese auf 3 K halbieren, die Erdreichtemperatur würde damit bereits 7°C betragen.

Wenn sich Wärme im Erdreich so schnell wie im Wasser ausbreiten könnte, würde das Erdreich um die Sonde herum nicht so stark abkühlen. Die für den Wärmeübergang in die Sonde notwendige Temperaturdifferenz von etwa 2 K würde sich bei einem höheren Temperaturniveau einstellen, die Quelltemperatur der Wärmepumpe könnte sich deutlich um einige Grad erhöhen und die Leistungszahl steigen.

Diesem dem Wärmeträger Erdreich anhaftenden Nachteil der nur langsamen Ausbreitung der Wärme kann entgegengewirkt werden, indem man versucht, die Auskühlung des Erdreichs durch die in die Sonde zurückfließende abgekühlte Sole zu verringern.

Um das beim Wärmeentzug unvermeidliche Absinken der Temperatur im Erdreich zu mindern kann schon während der Ladevorgänge der Wärmepumpe die Solevorlauftemperatur durch eine begrenzte Entnahme von Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpe erhöht werden, die Quelltemperatur wird somit stabilisiert.

Durch die Übertragung von Wärme erhöht sich aber nicht nur die Solevorlauftemperatur (was zu einer höheren Leistungszahl führt), sondern aufgrund der ungefähr gleichbleibenden Spreizung im Primärkreis von etwa 5 K auch die Solerücklauf-temperatur (was der Auskühlung des Erdreichs entgegenwirkt).

Dies führt zu einer Regeneration der Quelle bereits während des Betriebs der Wärmepumpe, auch schon in der Heizperiode mit dem höchsten Wärmebedarf, nicht erst bei wieder höheren Außentemperaturen und dadurch abnehmendem Wärmebedarf.

Um immer einen ausreichenden Wärmefluss zur Sonde zu gewährleisten, muss die Temperaturdifferenz  $\Delta T_E$  zwischen Erdreich und Erdsonde stets groß genug sein - dies ist die Aufgabe des Optimierungsprogramms, das unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen Betriebsbedingungen diese Temperaturdifferenz dem allmählich zunehmendem Wärmebedarf in der Heizperiode anpassen muss.

Die Temperaturen im Erdreich im Umkreis der Erdsonde ändern sich ständig, sowohl durch den Wärmeentzug während eines Ladevorgangs der Wärmepumpe als auch in der darauf folgenden Pause bis zum nächsten Ladevorgang durch aus dem weiter entfernten Erdreich nachfließende Wärme. Man kann also nur einen Bereich beschreiben, in dem diese Temperaturänderungen stattfinden.

In der als Anlage A1-1 beigefügten Grafik wird dieser Temperaturbereich am Beispiel einer Sole/Wasser-Wärmepumpe dargestellt für die winterlichen Betriebsbedingungen einer Anlage gemäß dem Stand der Technik (gekennzeichnet mit B = Bezugswerte = rote Linien) und einer Anlage mit einem Wärmetauscher zur Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpe in deren Solekreis (W = Wärmeübertragung = grüne Linien).

Die Temperaturen in der Erdsonde sind auf der linken Seite der Grafik an der Sonde angegeben, sie bewegen sich zwischen VL = - 2°C / RL = - 7°C als Bezugswerte einer Anlage gemäß dem Stand der Technik und VL = + 2°C / RL = - 3°C nach einer Wärmeübertragung mit einer Temperaturerhöhung um 4 K.

Die daraus sich ergebenden Temperaturverläufe im Erdreich im Nahbereich der Erdsonde werden rechts von der Erdsonde dargestellt, die in Abhängigkeit vom Radius  $r$  ermittelten Temperaturdifferenzen zum ungestörten Erdreich sind den nebenstehenden Tabellen zu entnehmen.

Dies gilt sowohl für die jeweils niedrigste Solerücklauftemperatur eines Ladevorgangs mit einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T_u$  zum ungestörten Erdreich mit einer konstanten Temperatur von  $10^\circ\text{C}$  in Tiefen von mindestens 10 m unterhalb der Erdoberfläche wie auch für die jeweils höchste Solevorlauftemperatur dieses Ladevorgangs mit einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T_o$  zum ungestörten Erdreich.

Die durch eine rote bzw. grüne Linie gekennzeichnete niedrigste Temperatur im Erdreich würde sich ergeben für eine (fiktive) dauerhaft gleichbleibende Solerücklauftemperatur, dabei könnte die Temperatur im Erdreich nicht unter die Temperatur in der Sonde abfallen.

Die gleichfalls durch eine rote bzw. grüne Linie beschriebene höchste Temperatur im Erdreich würde sich ergeben für einen (fiktiven) Zustand, bei dem die aus dem Erdreich nachfließende Wärme bis zum Beginn des nächsten Ladevorgangs gerade die Sole in der Sonde auf die angegebene Temperatur erwärmt hat. Dabei ist für diesen Vorgang des Übergangs von Wärme vom Erdreich zur Erdsonde eine dafür erforderliche Temperaturdifferenz von 2 K zugrunde gelegt worden (dies entspricht real aufgetretenen Temperaturdifferenzen bei Ladevorgängen).

Der schematischen Darstellung der Grafik ist zu entnehmen, wie sich eine Erhöhung der Quelltemperatur um 4 K auf die Temperaturverteilung im Erdreich und damit auf den Wärmefluss auswirken würde.

Die gemäß VDI 4650 auf etwa 5 K auszulegende Spreizung im Solekreis ist nahezu konstant, Vorlauf- und Rücklauftemperatur ändern sich also in gleichem Maße bei der Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpe.

Durch die Zuführung von Wärme aus dem Heizkreis kühlt sich die zur Erdsonde zurückfließende Sole nicht mehr so stark ab, in diesem Beispiel nur auf  $-3^\circ\text{C}$  statt auf  $-7^\circ\text{C}$ . Dementsprechend verringert sich auch die Erdreichtemperatur direkt an der Sonde nicht mehr so stark, die für die Wärmepumpe maßgebliche Quelltemperatur ist somit deutlich höher, die Differenz von 7 K bezogen auf den niedrigsten Wert der Solerücklauftemperatur bleibt erhalten.

Lässt der Wärmefluss dadurch nach, weil die Temperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich geringer ist? Das ist differenziert zu betrachten. Für den nächsten Ladevorgang steht im Nahbereich der Erdsonde - und nur der ist aufgrund der im weitgehend trockenen Erdreich sehr langsamen Ausbreitung von Wärme entscheidend - sogar Wärme mit einer höheren Temperatur zur Verfügung.

In dem anschließenden Bereich des umgebenden Erdreichs ergeben sich jedoch schlechtere Bedingungen. Dort führen die höheren Temperaturen im Nahbereich der Erdsonde dazu, dass sich der Wärmefluss verringert, es braucht daher mehr Zeit, die Wärme aus dem weiter entfernten Bereich zur Erdsonde zu transportieren.

Der Wärmefluss in den weiter entfernten Bereichen trägt zwar nur mit einer größeren Verzögerung zur Wärmeübertragung in die Sondenanlage bei, dennoch ist dies bei der Auslegung der Anlage zu berücksichtigen. Diese muss ohnehin für eine etwas höhere Entzugsleistung ausgelegt werden, da sich der elektrische Leistungsanteil an der Wärmeerzeugung durch die verbesserten Betriebsbedingungen der Wärmepumpe verringert.

Trotzdem kann bei einem erhöhten Wärmebedarf in der Heizperiode die Zeit zwischen den Ladevorgängen dann möglicherweise nicht mehr ausreichen, die Sole auf die erforderliche Vorlauftemperatur zu erwärmen.

Ein daraus folgender Rückgang der Quelltemperatur lässt sich zumindest weitgehend dadurch verhindern, dass in den Nachtstunden, in denen das Stromnetz eine Schwachlastphase hat, die Wärmepumpe nach einer Freigabe durch ein SG-Signal den überschüssigen Strom insbesondere aus Windkraftanlagen in Wärme umwandelt und diese in den Erdsonden und dem umgebenden Erdreich gespeichert wird (power-to-heat).

Durch die nächtliche Regeneration der Wärmequelle sowie das zugleich mögliche Aufladen von Warmwasser- und Heizungspufferspeicher werden dann über einen längeren Zeitraum weniger Ladevorgänge als sonst üblich notwendig, die längeren Pausen dazwischen tragen dazu bei, dass trotz der höheren Erdreichtemperaturen noch genügend Wärme nachfließen kann.

Wie sich die Regeneration auf die Erdreichtemperaturen im Nahbereich der Erdsonde auswirken kann, zeigt die als Anlage A1-2 beigefügte grafische Darstellung. Je nach der Temperatur der in die Sonde zurückfließenden Sole und der Dauer der Regeneration wird nicht nur das SONDENSYSTEM, sondern auch das umgebende Erdreich mehr oder weniger stark erwärmt.

Für die nächsten Ladevorgänge der Wärmepumpe steht somit eine zunächst sehr viel höhere Quelltemperatur zur Verfügung, der vorübergehend gespeicherte Wärmevorrat wird aber umgehend wieder abgebaut, bis sich der Normalzustand erneut eingestellt hat. Während dieser Zeit kann bereits Wärme aus den weiter entfernten Bereichen nachfließen und die zuvor im weiteren Umkreis der Sonde entstandenen Wärmesenken allmählich wieder ausgleichen.

Es ist also eine Frage der Optimierung des Systems, den jeweils gerade günstigsten Arbeitspunkt für die Wärmepumpe zu finden, um so den jährlichen Stromverbrauch

der Anlage wesentlich zu verringern gegenüber Anlagen gemäß dem derzeitigen Stand der Technik.

Diese "Sektorkopplung" - die Bereitstellung von (überschüssigem) Strom zur Verbesserung der Betriebsbedingungen bei der Erzeugung von Wärme - führt in den Stromnetzen zu einer Vergleichmäßigung der Last und zu einer insgesamt wesentlich besseren Nutzung der verfügbaren Erneuerbaren Energien.

Schon jetzt könnte häufig mehr EE-Strom erzeugt werden als zeitweise verbraucht werden kann, Windkraftanlagen müssen teilweise abgeschaltet werden. Da wegen der bevorstehenden Stilllegung von Kernkraft- und Kohlekraftwerken aber noch wesentlich mehr Windkraftanlagen installiert werden müssen, würde sich diese Problematik ohne eine Umwandlung von Strom in Wärme und deren Speicherung weiter verschärfen.

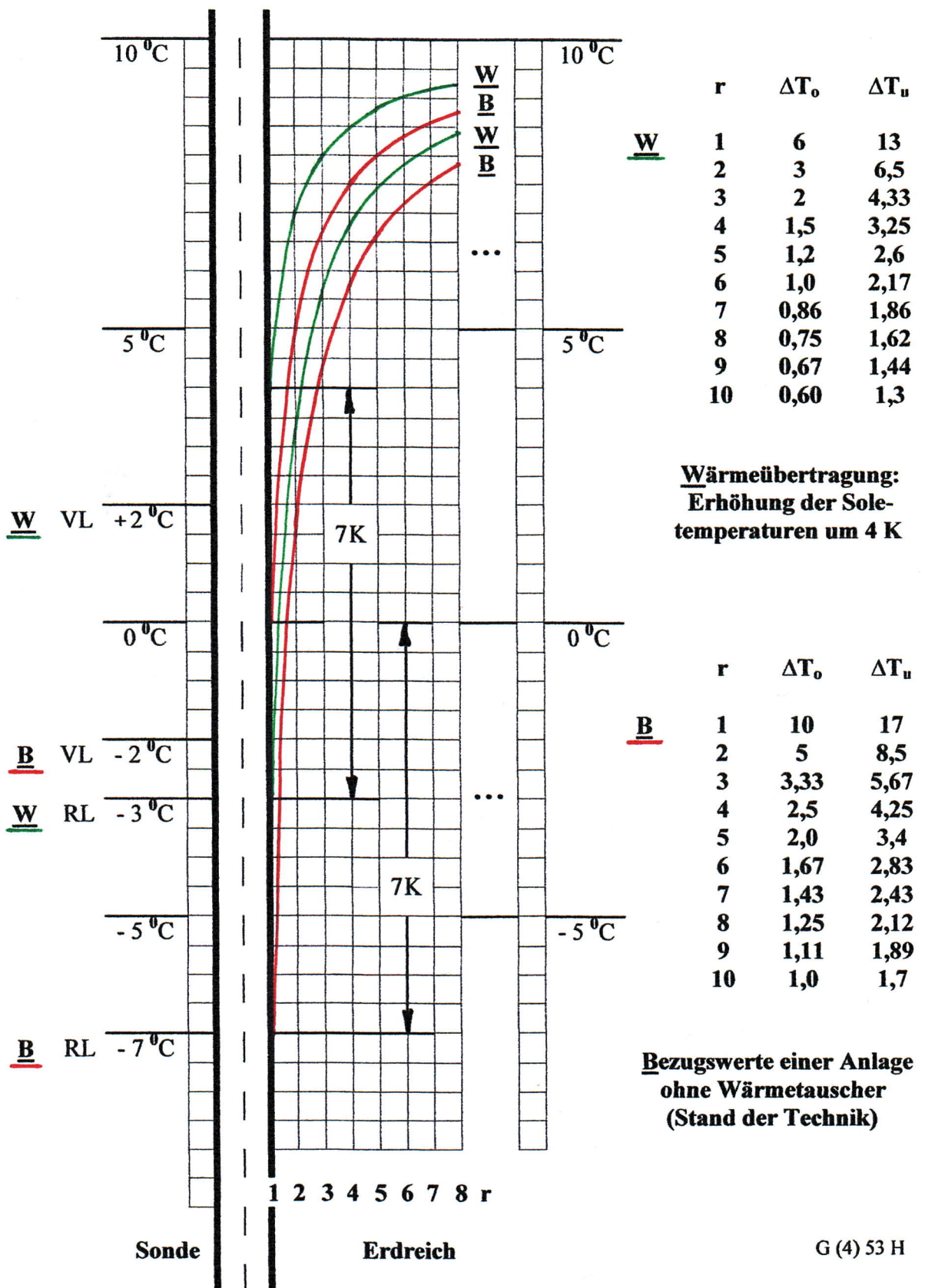
Zusammenfassend kann man also feststellen: Wenn es mit der Verfahrensänderung gelingt, durch die Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis die Temperatur des Erdreichs direkt an der Sonde auf einem höheren Niveau zu stabilisieren, dann erfolgt die Wärmeerzeugung bereits während der Ladevorgänge der Wärmepumpe unter verbesserten Betriebsbedingungen. Wenn darüber hinaus zeitweise durch eine Umwandlung von Strom in Wärme eine Regeneration der Wärmequelle erfolgt, so kann Wärme allein aus Erneuerbaren Energien zuverlässig zu günstigen Betriebsbedingungen erzeugt werden.

Es dürfte somit gegenüber Anlagen gemäß dem heutigen Stand der Technik allemal effizienter sein, einen kleinen Teil der thermischen Leistung großer Wärmepumpenanlagen jeweils zumindest kurzzeitig einzusetzen für eine Stabilisierung der Quellentemperatur und so dem Rückgang bereits während der Heizperiode bei laufendem Betrieb der Anlagen entgegenzuwirken.

Zugleich ist es aber auch sehr wichtig für eine höchst effiziente Betriebsweise bei Wärmepumpenanlagen aller Art und Leistungsgrößen - besonders bei den unzähligen kleinen Anlagen beispielsweise in Einfamilienhäusern - die durch diese Verfahrensänderung gegebenen zusätzlichen Möglichkeiten der Regeneration von Wärmequellen durch Umwandlung von Strom in Wärme zu nutzen und dafür den bereits jetzt zeitweise überschüssigen Strom aus Windkraftanlagen einzusetzen.

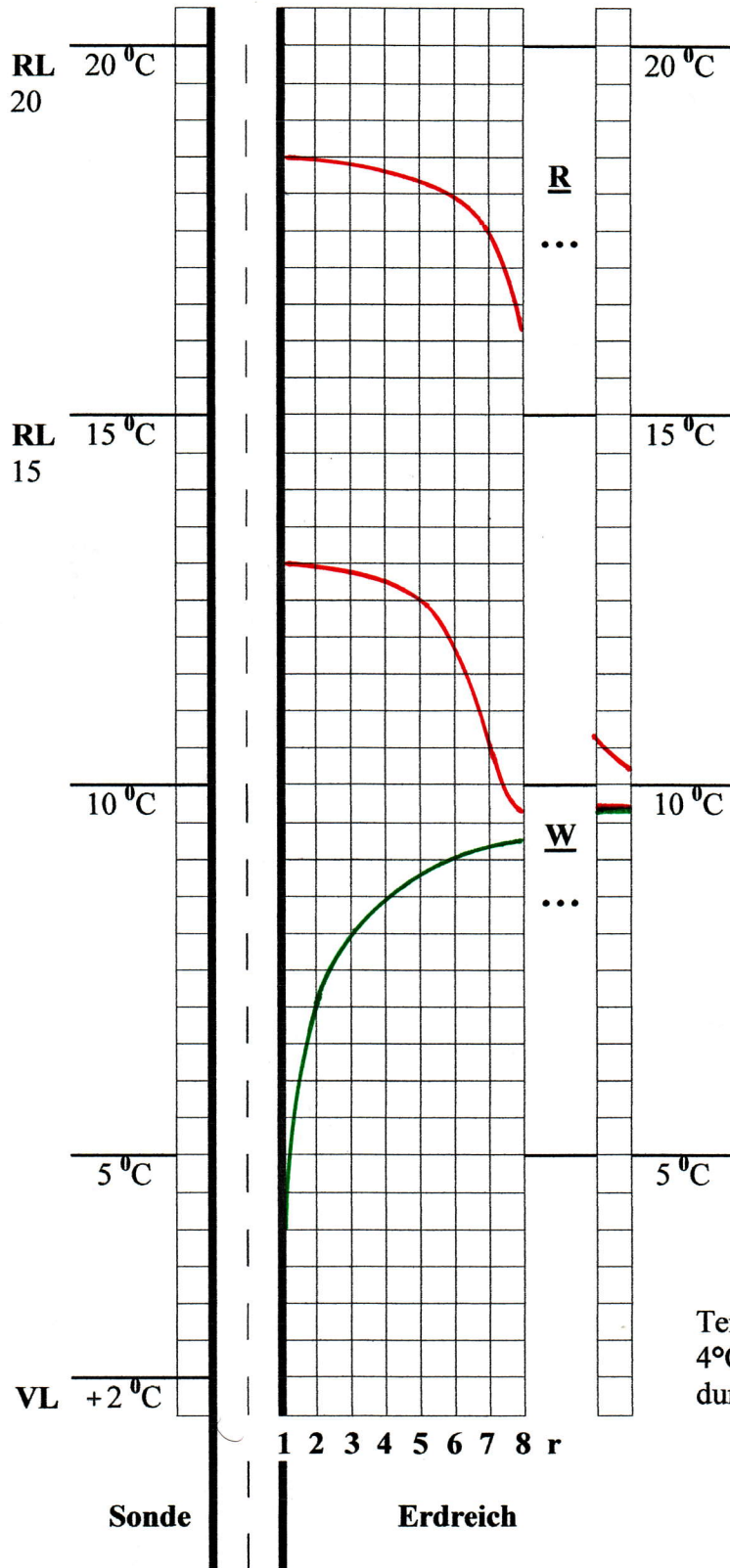
Anlagen:

- A 1-1 Einfluss der Übertragung von Wärme auf die Erdreichtemperaturen
- A 1-2 Einfluss der Umwandlung von Strom in Wärme auf die Regeneration der Wärmequelle



**Anlage A1-1 Einfluss der Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis in den Quellenkreis auf die Erdreichtemperaturen im Nahbereich der Erdsonde**

**B = Bezugswerte = Temperaturen ohne Wärmetauscher (VL - 2 °C / RL - 7 °C)**  
**W = Temperaturen nach der Übertragung von Wärme (VL + 2 °C / RL - 3 °C)**



**R Regeneration**

Mögliche Temperaturen im Erdreich bei einer längeren Regeneration über Stunden mit einer Temperatur im Rücklauf zur Erdsonde von 20°C

bzw. einer kurzzeitigen Regeneration von etwa einer Stunde und einer Temperatur im Rücklauf von 15°C

	r	$\Delta T_o$	$\Delta T_u$
<b><u>W</u></b>	1	6	13
	2	3	6,5
	3	2	4,33
	4	1,5	3,25
	5	1,2	2,6
	6	1,0	2,17
	7	0,86	1,86
	8	0,75	1,62
	9	0,67	1,44
	10	0,60	1,3

Temperaturverlauf bei einer um 4°C höheren Quellentemperatur durch **Übertragung** von Wärme

**Anlage A1-2 Einfluss der Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis in den Quellenkreis auf die Erdreichtemperaturen im Nahbereich der Erdsonde und bei einer Regeneration der Wärmequelle durch Umwandlung von Strom in Wärme (power-to-heat)**