

Dr. Hans-Georg Benken
An der Wabe 5
D-38104 Braunschweig
Tel.: 0531-372374

Dr. Sven Fuchs
Sektion 6.2 Geothermische Energiesysteme
GFZ Potsdam
fuchs@gfz-potsdam.de
Telefon: +49 (0)331 288-1713

Potsdam, 02. Mai 2018

Verfahren zur Steigerung der Effizienz von Wärmepumpenanlagen

Sehr geehrter Herr Benken,

anlässlich Ihres Besuchs am 12.4.2018 in Potsdam haben Sie uns interessante Informationen über eine mögliche Verbesserung der Effizienz von Wärmepumpenanlagen zukommen lassen. Wie sich die von Ihnen vorgeschlagene Verfahrensänderung auf die Wärmepumpe auswirkt, können wir allerdings im Rahmen der uns derzeit zur Verfügung stehenden Möglichkeiten nicht im Detail bewerten.

Hinsichtlich der Übertragung von Wärme auf die Erdsonden und zu den Auswirkungen auf das Erdreich haben wir Ihnen gerne unsere Auffassung mitgeteilt. So können wir Ihnen auch bestätigen, dass Ihre Annahmen über die Wärmeausbreitung im Erdreich (die uns vorgelegte Anlage 2 zu den Erläuterungen zur Verfahrensänderung) durchaus den realen Gegebenheiten entsprechen.

Einige weitere Ihrer Fragen lassen sich jedoch ohne tiefere Betrachtungen (bspw. numerische Simulationsrechnungen) nicht beantworten. Entsprechende freie Kapazitäten hierfür haben wir derzeit leider nicht verfügbar.

Wir empfehlen Ihnen statt dessen, sich für die nötige Unterstützung zu wenden an Manfred Reuß vom Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) sowie an Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff, HBC Hochschule Biberach, Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE).

Diese beiden Institute haben, was die Auslegung und Modellierung von oberflächennahen Wärmesonden-anlagen angeht, mehr Erfahrung als das GFZ und seit Jahren entsprechende Forschungen im Programm.

Wir hoffen, dass Sie für Ihr Vorhaben dort die benötigte Unterstützung finden, und wünschen Ihnen viel Erfolg bei der Umsetzung Ihres Vorschlags.

Mit freundlichen Grüßen



Dr. Sven Fuchs

Erläuterungen zur prinzipiellen Wirkungsweise der vorgeschlagenen Verfahrensänderung für Wärmepumpenanlagen

Sole/Wasser-Wärmepumpen für die Nutzung der Erdwärme sind sehr effizient, sofern deren Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmesenke gering ist. Nach einer Ende 2015 vom Fraunhofer-Institut ISE veröffentlichten Studie* kommt diesen erdgebundenen Wärmepumpen für die Umsetzung der Energiewende daher eine besondere Bedeutung zu.

Die für den Stromverbrauch und damit für die Effizienz der Wärmepumpenanlage maßgebende Jahresarbeitszahl hängt wesentlich von der Leistungszahl der Wärmepumpe ab, die sich nach der Carnot-Formel $\epsilon_C = T_o / \Delta T$ berechnen läßt mit T_o = Temperatur der Wärmesenke (Heizkreis) und ΔT = Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmesenke (alle Temperaturen in K).

Ein möglichst geringer Temperaturhub läßt sich erreichen durch eine niedrige Heizkreistemperatur (Fußbodenheizung) und / oder durch eine Anhebung der Quellentemperatur (Zuführung von Wärme aus anderen Quellen).

Eine weitere Möglichkeit ist die hier beschriebene Verfahrensänderung, bei der zwischen Heizkreis und Solevorlauf ein Wärmetauschersystem eingefügt und die Quelle somit stabilisiert wird (siehe dazu die beiliegende Schematische Darstellung). Durch die Entnahme von Wärme aus dem Heizkreis muß bei gleichbleibender Heizlast allerdings von der Wärmepumpe eine höhere Leistung erbracht werden, was für die Dauer der Übertragung zu einer Verschlechterung der Systemarbeitszahl führt. Deshalb ist die Wärmeentnahme zeitlich und mengenmäßig auf einen Wert zu begrenzen, der erforderlich ist, um gerade noch die optimale Quellentemperatur zu halten.

Von wesentlich größerer Bedeutung als die geringfügige Absenkung der Rücklauf-temperatur im Heizkreis sind die Auswirkungen im Quellenkreis der Wärmepumpe. Die Solevorlauf-temperatur erhöht sich, was durch den geringeren Temperaturhub zu einer höheren Leistungszahl führt. Durch die annähernd gleichbleibende Spreizung von etwa 5 K im Quellenkreis erhöht sich zugleich auch die Solerücklauf-temperatur, und das ist ein entscheidender Vorteil. Hinsichtlich der erheblichen Auswirkungen auf die Erdsondenanlage und das umgebende Erdreich wird auf die als Anlage 2 beigefügte ausführliche Beschreibung verwiesen.

* Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, November 2015 (Seite 34/89)

Der Wärmetauscher wirkt im Heizkreis als zusätzlicher Verbraucher, die Wärmepumpe muß daher wie bereits erwähnt mehr Wärme erzeugen. Abgesehen von den relativ geringen Verlusten im Wärmetauscher geht die übertragene Wärme jedoch nicht verloren. Ein Teil wird sofort in der Wärmepumpe verwertet, ein Teil geht mit dem Solerücklauf in die Erdsondenanlage und wird dort verlustlos gespeichert, da das umgebende wärmere Erdreich als Wärmehülle wirkt.

Gegen meinen Vorschlag kann man das Argument vorbringen, daß sich bei einem direkten Vergleich gegenüber einer Wärmepumpenanlage gemäß dem Stand der Technik bei einem Betrieb mit Wärmeübertragung aus dem Heizkreis stets eine niedrigere Systemarbeitszahl ergibt. Das ist unstrittig, das ist so, wenn von der Wärmepumpe zeitweise eine höhere Wärmemenge erzeugt werden muß.

Eine andere Bewertung ergibt sich erst bei einer Langzeit-Betrachtung, das heißt bei einem Vergleich zwischen dem Referenzsystem (Stand der Technik) und dem Alternativsystem (mit Wärmeübertrager) über die Dauer eines Jahres.

Bei dem Referenzsystem verringert sich mit steigendem Wärmebedarf die Quelltemperatur, die Solevorlauftemperatur sinkt bis auf Werte von etwa 0°C , dagegen bleibt bei dem Alternativsystem die Quelltemperatur deutlich höher, der Arbeitspunkt der Wärmepumpe verlagert sich hin zu höheren Betriebstemperaturen.

Der entscheidende Punkt ist also:

Die Leistungszahl der Wärmepumpe verschlechtert sich zwar während der meist nur kurzzeitigen Entnahme von Wärme aus dem Heizkreis, durch die damit aber dauerhaft auf einem höheren Niveau stabilisierten Quelltemperaturen verbessert sich die Jahresarbeitszahl jedoch deutlich, der jährliche Stromverbrauch verringert sich entsprechend.

In Anlage 1 wird ausführlich anhand von Diagrammen nachvollziehbar dargestellt, wie es zu der Effizienzsteigerung im Vergleich zu Wärmepumpenanlagen gemäß dem Stand der Technik kommt.

Kurz zusammengefaßt kann man sagen: Im Prinzip wird durch die Verfahrensänderung erreicht, daß mit einem vergleichsweise geringen finanziellen Aufwand für die Erweiterung der Anlage der Anteil der elektrischen Energie an der Wärmeerzeugung verringert und der Anteil der Erdwärme erhöht wird.

Anlage 1: Detaillierte Informationen zur Verfahrensänderung

Anlage 2: Auswirkungen auf die Temperaturverteilung im Erdreich

Anlage 2

Auswirkungen der Verfahrensänderung auf die Temperaturverteilung im Erdreich im Umkreis einer Erdsonde

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 die Erdsonden Wärme entzogen haben. Der Wärmefluss ist dadurch begrenzt.

Die Temperaturverteilung um die Sonde herum wird bestimmt durch den Abstand zur Sonde. Die Flächen F um die 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 ΔT_E zum ungestörten Erdreich verändert sich somit ebenfalls proportional zur Wärmestromdichte.

Die als Bild 1 beigefügte Grafik zeigt stark vereinfacht, wie man sich die Temperaturverteilung vorzustellen hat. Für eine Solevorlauftemperatur von $+3^\circ\text{C}$ müßte sich bei einer angenommenen Temperaturdifferenz von 2 K für den Wärmeübergang vom Erdreich zur Erdsonde eine Temperatur von 5°C an der Sonde außen einstellen, das wäre also eine Temperaturdifferenz $\Delta T_E = 5\text{ K}$ zum ungestörten Erdreich. Schon im Abstand von $r = 2$ würde sich diese auf 2,5 K halbieren, die Erdreichtemperatur würde also $7,5^\circ\text{C}$ 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 somit eine bessere Leistungszahl bewirken.

Diesem dem Wärmeträger Erdreich anhaftenden Nachteil der nur langsamen Ausbreitung der Wärme kann entgegengewirkt werden, indem man versucht, die Abkühlung 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 Solevorlauf-temperatur (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 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 ΔT_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.

Der schematischen Darstellung in Bild 2 ist zu entnehmen, wie sich eine Erhöhung der Quellentemperatur um 4 K auf die Temperaturverteilung im Erdreich und damit auf den Wärmefluss auswirken würde.

Auf der linken Seite ist dargestellt, welche Soletemperaturen sich bei winterlichen Bedingungen bei einer herkömmlichen Anlage einstellen. Die erwärmte Sole (V) verläßt die Erdsonde mit 0°C , die von der Wärmepumpe zurückfließende Sole (R) hat nur noch eine Temperatur von -5°C . Die Erdreichtemperatur direkt an der Sonde liegt bei 2°C - die Differenz zur abgekühlten Sole beträgt also 7 K.

Die rechte Seite der Grafik zeigt für gleiche Bedingungen hinsichtlich Außentemperatur und Wärmebedarf, wie sich durch die wiederholte Wärmeübertragung aus dem Heizkreis während der Heizperiode die Temperaturverhältnisse ändern können: Der Rückgang der Solerücklauf-temperatur R wurde in diesem Beispiel auf -1°C begrenzt, die Solevorlauf-temperatur V kann sich so auf $+4^{\circ}\text{C}$ erwärmen, das Erdreich direkt an der Sonde ist nicht so stark ausgekühlt, die Temperatur liegt noch bei 6°C .

Damit beträgt die Temperaturdifferenz zur abgekühlten Sole (R) weiterhin 7 K, genau so wie im Beispiel auf der linken Seite der Grafik, der Wärmefluss in diesem Bereich verändert sich nicht. Unterschiede bei den Temperaturdifferenzen ergeben sich jedoch in dem anschließenden Bereich. Der Wärmefluss in den weiter entfernten Bereichen trägt zwar nur mit einer größeren Verzögerung zur Wärmeübertragung in die Sonden-anlage bei, dennoch ist dies bei der Auslegung der Erdsonden zu berücksichtigen. Diese müssen ohnehin für eine etwas höhere Leistung ausgelegt werden, da sich durch die verbesserten Betriebsbedingungen der Wärmepumpe der Anteil der elektrischen Leistung an der Wärmeerzeugung verringert.

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 der Wärmefluss bereits während der Ladevorgänge der Wärmepumpe bei höheren Temperaturen. Höhere Soletemperaturen führen zu einem geringeren Temperaturhub zwischen Quelle und Heizkreis und so zu einer Effizienzsteigerung. Die Leistungszahl der Wärmepumpe erhöht sich, der für eine bestimmte Heizlast erforderliche Anteil der elektrischen Leistung sinkt deutlich und damit auch der Stromverbrauch der Anlage.

Es ist also eine Frage der Optimierung des Systems, den jeweils günstigsten Arbeitspunkt für die Wärmepumpe zu finden, um so den jährlichen Stromverbrauch der Anlage wesentlich zu verringern gegenüber Anlagen gemäß dem Stand der Technik.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch erweiterte Möglichkeiten für die Speicherung von Wärme. Die erforderliche Leistung der Wärmepumpe wird durch die Heizlast des Gebäudes bestimmt, aber stets nur für eine kurze Zeit benötigt, der Wärmebedarf schwankt je nach Wetterlage auch schon während der Heizperiode.

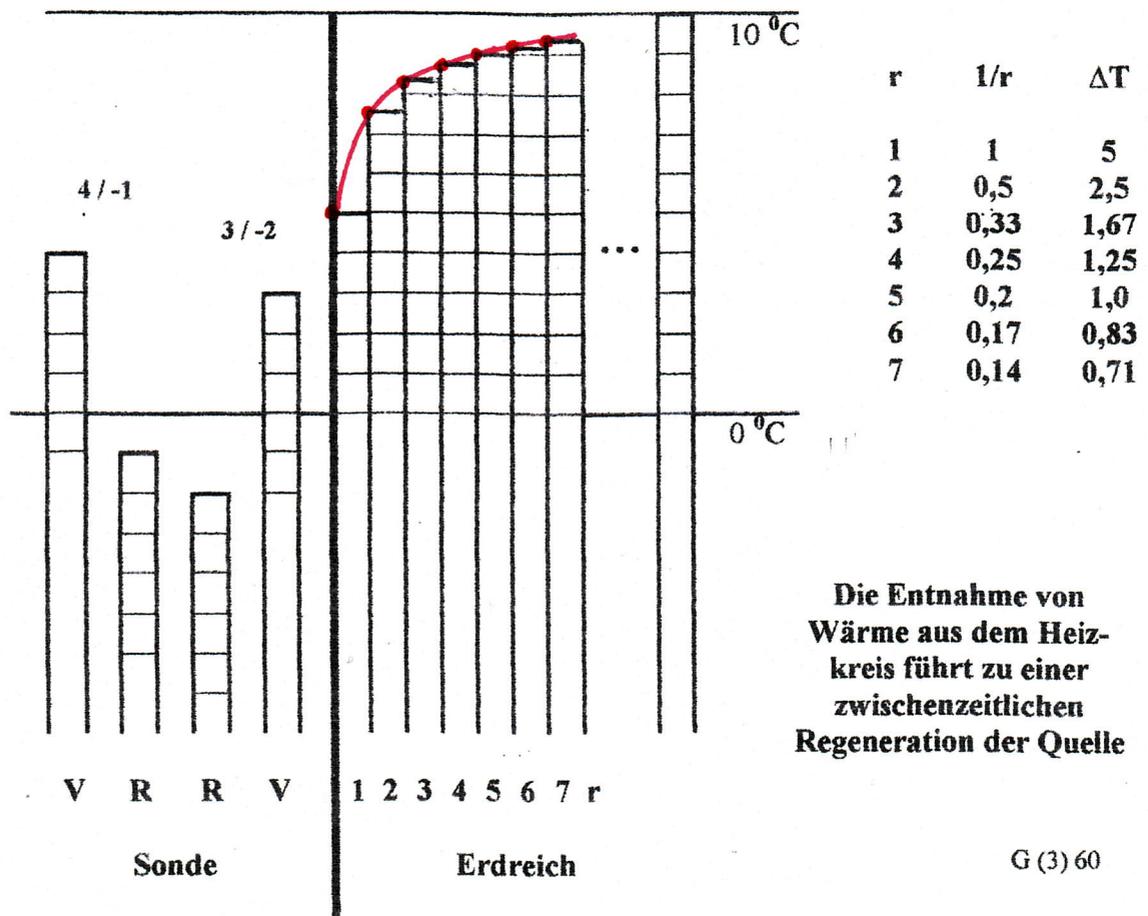
Es liegt daher nahe, die vorhandene Anlagentechnik - bestehend aus Wärmetauscher und Regelung mit Optimierungsprogramm - bei einem Teillastbetrieb auch für eine Speicherung von Wärme zu nutzen. Dafür stehen nun nicht nur Pufferspeicher und Brauchwasserspeicher zur Verfügung, sondern auch die gesamte Erdsondenanlage mit dem umgebenden Erdreich.

Insbesondere zeitweise überschüssiger EE-Strom kann auf diese Weise sehr effizient genutzt werden (mehr dazu siehe in "Betrachtungen zur Regeneration der Quelle von erdgekoppelten Wärmepumpen"). Der Wärmepumpe steht dann für die folgenden Ladevorgänge eine sehr viel höhere Quellentemperatur als zuvor zur Verfügung, was zu deutlich höheren Leistungszahlen und einer besseren Jahresarbeitszahl führt.

Bild 3 und Bild 4 zeigen die Energiefluss-Diagramme, die sich für den Normalbetrieb, einen Teillastbetrieb und einen Speicherbetrieb (power-to-heat) ergeben.

Anlagen:

- Bild 1 Die Temperaturverteilung im Erdreich im Umkreis einer Erdsonde
- Bild 2 Mögliche Auswirkungen der Verfahrensänderung auf die Temperaturverteilung im Erdreich
- Bild 3 Energiefluss-Diagramm für eine Sole/Wasser-Wärmepumpenanlage mit einem Wärmetauschersystem bei Teillastbetrieb
- Bild 4 desgleichen bei einem reinen Speicherbetrieb zur Nutzung von EE-Strom zur Wärmespeicherung (power-to-heat)



Zylinderoberfläche = Kreisumfang x Höhe = proportional zum Zylinderradius r

Wärmestromdichte (W/qm) = Wärmestrom / Fläche = proportional $1/r$

Temperaturdifferenz ΔT zum ungestörten Erdreich proportional zur Wärmestromdichte

Bild 1 Die Temperaturverteilung im Erdreich im Umkreis einer Erdsonde

Die dicke schwarze Linie in der Mitte der Grafik stellt den Mantel einer zylindrischen Erdsonde mit dem Radius r dar, rechts davon sind die Temperaturwerte im Erdreich stark vereinfacht dargestellt.

Auf der linken Seite sind Temperaturwerte für die vom Erdreich erwärmte Sole angegeben, und zwar für den Vorlauf V zur Wärmepumpe und den Rücklauf R zur Sonde (hier als Beispiele $3/-2^{\circ}C$ und $4/-1^{\circ}C$).

Im ungestörten Erdreich beträgt die Temperatur ab einer Tiefe von 10 m ganzjährig ca. $10^{\circ}C$. Zur Sonde hin fällt die Temperatur durch den Wärmeentzug immer mehr ab. Für den Wärmeübergang vom Erdreich zur Sonde ist von einer erforderlichen Temperaturdifferenz von etwa 2 K auszugehen.

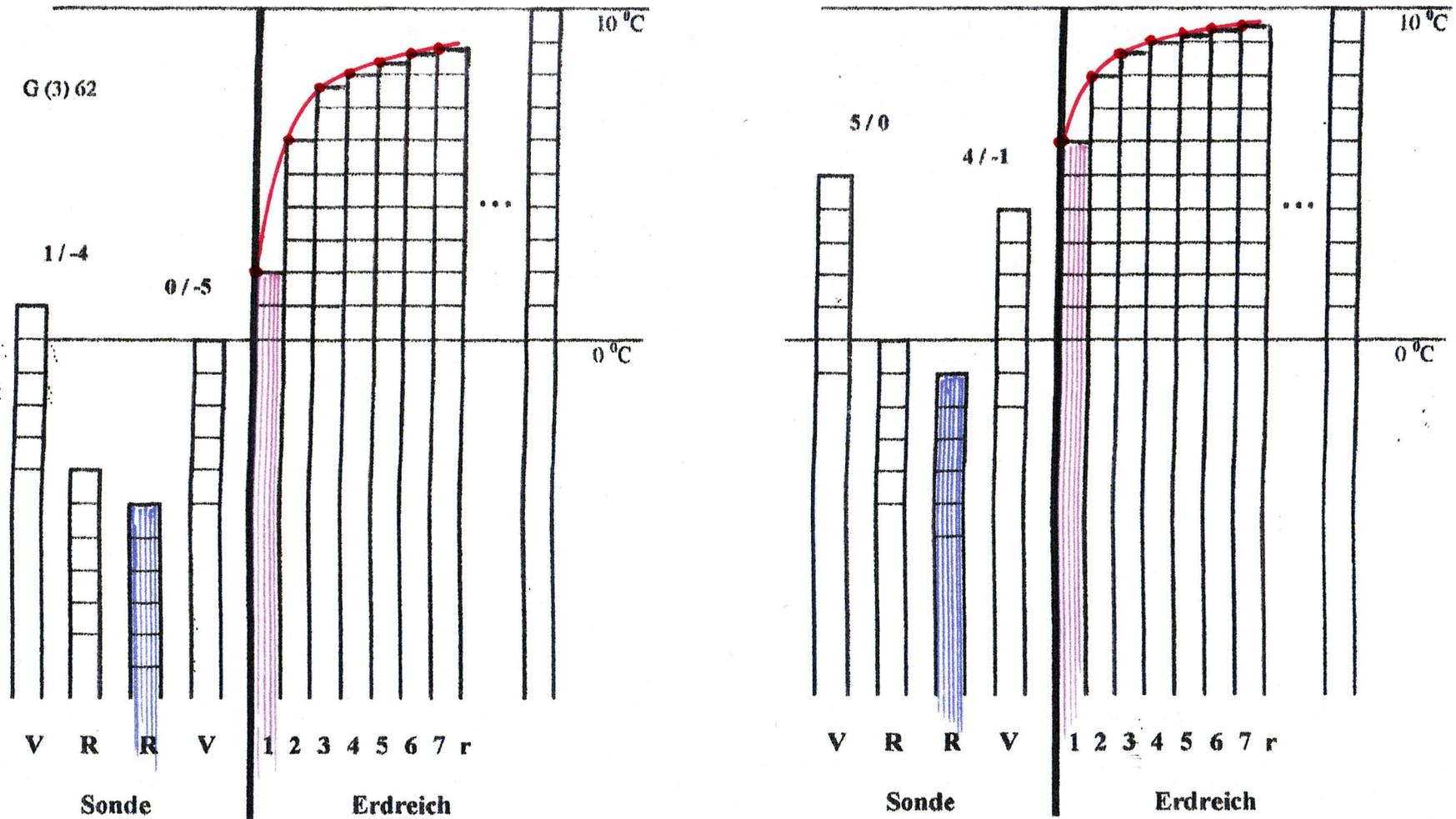
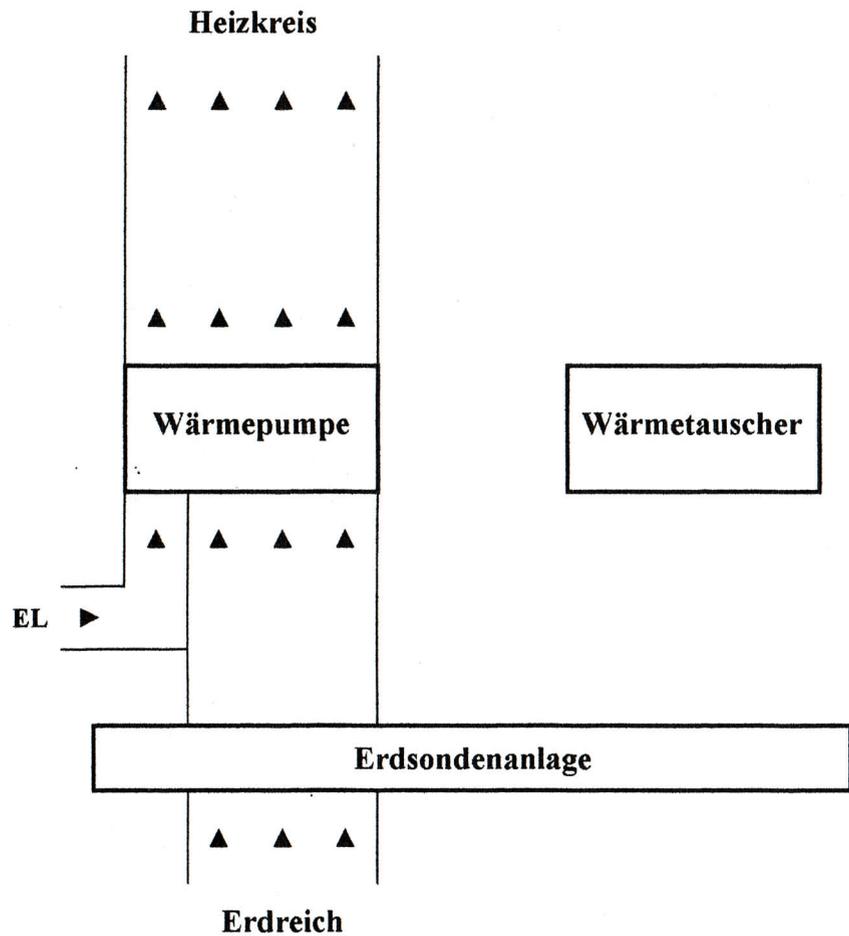
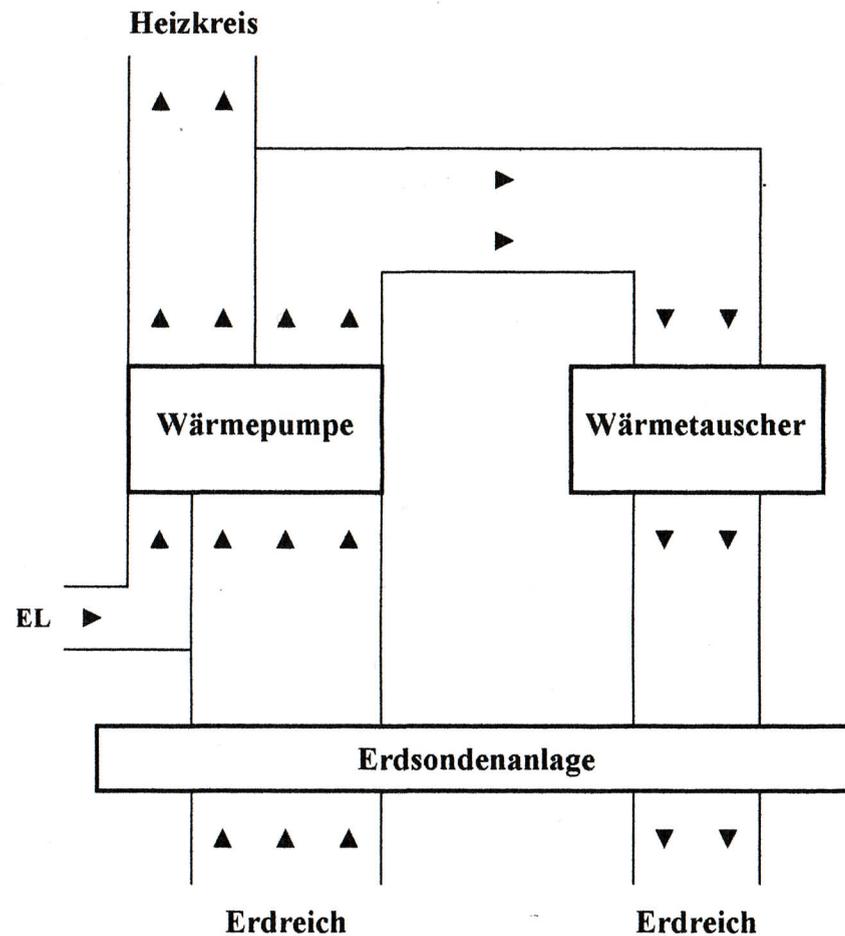


Bild 2 Mögliche Auswirkungen der Verfahrensänderung auf die Temperaturverteilung im Erdreich

Links: Beispiel für die Temperaturverhältnisse unter winterlichen Betriebsbedingungen bei einer Anlage gemäß dem Stand der Technik
Rechts: Beispiel für die Veränderungen bei einer begrenzten Entnahme von Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpenanlage

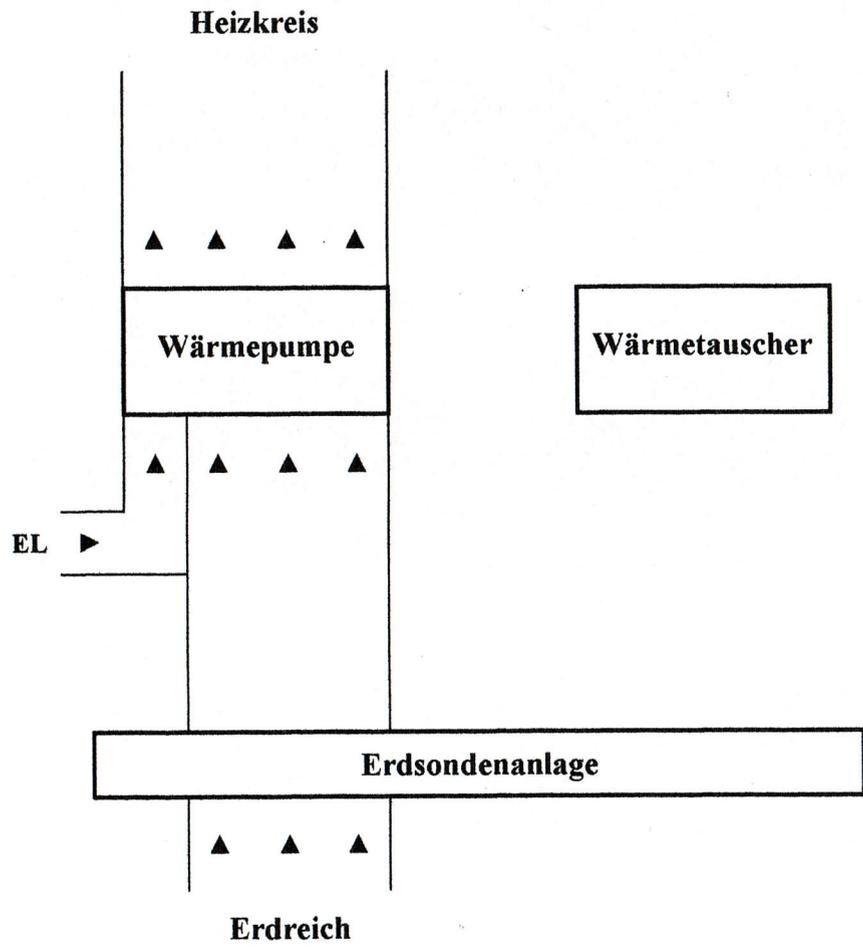


Normalbetrieb der Anlage (100 % für den Heizkreis)

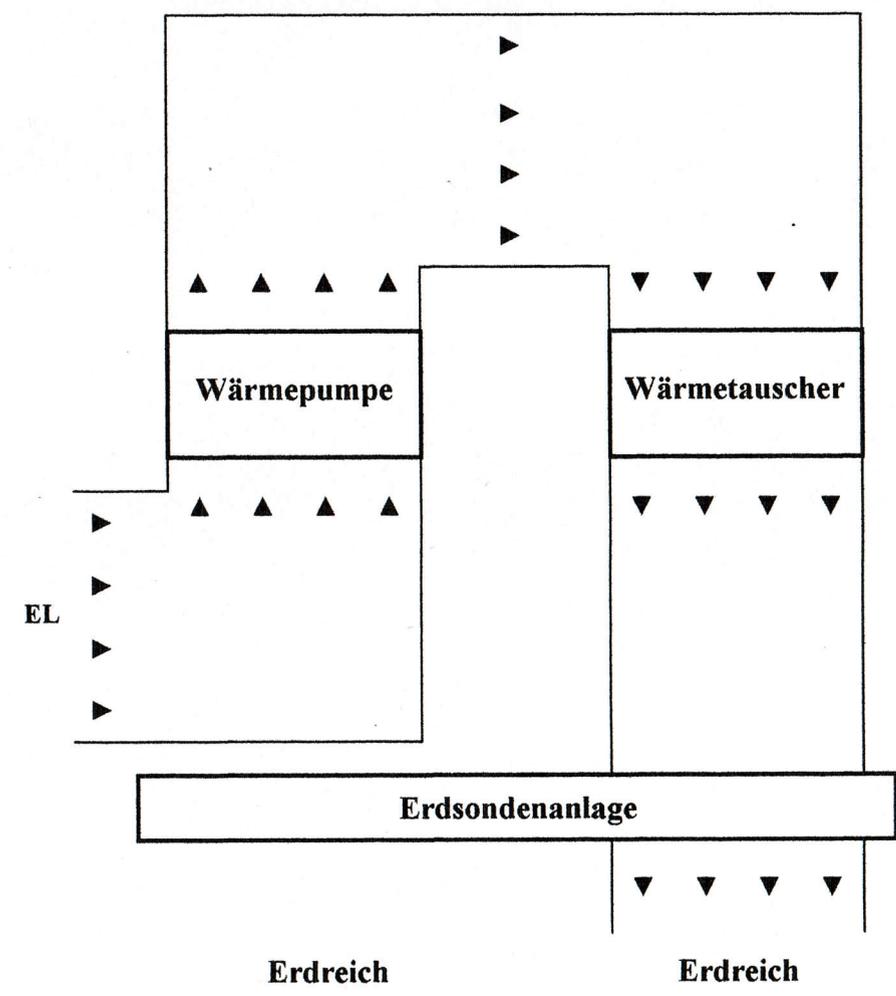


Teillastbetrieb der Anlage (50 % für den Heizkreis)

Bild 3 Energiefluss-Diagramm für eine Sole/Wasser-Wärmepumpenanlage mit einem Wärmetauschersystem
 Die Anlage kann bei Teillast für eine Regeneration der Wärmequelle genutzt werden, vor allem zu Zeiten mit einem Überschuss an EE-Strom (power-to-heat)



Normalbetrieb der Anlage (100% für den Heizkreis)



Speicherbetrieb der Anlage (100% für die Wärmequelle)

Bild 4 Energiefluss-Diagramm für eine Sole/Wasser-Wärmepumpenanlage mit einem Wärmetauschersystem
 Die Anlage kann zu Zeiten mit einem Überschuss an EE-Strom im Speicherbetrieb für eine Regeneration der Wärmequelle genutzt werden (power-to-heat)