

Das Verfahren zur Steigerung der Effizienz von Wärmepumpenanlagen und zur Regeneration der Wärmequelle

Teil 1 - Das Prinzip und seine Auswirkungen

Aus der für thermodynamische Prozesse maßgeblichen Carnot-Formel $\epsilon_c = T_o / \Delta T$ ergibt sich, dass die Leistungszahl ϵ_c kaum von der Temperatur T_o der Wärmesenke (Heizkreis), sondern vor allem vom Temperaturhub ΔT zwischen Wärmequelle und Wärmesenke abhängt.

Da die erforderliche Heiztemperatur vor allem vom Gebäude und der jeweiligen (oftmals vorhandenen) Heizungsanlage abhängt und nur geringfügig beeinflusst werden kann, macht es Sinn, alle anderen Möglichkeiten für eine Erhöhung der Quellentemperatur zu nutzen.

Für Sole/Wasser-Wärmepumpen - die Bauart mit der höchsten Effizienz und nach einer Ende 2015 vom Fraunhofer-Institut ISE veröffentlichten Studie* für die Umsetzung der Energiewende daher besonders wichtig - bedeutet dies eine Anhebung der Quellentemperatur durch Zuführung weiterer Wärme, zum Beispiel aus einer Solaranlage. Gerade in den Wintermonaten mit dem höchsten Heizwärmebedarf steht Solarwärme jedoch nur in deutlich verringertem Umfang zur Verfügung.

Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen geht daher im Laufe des Jahres die Temperatur der Quelle durch den allmählich größer werdenden Wärmeentzug zurück, so dass die Solevorlauftemperatur auf Werte von etwa 0°C sinkt. Dies liegt vor allem daran, dass sich Wärme im trockenen Erdreich nur langsam ausbreitet und es eine gewisse Zeit dauert, bis durch nachfließende Wärme die Solevorlauftemperatur wieder den Wert wie vor dem letzten Ladevorgang erreicht, was bei einem erhöhten Wärmebedarf nicht immer gelingt (in einem Bericht über umfangreiche Untersuchungen der ETH Zürich heißt es dazu "Wärme fließt nicht, Wärme kriecht").

Eine innovative Idee führte zu einer Verfahrensänderung, bei der zwischen Heizkreis und Solevorlauf ein Wärmetauschersystem eingefügt wird, um die Quelle zu stabilisieren. In Anlage 1 wird dies schematisch dargestellt. Durch Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpe in deren Primärkreis wird so ein zu starkes Absinken der Quellentemperatur verhindert, die Wärmepumpe arbeitet mit höheren Solevorlauftemperaturen.

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

Bei einer Energiebilanz ist zu berücksichtigen, dass ein Teil der entnommenen Wärme zwar in die Erdsonden abfließt, aber dem System nicht verloren geht (mehr zu den geothermischen Auswirkungen ist Teil 2 zu entnehmen).

Die Übertragung mag zunächst unsinnig erscheinen, denn durch die Entnahme von Wärme aus dem Heizkreis muss bei gleichbleibender Heizlast von der Wärmepumpe eine höhere Leistung erbracht werden, was für die Dauer der Übertragung zur einer Verschlechterung der Systemarbeitszahl führt. Deshalb ist nur so viel Wärme zu entnehmen, wie erforderlich ist, um gerade noch die jeweils optimale Quellentemperatur zu halten.

Von wesentlich größerer Bedeutung als die geringfügige Absenkung der Rücklauftemperatur im Heizkreis sind die Auswirkungen im Quellenkreis der Wärmepumpe. Die Solevorlauftemperatur erhöht sich, was durch den insgesamt geringeren Temperaturhub zu einer höheren Leistungszahl führt. Durch die annähernd gleichbleibende Spreizung von etwa 5 K im Quellenkreis erhöht sich zugleich auch die Solerücklauftemperatur, und das ist ein entscheidender Vorteil dieser Verfahrensänderung, die zu erheblichen Auswirkungen auf die Erdsondenanlage und das umgebende Erdreich führt.

Damit es nicht zu einem Missverständnis kommt: Die für die Heizungsanlage benötigte Wärme kommt wie bisher vor allem aus dem Erdreich, der Wärmefluss ändert sich nur wenig, die dem Heizkreis der Wärmepumpe entnommene im Vergleich zur thermischen Leistung der Wärmepumpe geringe Wärmemenge kommt nur der Erhöhung der Quellentemperatur zugute.

Vom Geoforschungszentrum Potsdam ist übrigens ausdrücklich bestätigt worden, dass die dem Verfahren zugrunde liegenden geophysikalischen Annahmen den realen Gegebenheiten im Erdreich entsprechen.

Das bedeutet für das Verfahren: Der Wärmetauscher wirkt im Heizkreis als zusätzlicher Verbraucher, die Wärmepumpe muss daher 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 Erdsonden und wird dort verlustlos gespeichert, da das umgebende wärmere Erdreich als Wärmehülle wirkt.

Gegen die Verfahrensänderung kann man das Argument vorbringen, dass sich im direkten Vergleich gegenüber einer Wärmepumpenanlage gemäß dem Stand der Technik bei einem Betrieb mit Wärmeübertragung aus dem Heizkreis bei gleicher Ausgangstemperatur zu Beginn des Ladevorgangs stets eine niedrigere Systemarbeitszahl ergibt. Das ist unstrittig, das ist so, wenn von der Wärmepumpe zeitweise eine höhere Wärmemenge erzeugt werden muss.

Eine ganz andere Bewertung ergibt sich aber 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 dem steigenden Wärmebedarf die Quellentemperatur, die Solevorlauftemperatur sinkt bis auf Werte von etwa 0°C, dagegen bleibt bei dem Alternativsystem die Quellentemperatur durch die aus dem Heizkreis übertragene Wärme deutlich höher, so dass sich der Arbeitspunkt der Wärmepumpe zu höheren Betriebstemperaturen hin verlagert.

Der entscheidende Punkt ist also:

Bezogen auf die gesamte Wärmepumpenanlage verschlechtert sich zwar die aktuelle Leistungszahl für die Dauer der meist nur kurzzeitigen Entnahme von Wärme aus dem Heizkreis,

durch die nach deren Ende aber für längere Zeit auf einem dann höheren Niveau stabilisierten Quellentemperaturen verbessert sich die Jahresarbeitszahl jedoch deutlich, der jährliche Stromverbrauch verringert sich entsprechend.

Zusätzlich wird durch das veränderte Verfahren auch eine höchst effiziente Regeneration der Wärmequelle durch Umwandlung von zeitweise überschüssigem EE-Strom in Wärme möglich. Dafür wird bei abgeschaltetem Verdichter Wärme allein mittels der (meist schon vorhandenen) Elektroheizstäbe der Wärmepumpe erzeugt und in das Erdsondensystem oder einen Speicher geleitet.

Bei der für die Umsetzung des Verfahrens erforderlichen Einrichtung, bestehend aus einem Wärmetauschersystem sowie einem Regelsystem mit zugehörigem Optimierungsprogramm, handelt es sich um eine multifunktionale Baugruppe zur Erweiterung von Wärmepumpenanlagen, durch die mit nur einem Regelsystem unter anderem

- sowohl eine begrenzte Wärmemenge aus dem Heizkreis der Wärmepumpe über einen Wärmetauscher auf den Primärkreis der Wärmepumpe übertragen werden kann, um die Quellentemperatur zu erhöhen und so die Effizienz der Wärmepumpe zu steigern,
- als auch eine Regeneration der Wärmequelle vorgenommen werden kann, indem bei abgeschaltetem Verdichter der Wärmepumpe allein durch deren elektrische Zusatzheizung Wärme erzeugt und über einen zweiten Wärmetauscher der Wärmequelle direkt zugeführt wird (power-to-heat).

Die Verfahrensänderung lässt sich ebenfalls bei Luft/Wasser-Wärmepumpen umsetzen, besonders gut insbesondere in Verbindung mit einer oft vorhandenen Solarwärme-Unterstützung, da bei der ein für die Umsetzung der Verfahrensänderung benötigter Wärmespeicher ohnehin schon erforderlich ist.

Teil 2 - Detaillierte Darstellung der geothermischen Zusammenhänge

Wie sich durch die Verfahrensänderung die für den Betrieb erforderliche elektrische Leistung verringert und damit die Effizienz erhöht, zeigen die als Anlage 2 beigefügten Berechnungen. Dabei ist wie bei derartigen überschlägigen Berechnungen üblich die Leistungszahl ϵ_{WP} der realen Wärmepumpe mit 50% der theoretischen Leistungszahl ϵ_C angesetzt worden.

Den Berechnungen liegt zugrunde eine Wärmepumpe mit einer Heizlast von 10 kW, eine Heizkreistemperatur von 45/35°C, eine Spreizung im Primärkreis von 5 K entsprechend VDI 4650 und bei Zuschaltung des Wärmetauschers eine Erhöhung der Soletemperatur um 0,4 K (dies bedingt eine Erhöhung der Heizleistung um 4% auf 10,4 kW während der Wärmeübertragung).

In der zweiten Spalte der Tabelle ist beispielhaft die jeweilige Berechnung der Effizienz ϵ_{WP} , der elektrischen Leistung P_{el} und des Anteils der Erdwärme P_{EW} nachvollziehbar dargestellt.

In der ersten Spalte ganz links stehen die Werte, die sich für eine Wärmepumpe gemäß dem Stand der Technik (ohne Wärmetauschersystem) bei einer Solevorlauftemperatur von -2°C und einer Rücklauftemperatur von -7°C ergeben. Die hierfür berechneten Werte sind die Bezugswerte für die in den Berechnungen angegebenen Veränderungen von elektrischer Leistung und Erdwärmeanteil.

Die in den beiden letzten Spalten angegebenen Soletemperaturen von 12/7°C bzw. 14/9°C lassen sich erreichen durch eine zwischenzeitliche Regeneration der Quelle mittels Umwandlung von Strom in Wärme (power-to-heat).

Ein Blick auf die Tabelle zeigt: Bei einer aktuellen Quellentemperatur (Sole) von 2°C ergibt sich eine erforderliche elektrische Leistung von 2,588 kW.

Wird der Wärmetauscher zugeschaltet, muss die Wärmepumpe eine um 400 W höhere thermische Leistung erbringen - die erforderliche elektrische Leistung steigt auf 2,653 kW, das ist ein Anstieg um 2,5%. So betrachtet wäre das keine Steigerung der Effizienz.

Daraus zu schließen, dass sich durch die Verfahrensänderung gar keine Effizienzsteigerung ergeben kann, wäre völlig falsch, weil nicht berücksichtigt wird, dass durch die Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis die Solerücklauftemperatur erhöht wird und diese zusätzliche Wärme schließlich zur Erhöhung der Quellentemperatur führt. Man muss also die Bilanzgrenze über den üblichen Rahmen hinaus erweitern, das heißt die Erdsonden und das umgebende Erdreich in die Betrachtung einbeziehen.

Bekanntlich nimmt die Quelltemperatur im Laufe des Jahres von sommerlichen Werten von etwa 10°C auf Werte von 0°C und sogar darunter ab - erst langsam, bei niedrigen Außentemperaturen im Winter und entsprechend großem Wärmebedarf aber deutlich schneller.

Der Grund: Wie in Teil 1 bereits gezeigt wurde, breitet sich Wärme im weitgehend trockenen Erdreich nur langsam aus. Daher kann bei hohem Wärmeentzug in der kürzer werdenden Zeit zwischen den Ladevorgängen der Wärmepumpe nicht mehr genügend Wärme aus dem umgebenden Erdreich nachfließen, der folgende Ladevorgang startet mit einer niedrigeren Quelltemperatur als zuvor - und das erneut bei jedem weiteren Ladevorgang, bis der Wärmeentzug bei wieder höherer Außentemperatur geringer wird und die Quelltemperatur durch mehr Zeit zwischen den Ladevorgängen wieder ansteigt.

Die durch die Verfahrensänderung mögliche Wärmeübertragung aus dem Heizkreis bewirkt aber auch eine Erhöhung der Solerücklauftemperatur, die Sonden kühlen daher nicht mehr so stark aus. Solange die Temperaturdifferenz zwischen Erdreich und Erdsonde noch genügend hoch ist, verringert sich der Wärmefluss nicht, die Sole in der Erdsonde verlässt diese daher mit einer höheren Temperatur als ohne die Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis.

Damit dieser Vorgang nachzuvollziehen ist, wird als Anlage 3 eine detaillierte Beschreibung beigelegt.

Dauert der Ladevorgang sehr lange, so kann trotz der geringen Anhebung der Solerücklauftemperatur um nur 0,4°C am Ende des Ladevorgangs die Quelltemperatur schon um 1°C oder mehr erhöht sein, bei relativ kurzen Ladevorgängen kann sich diese Erhöhung jedoch über mehrere Ladevorgänge erstrecken.

Um bei der Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis eine optimale Steigerung der Effizienz zu erreichen, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

1. Die Entnahme von Wärme aus dem Heizkreis sollte so gering wie möglich sein und gerade ausreichen, die jeweils optimale Quelltemperatur zu stabilisieren (das heißt deren Rückgang zu verhindern), es muss aber auch wenn sinnvoll eine Anhebung auf einen höheren Wert möglich sein.
2. Die durchaus wünschenswerte Anhebung auf einen höheren Wert muss begrenzt werden können auf eine Quelltemperatur, die noch eine ausreichend hohe Temperaturdifferenz zum umgebenden Erdreich sicherstellt, damit der Wärmefluss nicht beeinträchtigt wird.

Diese Aufgaben übernimmt das Regelsystem mit seinem Optimierungsprogramm, die dafür erforderlichen Betriebstemperaturen im Quellenkreis müssen möglichst genau erfasst und verarbeitet werden.

Eine Bewertung der durch das Verfahren möglichen Effizienzsteigerung muss ausgehen von einem Vergleich zwischen einer Wärmepumpenanlage gemäß dem Stand der Technik mit einer winterlichen Solevorlauftemperatur von beispielsweise -2°C und einer Anlage mit einem vom Optimierungsprogramm des Regelsystems gesteuerten Wärmetauschersystem. Die Ergebnisse von entsprechenden Berechnungen sind in der Tabelle der Anlage 2 aufgeführt.

Im oberen Teil der Tabelle sind die Werte für den Normalbetrieb aufgelistet, wenn der Wärmetauscher abgeschaltet ist (das entspricht einer Anlage gemäß dem Stand der Technik). Im unteren Teil der Tabelle stehen die Werte, die sich nur während der Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis ergeben.

Alle Angaben zu den Veränderungen von elektrischer Leistung und Erdwärmeanteil beziehen sich auf die angegebenen Bezugswerte einer Anlage ohne Wärmetauscher bei einer Solevorlauftemperatur von -2°C (da sich die erforderliche elektrische Leistung linear mit dem Temperaturhub bzw. der Quelltemperatur ändert, kann auch ein beliebiger anderer Bezugspunkt gewählt werden, entscheidend ist nur die Temperaturdifferenz).

Wie die Berechnungen zeigen, ergibt sich während der Entnahme von Wärme aus dem Heizkreis bei einer Anhebung der Quelltemperatur um 2,4 K gegenüber dem Bezugswert einer Anlage ohne einen Wärmetauscher (von -2°C auf $0,4^{\circ}\text{C}$) bereits ein um 2% geringerer Strombedarf.

Daher könnte durchaus dauerhaft (also bei jedem Ladevorgang) weiterhin Wärme entnommen und so die Quelltemperatur gesteigert werden, solange ein ausreichender Wärmefluss aus dem Erdreich zur Sonde gewährleistet ist. Dies stets sicherzustellen ist die Aufgabe des auf das Regelsystem wirkenden Optimierungsprogramms, das die Sollwerte für die Temperaturen im Quellenkreis vorgibt.

Erst die Visualisierung der in Anlage 2 tabellarisch aufgelisteten Daten verdeutlicht die Auswirkungen der Wärmeübertragung und die dadurch erreichbaren Verbesserungen.

Anlage 4 zeigt die Abhängigkeit der erforderlichen elektrischen Leistung von der Quelltemperatur bei einem Dauerbetrieb ohne Wärmeübertragung (dies entspricht einer Anlage gemäß dem Stand der Technik) bzw. mit Wärmeübertragung bei einer Erhöhung der Quelltemperatur um nur jeweils $0,4^{\circ}\text{C}$. Solange der Wärmetauscher zugeschaltet ist, steigt die Quelltemperatur an, die erforderliche elektrische Leistung verringert sich, der Betriebspunkt der Wärmepumpe gleitet langsam auf der grünen Kennlinie nach unten.

Mit der in Anlage 4 dargestellten Abschaltung des Wärmetauschers verlagert sich der Betriebspunkt der Wärmepumpe auf die rote Kennlinie und wird weiter nach

oben steigen, bis sich mit der abnehmenden Soletemperatur wieder ein ausreichend hoher Wärmefluss einstellt. Der Vorgang der Wärmeübertragung ist nur von vergleichsweise kurzer Dauer, die danach höhere Quellentemperatur wirkt sich dann jedoch über einen längeren Zeitraum positiv aus mit einem verringerten Anteil an elektrischer Energie, zurückzuführen allein auf die zuvor erfolgte Regeneration der Quelle bei laufendem Betrieb der Anlage.

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

Während bekanntlich der Rückgang der Quellentemperatur im Verlauf der Heizperiode ein grundsätzlich sehr langsam verlaufender Prozess ist, der sich von den sommerlichen Werten um 10°C bis zu winterlichen Werten um 0°C erstreckt, vollzieht sich die durch das Verfahren mögliche Regeneration der Quelle durch Übertragung von Wärme oder Umwandlung von Strom in Wärme dagegen innerhalb von nur wenigen Stunden.

Vergleicht man die durch die Verfahrensänderung mögliche Betriebsweise mit der bei Wärmepumpen gemäß dem Stand der Technik üblichen Betriebsweise, dann zeigen sich entscheidende Unterschiede.

Bei Wärmepumpen gemäß dem Stand der Technik mit einer monovalenten Betriebsweise wird die zeitweise zusätzlich von der elektrischen Zusatzheizung der Wärmepumpe mit einer Leistung von mehreren Kilowatt erzeugte Wärme dafür benötigt, bei einem aktuellen Ladevorgang mit einer durch unzureichenden Wärmefluss bedingten recht niedrigen Solevorlauftemperatur eine zu geringe Heizkreistemperatur auf den erforderlichen Wert anzuheben. Das kann über einen längeren Zeitraum bei jedem Ladevorgang erneut nötig sein.

Bei der durch die Verfahrensänderung möglichen Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis wird dagegen nur kurzzeitig eine viel geringere Leistung von nur einigen 100 Watt für die Stabilisierung der Quellentemperatur benötigt mit der Folge, dass über einen längeren Zeitraum für die weiteren Ladevorgänge dann deutlich weniger Strom erforderlich ist als zuvor.

Bei der Umwandlung von Strom in Wärme zur Regeneration der Quelle zwischen den Ladevorgängen der Wärmepumpe wird bewusst mit einem entsprechend hohen Strombedarf sehr viel Wärme erzeugt und gespeichert, die Quellentemperatur kann 10°C und mehr erreichen, so dass bei den nachfolgenden Ladevorgängen aufgrund der vergleichsweise hohen Leistungszahlen sehr viel Strom eingespart wird (siehe dazu Anlage 2 mit den im oberen Teil der Tabelle aufgeführten Daten).

Teil 3 - Die Umsetzung mittels einer multifunktionalen Baugruppe

Die für die Umsetzung des Verfahrens erforderliche Einrichtung, bestehend aus Wärmetauschersystem und Regelsystem mit Optimierungsprogramm, ist bereits vom Deutschen Patentamt als Gebrauchsmuster eingetragen worden. Durch diese Einrichtung, die auch für die Nachrüstung von bestehenden Wärmepumpenanlagen eingesetzt werden kann, ergeben sich noch weitaus mehr Möglichkeiten für eine Stabilisierung der Quelltemperatur.

Mit dieser in Teil 1 schon beschriebenen Einrichtung, ausgeführt als multifunktionale Baugruppe zur Erweiterung von Wärmepumpenanlagen, kann

- sowohl eine begrenzte Wärmemenge aus dem Heizkreis der Wärmepumpe auf deren Primärkreis übertragen und so die Quelltemperatur erhöht werden
- als auch eine Regeneration der Wärmequelle vorgenommen werden, indem bei abgeschaltetem Verdichter der Wärmepumpe allein durch deren elektrische Zusatzheizung Wärme erzeugt und der Wärmequelle zugeführt wird.

Die beiden folgenden schematischen Darstellungen einschließlich der Bezugszeichenliste sind der Gebrauchsmusterschrift entnommen worden. Die für die jeweilige Betriebsweise zum Transport der Wärme genutzten Leitungen wurden hervorgehoben dargestellt, die dafür erforderlichen Regelkreise sind punktiert gekennzeichnet worden.

Das Schema in Anlage 5 zeigt die Betriebsweise der Wärmepumpe mit einer begrenzten Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis in deren Quellenkreis, dadurch kann die Wärmepumpe mit einer erhöhten Quellenvorlauftemperatur arbeiten. Dafür erforderlich ist lediglich die vom Regelsystem auszulösende Umschaltung des Dreiweeventils (21) im Quellenvorlauf und die Zuschaltung der Umwälzpumpe (22) des Wärmetauschers (20).

In Anlage 6 wird die Regeneration der Wärmequelle durch eine Übertragung von Wärme dargestellt, die nur von der elektrischen Zusatzheizung der Wärmepumpe erzeugt wird. Der Verdichter der Wärmepumpe ist dabei außer Betrieb, Quellenpumpe und Heizkreispumpe arbeiten wie im Normalbetrieb. Das Regelsystem veranlasst das Einschalten der elektrischen Zusatzheizung sowie die Umschaltung des Dreiweeventils (31) im Heizkreis (die Heizungsanlage wird von der Wärmepumpe getrennt) und die Umschaltung des Dreiweeventils (34) im Quellenkreis (die Wärme kann so vom Medium des Quellenkreises im Wärmetauscher (30) aufgenommen und direkt zur Quelle geleitet werden).

In der Anlaufphase der Wärmepumpe kann mittels einer weiteren Regelungsfunktion Wärme mit noch geringer Temperatur durch Umstellen des Dreiwege-

ventils (31) im Heizkreisvorlauf statt in die Heizungsanlage über den zweiten Wärmetauscher (30) in den Quellenkreis geleitet werden und zu einer Erhöhung der Quellentemperatur beitragen. Auf diese Weise wird auch die zunächst für ein Erwärmen des Gebäudes noch unzureichende Temperatur im Heizkreisvorlauf zur Erhöhung der Quellentemperatur genutzt.

In gleicher Weise kann auch nach dem Ende eines Ladevorgangs die ansonsten ungenutzte Restwärme aus der gesamten Wärmepumpenanlage, bestehend aus Wärmepumpe, Rohrleitungen und Wärmetauscher, zur Regeneration der Quelle genutzt werden.

Auch bei einem Teillastbetrieb der Wärmepumpe, wenn wegen der Einzelraumregelung einige Thermostatventile schließen, kann man die durch das Verfahren gegebenen Möglichkeiten nutzen. Man muss nicht mehr Wärme nutzlos über die hydraulische Weiche ableiten, um das Takten der Wärmepumpe zu verhindern, man kann stattdessen die Temperatur im Primärkreis der Wärmepumpe erhöhen und so nicht nur die Effizienz steigern, sondern zugleich auch noch einen Beitrag zur Regeneration der Quelle leisten.

Sehr wirtschaftlich wird die Regeneration der Wärmequelle, wenn einerseits für die Speicherung von Wärme zeitweise überschüssiger Strom beispielsweise von Windkraftanlagen zu günstigen Preisen oder zumindest Strom zum Nachtstromtarif genutzt werden kann, andererseits durch gespeicherte Wärme in den Erdsonden, im Erdreich, im Heizungspufferspeicher und im Brauchwasserspeicher am Tage deutlich weniger Ladevorgänge erforderlich sind und auch die noch notwendigen Ladevorgänge aufgrund wesentlich höherer Quellentemperaturen dann deutlich weniger Strom verbrauchen.

Durch die beschriebene Verfahrensänderung und die zugehörige Einrichtung zu deren Umsetzung erreichen Sole/Wasser-Wärmepumpen - die ohnehin schon einen besseren Wirkungsgrad haben als andere Bauarten von Wärmepumpen - noch weitaus höhere Effizienzwerte, zugleich lassen sich damit auch durch Umwandlung von Strom in Wärme und deren Speicherung die Wärmequellen regenerieren, und dies selbst bei winterlichen Betriebsbedingungen.

Die Verfahrensänderung lässt sich ebenfalls bei sonstigen Wärmepumpenanlagen umsetzen, beispielsweise bei Luft/Wasser-Wärmepumpen. Damit aber die aus dem Heizkreis entnommene Wärme dem System nicht verloren geht, muss der Rücklauf der Wärmepumpe mit dem darin noch enthaltenen Anteil in einen Wärmespeicher geleitet werden. Bei Anlagen, die mit Solarwärme unterstützt werden und daher bereits einen solchen Speicher haben, lässt sich das besonders gut realisieren.

Zu den Vorteilen dieser Baugruppe zählt nicht nur die kompakte Bauweise mit

einem einheitlichen Regelsystem für beide Optionen einschließlich Verarbeitung der gleichen Messwerte der aktuellen Betriebstemperaturen, sondern auch die Möglichkeit einer variablen Nutzung der unterschiedlichen Regelungsfunktionen.

So können beispielsweise bei einer Wärmepumpenanlage großer Leistung für ein Wärmenetz alle verfügbaren Funktionen genutzt werden. Um aber auch bei Wärmepumpen kleinerer Leistung ein günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis zu erreichen, könnte man im Normalbetrieb auf die Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis verzichten und sich auf die für eine Regeneration der Wärmequelle verfügbaren Funktionen beschränken. Dies wäre eine preisgünstigere Variante, da das Wärmetauschersystem 1 mit der regelbaren Umwälzpumpe dann entfällt und statt eines komplexen Regelsystems mit Optimierungsprogramm auch ein einfacher Regler ausreicht.

Trotzdem wäre es schon im normalen Ladebetrieb einer Wärmepumpe kleinerer Leistung weiterhin möglich, in der Anlaufphase der Wärmepumpe mit einer noch geringen Heizkreistemperatur die in Anlage 6 dargestellte Variante für eine zusätzliche Regeneration der Quelle zu nutzen.

30.9.2019

WO (26) 8-10

Teil 4 - Wesentliche Unterschiede zum Stand der Technik

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

Wie unterscheidet sich eine erdgekoppelte Wärmepumpenanlage mit der Möglichkeit einer Regeneration der Wärmequelle hinsichtlich der Betriebsweise von einer gleichartigen Anlage gemäß dem Stand der Technik?

Im Normalbetrieb nur durch höhere Solevorlauftemperaturen. Ein Unterschied in der Betriebsweise ergibt sich erst dann, wenn über das Wärmetauschersystem

- entweder bei laufendem Betrieb der Wärmepumpe nur kurzzeitig etwas Wärme aus dem Heizkreis der Anlage in deren Quellenkreis übertragen wird
- oder in der Zeit zwischen den Ladevorgängen der Wärmepumpe durch deren elektrische Zusatzheizung Strom in Wärme umgewandelt und diese dann dem Quellenkreis zugeführt wird.

Es handelt sich dabei um zwei sich ergänzende technologische Ansätze. Diese

Zuführung von Wärme über das eigene Betriebssystem führt zu höheren Solevorlauftemperaturen und somit zu einer deutlichen Effizienzsteigerung insbesondere bei erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen.

Ein Problem bei Sole / Wasser-Wärmepumpen besteht allerdings 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.

Diesem dem Wärmeträger Erdreich anhaftenden Nachteil kann entgegengewirkt werden, indem man die Auskühlung des Erdreichs durch die in die Sonde zurückfließende abgekühlte Sole verringert.

Um das beim Wärmeentzug unvermeidliche Absinken der Quelltemperatur zu begrenzen kann durch die Verfahrensänderung schon während der Ladevorgänge der Wärmepumpe die Solevorlauftemperatur durch eine begrenzte Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpe erhöht werden.

Durch die Übertragung erhöht sich aber nicht nur die Solevorlauftemperatur (was zu einer höheren Leistungszahl führt), sondern aufgrund der etwa gleichbleibenden Spreizung im Primärkreis von etwa 5 K zugleich auch die Solerücklauftemperatur (was der Auskühlung des Erdreichs entgegenwirkt). Wie sich die dafür erforderliche höhere Leistung der Wärmepumpe auswirkt ist Teil 2 der Beschreibung und deren Anlage 2 zu entnehmen.

Die Wärmeübertragung führt zu einer Regeneration der Quelle bereits während des normalen Betriebs der Wärmepumpe, auch schon in der Heizperiode mit dem höchsten Wärmebedarf, nicht erst bei einer wieder höheren Außentemperatur und dadurch abnehmendem Wärmebedarf - ein bedeutsamer Unterschied zu Anlagen gemäß dem Stand der Technik.

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 die Temperaturdifferenz dem allmählich zunehmendem Wärmebedarf in der Heizperiode anpassen muss.

Generell gilt, dass die Temperaturverteilung um die Sonde herum bestimmt wird durch den Abstand zur Sonde. Die für den Wärmefluss maßgeblichen Flächen F um eine zylindrische Sonde mit einem Radius von $r = 1$ an deren Außenmantel 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.

Zusätzliche Informationen zu den nachfolgenden Darstellungen der Temperaturverläufe sowie zu den Auswirkungen dieser Verfahrensänderung auf die Erdreichtemperaturen im Nahbereich der Erdsonde und den Wärmefluss enthält Anhang 1 zum Verfahren.

Die als Anlage 8 beigegefügte 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.

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 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.

Die daraus folgenden Temperaturverläufe im Erdreich im Nahbereich der Sonde werden rechts von der Erdsonde dargestellt, die in Abhängigkeit vom Radius r ermittelten Temperaturdifferenzen zum ungestörten Erdreich ergeben sich aus den nebenstehenden Tabellen. ΔT_o kennzeichnet die Temperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich für den Verlauf der oberen Kennlinien, ΔT_u für den Verlauf der entsprechenden unteren Kennlinien.

Die roten Linien in der Grafik begrenzen den Temperaturbereich einer Wärmepumpenanlage gemäß dem Stand der Technik bei einer Solevorlauftemperatur von -2°C und einer Solerücklauftemperatur von -7°C.

Der durch grüne Linien begrenzte Temperaturbereich ergibt sich für eine Anlage mit einem Wärmetauschersystem sowie einem Regelsystem mit einem ausgefeilten Optimierungsprogramm, wenn der Quellenkreis der Anlage durch Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis oder Umwandlung von Strom in Wärme regeneriert worden ist und in diesem Beispiel dann eine Solevorlauftemperatur von 2°C und eine Solerücklauftemperatur von -3°C erreicht wird.

Bei einer Anlage gemäß dem Stand der Technik wird sich für eine Solevorlauf-temperatur von -2°C bei einer angenommenen Temperaturdifferenz von 2 K für den Wärmeübergang vom Erdreich zur Erdsonde eine Temperatur von 0°C an der Sonde außen einstellen, das wäre also eine Temperaturdifferenz $\Delta T_E = 10\text{ K}$ zum ungestörten Erdreich. Aber schon im Abstand von $r = 2$ würde sich diese auf 5 K halbieren, die Erdreichtemperatur würde damit bereits 5°C betragen.

Der schematischen Darstellung der Grafik ist zu entnehmen, wie sich eine Erhöhung der Quelltemperatur um 4 K durch die Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis auf die Temperaturverteilung im Erdreich und damit auf den Wärmefluss auswirken würde. Die gemäß VDI 4650 auf ungefähr 5 K auszulegende Spreizung im Solekreis ist nahezu konstant, Vorlauf- und Rücklauf-temperatur ändern sich also in gleichem Maße.

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°C statt auf -7°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 Solerücklauf-temperatur 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 weiter entfernten Bereichen 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 durch die verbesserten Betriebsbedingungen der Wärmepumpe der elektrische Leistungsanteil an der Wärmeerzeugung 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 Vorlauf-temperatur zu erwärmen.

Ein daraus folgender Rückgang der Quelltemperatur lässt sich zumindest weit-

gehend dadurch verhindern, dass in den Nachtstunden, in denen das Stromnetz eine Schwachlastphase hat, die Wärmepumpe mittels ihrer Elektroheizstäbe 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).

In Teil 3 der Verfahrensbeschreibung ist bereits dargestellt worden, wie durch die multifunktionale Baugruppe diese Umwandlung von Strom in Wärme und deren Speicherung möglich ist.

Durch die nächtliche Regeneration der Wärmequelle sowie das zugleich mögliche Aufladen von Warmwasser- und Heizungspufferspeicher werden dann über einen Zeitraum von einigen Stunden 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 bei winterlichen Betriebsbedingungen auswirken kann zeigt die als Anlage 9 beigefügte grafische Darstellung. In diesem Beispiel mit einer um 9 K erhöhten Solevorlauftemperatur wird die Wärme ohne Verluste gespeichert, da die Temperatur im die Sonde umgebenden ungestörten Erdreich mit 10°C noch etwas höher ist, das Erdreich wirkt daher als Wärmehülle, es fließt keine Wärme ab.

Je nach der Temperatur der in die Sonde zurückfließenden Sole und der Dauer der Regeneration kann aber nicht nur das SONDENSYSTEM, sondern auch das umgebende Erdreich mehr oder weniger stark erwärmt werden. Die jeweils besten Vorgaben für das Optimierungsprogramm des Regelsystems werden sich erst mit Simulationsrechnungen für die möglichen Betriebszustände unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen Stromkosten ermitteln lassen.

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.

Weitere Details zur Regeneration der Quelle mit den Auswirkungen auf die Erdreichtemperaturen im Nahbereich der Erdsonde und auf den Wärmefluss werden im Anhang 1 zur Verfahrensbeschreibung behandelt.

Sehr anschaulich lassen sich die Möglichkeiten einer Regeneration der Quelle durch Systemvergleiche darstellen zwischen einer Wärmepumpenanlage entsprechend dem Stand der Technik einerseits (Referenzsystem) und einer Anlage

mit einem Wärmetauschersystem andererseits (Alternativsystem).*

Anlage 10 zeigt das Ergebnis der Berechnung der Systemarbeitszahlen für eine um 4 K höhere Solevorlauftemperatur von +2°C (Alternativsystem) gegenüber einer Anlage mit einer Solevorlauftemperatur von -2°C (Referenzsystem), wie sie auch der Grafik in Anlage 8 zugrundegelegt worden sind, bei einer Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis in den Quellenkreis.

Bei einer Regeneration der Wärmequelle durch die zeitweilige Zuführung von umgewandelter elektrischer Energie lassen sich noch deutlich höhere Effizienzsteigerungen erreichen, wie der Excel-Systemvergleich in Anlage 11 zeigt.

Hier werden die Systemarbeitszahlen berechnet für eine durch Umwandlung von Strom in Wärme auf 12°C erhöhte Solevorlauftemperatur (Referenzsystem) und eine nach einiger Zeit notwendige erneute Anhebung der Solevorlauftemperatur, die durch den Wärmeentzug bei weiteren Ladevorgängen auf 11,6°C gesunken ist, mittels der Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpenanlage (Alternativsystem).

Auch bei dieser Umwandlung von Strom in Wärme ist nur eine im Vergleich zur Nennleistung der Wärmepumpe geringe elektrische Leistung erforderlich, da diese Wärme nicht in das Erdreich geleitet wird, sondern nur die Anhebung der Temperaturen in der Sonde und ggf. in deren direktem Nahbereich bewirken soll.

Es ist also eine Frage der Optimierung des Systems, unter Nutzung der Möglichkeiten der Sektorkopplung den unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen Strombezugskosten gerade günstigsten Arbeitspunkt für die Wärmepumpe zu finden, um so den jährlichen Stromverbrauch wesentlich zu verringern gegenüber der heutigen Betriebsweise von Wärmepumpenanlagen.

Zusammenfassend kann man sagen: Der entscheidende Unterschied gegenüber Wärmepumpenanlagen gemäß dem Stand der Technik ist die Möglichkeit einer Regeneration der Quelle bei laufendem Betrieb der Anlage - sei es durch eine Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis in den Quellenkreis oder durch eine Umwandlung von Strom in Wärme und deren Speicherung - was stets dazu führt, dass der Erdsonde aus dem Erdreich Wärme mit einer höheren Temperatur zugeführt wird, also mit mehr Energie, und so die im Erdreich im Laufe des Jahres gespeicherte Sonnenwärme besser genutzt wird.

* Der Excel-Systemvergleich wurde bereits 2014 freundlicherweise von Prof. Henning, Fraunhofer-Institut ISE, zur Verfügung gestellt und aktuell an die vorliegenden Daten angepasst.

Teil 5 - Die Quellen für die Zuführung der erforderlichen Energie

Für Verfahren und Regeneration ist und bleibt die Hauptquelle für die an einen Heizkreis zu liefernde Wärme die im Erdreich gespeicherte Sonnenwärme, dieser Anteil erhöht sich sogar noch etwas. Weitere Quellen basieren auf in Wärme umgewandelter elektrischer Energie sowie auch auf der Verwertung betriebsbedingt anfallender Wärme, die bisher nicht genutzt werden kann.

Für die Umsetzung des Verfahrens ist lediglich die in Teil 3 beschriebene multifunktionale Baugruppe erforderlich, bestehend aus dem an die jeweilige Wärmepumpe leistungsmäßig anzupassenden Wärmetauschersystem und einem Regelsystem mit einem ausgefeilten Optimierungsprogramm, um dem bei trockenem Erdreich unvermeidbaren Rückgang der Quellentemperatur im Laufe der Heizperiode entgegenzuwirken.

Im Normalbetrieb der Anlage ändert sich nichts gegenüber dem bisherigen Verfahren, der Wärmetauscher ist außer Betrieb (Bypass). Veränderungen ergeben sich erst dann, wenn dem Quellenkreis der Wärmepumpenanlage von Zeit zu Zeit etwas Wärme zugeführt und der Rückgang der Quellentemperatur begrenzt wird.

Für die Übertragung von Wärme gibt es mehrere Möglichkeiten, und zwar

- vor allem durch eine kurzzeitige begrenzte Entnahme von Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpe, was eine etwas höhere Leistung der Wärmepumpe bedingt (die über den Wärmetauscher entnommene Wärme geht aber nicht verloren, sie wird dem System wieder zugeführt),
- zusätzlich durch eine Nutzung der beim Anlauf der Wärmepumpe oft noch sehr niedrigen Heizkreistemperatur für eine Erhöhung der Quellentemperatur sowie
- einer entsprechenden Nutzung der Restwärme in der Anlage nach dem Ende des Ladevorgangs (auch diese geringen sonst ungenutzten Wärmemengen tragen zu einer Stabilisierung der Quellentemperatur bei),
- außerdem kann auch bei Wärmepumpen mit fest eingestellter Leistung bei einem Teillastbetrieb zeitweise überschüssige Wärme in den Quellenkreis übertragen werden statt eine Hydraulische Weiche zu nutzen.

Wie in Teil 2 bereits gezeigt wurde ist das Verfahren dann besonders effizient, wenn dem Heizkreis der Wärmepumpe nur sehr wenig Wärme entnommen wird. Bereits während der Übertragung kann dies zu einem geringeren Stromverbrauch gegenüber einer Anlage gemäß dem Stand der Technik mit niedrigerer Solevorlauftemperatur führen (siehe die als Anlage 2 beigefügte Tabelle).

Bei den genannten weiteren Quellen geht es um Einsparungen an Energie, die erst durch die multifunktionale Baugruppe möglich werden, bei der üblichen

Betriebsweise von Wärmepumpenanlagen bisher aber nicht nutzbar sind.

Ein Beispiel: Der vergrößerte Ausschnitt eines aufgezeichneten Diagramms einer Erwärmung von Brauchwasser in einem Doppelmantelspeicher in Anlage 12 zeigt, wie auch die am Anfang und am Ende des Ladevorgangs vorhandene Wärme noch zur Regeneration der deutlich niedrigeren Temperaturen der Wärmequelle genutzt werden kann. Auch wenn es sich nur um jeweils geringe Wärmemengen handelt, sie fallen bei jedem Ladevorgang an.

Die Erwärmung des Brauchwassers soll beginnen, sobald dessen Temperatur unter 45°C absinkt und enden, wenn 50°C erreicht werden. Dem Brauchwasserspeicher wird aber aus dem Heizkreis der Wärmepumpe zunächst Wasser zugeführt, dessen Temperatur niedriger ist als die Temperatur im Brauchwasserspeicher. Dies führt dazu, dass dem System sogar ein Teil der zuvor bereits erzeugten Wärme wieder verloren geht, die Temperatur im Brauchwasserspeicher sinkt um 0,5°C.

Der Ladevorgang dauert insgesamt 30 Minuten, allein 16 Minuten dauert es aber, bis die Temperatur von 45°C zu Beginn des Ladevorgangs wieder erreicht wird, erst dann beginnt die beabsichtigte Erwärmung des Brauchwassers.*

Der bei Anlagen gemäß dem Stand der Technik hinsichtlich der Erwärmung des Brauchwassers oder des Heizwassers anfangs noch nicht und nach dem Ende des Ladevorgangs auch nicht mehr nutzbare Teil der Wärme muss daher als Anergie betrachtet werden, kann aber durch die Verfahrensänderung noch genutzt werden für eine dank der relativ hohen Heizkreisvorlauftemperatur durchaus wirksame Regeneration der Quelle. Dafür erforderlich ist lediglich, dass zeitweise Heizung bzw. Brauchwasserspeicher vom Heizkreis getrennt werden und die Wärme über den Wärmetauscher dem Quellenkreis zugeführt wird. Dafür wird nur die multifunktionale Baugruppe genutzt, somit entsteht kein zusätzlicher Aufwand.

Auch auf den üblichen Einbau einer Hydraulischen Weiche zur Vermeidung von Takten bei einem Teillastbetrieb der Anlage nach dem Schließen von Thermostatventilen, was zu einem Wärmeverlust beiträgt, kann verzichtet werden, weil die überschüssige Wärme durch die Verfahrensänderung besser zur Regeneration der Quelle genutzt werden kann.

Von der bisher betrachteten Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis in den Quellenkreis zu unterscheiden ist die Umwandlung von Strom in Wärme mittels der elektrischen Zusatzheizung der Wärmepumpe, also die Zuführung von elektrischer Energie aus externen Quellen.

* Ein schnelleres Hochfahren der Anlage nach dem Start wäre von Vorteil, das weitere schnelle Ansteigen der Heizkreisvorlauftemperatur über 58°C aber nicht.

Die sehr effiziente Speicherung dieser Wärme in der Erdsondenanlage sowie im Erdreich im Nahbereich der Sonde führt zu deutlich höheren Quellentemperaturen und damit bereits während der Heizperiode zu einer nachhaltigen Regeneration der Wärmequelle, da hierfür mehr elektrische Energie, vorzugsweise als zeitweise überschüssiger EE-Strom aus Windkraftanlagen zu sehr günstigen Bezugspreisen, eingesetzt werden kann.

Die beiden sich gegenseitig ergänzenden Ansätze führen so zu einer nachhaltigen Steigerung der Effizienz von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen, die zur Verfügung stehende Energie wird besser genutzt.

Durch ein Regelsystem mit einem ausgeklügelten Optimierungsprogramm, das sowohl über die Sektorkopplung der Systeme die bestmöglichen Bezugsbedingungen für Strom ermitteln wie auch die für den Wärmefluss und die Wärmespeicherung jeweils günstigsten Erdreichtemperaturen berechnen kann, dürften sich weitere Effizienzsteigerungen für Wärmepumpenanlagen erreichen lassen.

Anlagen:

1. Schematische Darstellung des Systems ohne und mit Wärmetauscher
2. Einfluss der Quellentemperatur auf elektrische Leistung und Erdwärme
3. Beschreibung der thermodynamischen und geothermischen Vorgänge
4. Beispiele für eine kurzzeitige Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis
5. Einrichtung zur Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis
6. Einrichtung zur Umwandlung von Strom in Wärme
7. Bezugszeichenliste zu Anlage 5 und 6
8. Temperaturverteilung im Erdreich im Nahbereich der Erdsonde
9. Regeneration der Wärmequelle durch Umwandlung von Strom in Wärme
10. Excel-Systemvergleich für Solevorlauftemperaturen von -2°C und $+2^{\circ}\text{C}$ durch Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis
11. Excel-Systemvergleich für eine Solevorlauftemperatur von $+12^{\circ}\text{C}$ nach einer Regeneration der Wärmequelle durch Umwandlung von Strom in Wärme
12. Beispiel für die Erwärmung von Brauchwasser

30.9.2019 Teil 1 bis 3

24.3.2021 Teil 4 und 5

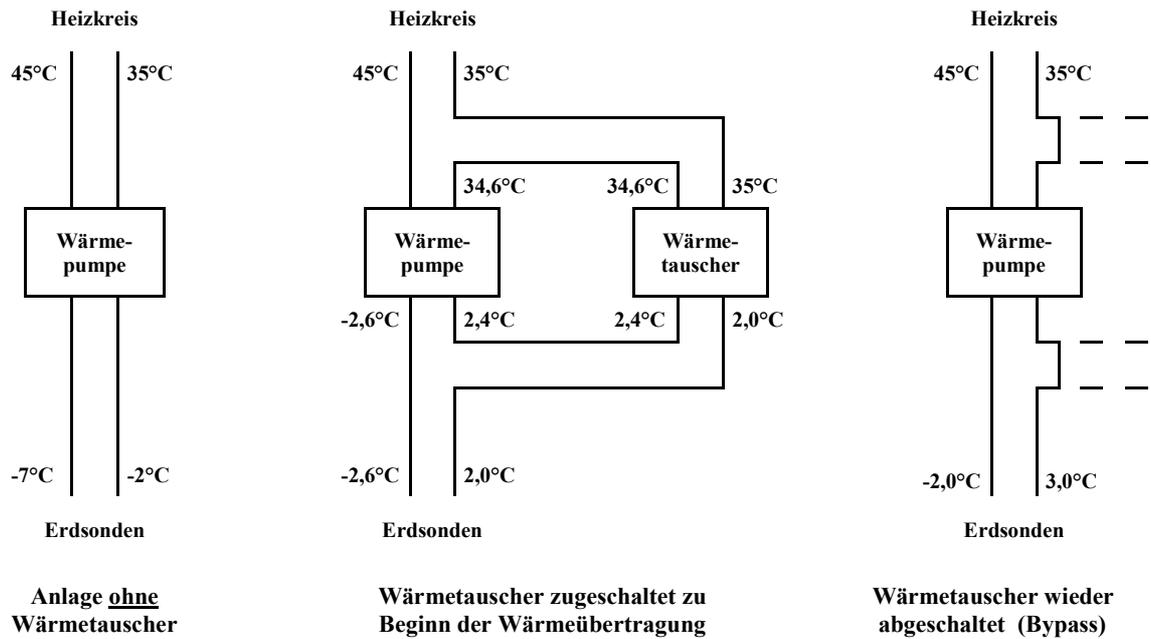


WO (26) 1-18

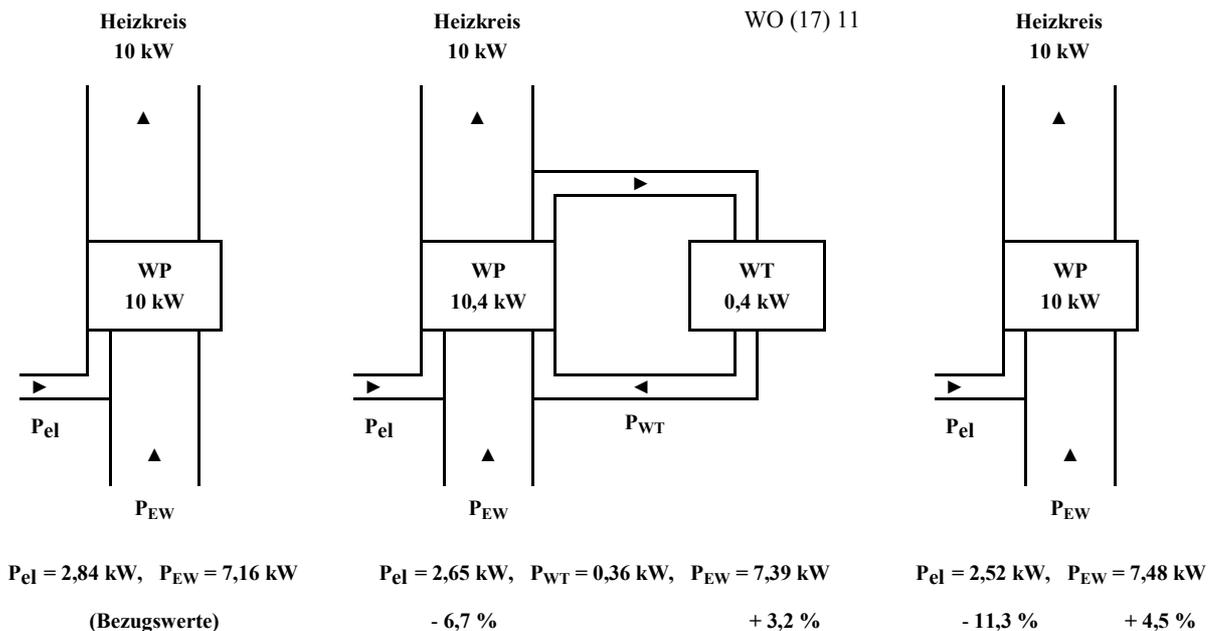
Diese kurze Übersicht soll das Prinzip der Wärmeübertragung aus dem Heizkreis der Wärmepumpe auf deren Solekreis veranschaulichen.

Die Abbildung auf der linken Seite stellt eine herkömmliche Anlage gemäß dem Stand der Technik dar, die Solevorlauftemperatur ist im Verlauf der Heizperiode bis auf -2°C gefallen.

Die beiden anderen Abbildungen zeigen die Anordnung nach Einfügung eines Wärmetauschers und die möglichen Betriebstemperaturen unter der Annahme, dass sich die Solevorlauftemperatur durch zeitweilige Wärmeübertragungen nur auf etwa $+2^{\circ}\text{C}$ verringert hat.



Die Energiefluss-Diagramme geben die Ergebnisse der entsprechenden Berechnungen wieder.



Anlage 1 Schematische Darstellung von Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen ohne und mit Wärmetauscher bei winterlichen Betriebsbedingungen

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

	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
- 2 / -7 °C	$T_0 = 40 \text{ °C} = 313 \text{ K}$	313 K	313 K	313 K	313 K	313 K	313 K	313 K
313 K	$T_u = - 2,5 \text{ °C} = 270,5 \text{ K}$	- 0,5 °C	1,5 °C	3,5 °C	5,5 °C	7,5 °C	9,5 °C	11,5 °C
- 4,5 °C	$\Delta T = 42,5 \text{ K}$	40,5 K	38,5 K	36,5 K	34,5 K	32,5 K	30,5 K	28,5 K
44,5 K	$\varepsilon = 3,682$	3,864	4,065	4,288	4,536	4,815	5,131	5,491
3,517	$P_{el} = 2,716 \text{ kW}$	2,588 kW	2,460 kW	2,332 kW	2,204 kW	2,077 kW	1,949 kW	1,821 kW
<u>2,843 kW</u>	- 4,5 % gg. Bezugswert	- 9,0 %	- 13,5 %	- 18,0 %	- 22,5 %	- 26,9 %	- 31,4 %	- 35,9 %
	$P_{EW} = 7,284 \text{ kW}$	7,412 kW	7,540 kW	7,668 kW	7,796 kW	7,923 kW	8,051 kW	8,179 kW
<u>7,157 kW</u>	+ 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	Diese Werte ergeben sich nach einer zwischenzeitlichen Regeneration der Quelle (power-to-heat)
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	312,8 K	312,8 K	312,8 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 %	

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

Anlage 2 Einfluss der Quelltemperatur bei einer Anlage ohne bzw. mit zugeschaltetem Wärmetauscher auf die Anteile der elektrischen Leistung und der Erdwärme

Unter Bezugnahme auf Anlage 1 (Schematische Darstellung) und Anlage 2 (Ergebnisse der Berechnungen) werden die Abläufe hier detailliert beschrieben.

Da die Verluste im Wärmetauscher mit 10% anzusetzen sind, wird ein Anteil von 90% der dem Heizkreis entnommenen Wärme für die Erhöhung der Solevorlauftemperatur genutzt.

Die Spreizung im Primärkreis der Wärmepumpe (anzusetzen mit etwa 5 K gemäß VDI 4650) ändert sich dadurch nicht oder allenfalls nur vernachlässigbar wenig.

Daraus folgt, dass die Solerücklauftemperatur (= Sondeneingangstemperatur) ebenfalls - und zwar im gleichen Maße wie die Solevorlauftemperatur - höher ist als bei einem Betrieb ohne Wärmeübertragung, die Erdsonde kühlt sich daher nicht mehr so stark ab.

Die Temperatur im Erdreich direkt um die Sonde herum kann beim Wärmeentzug nicht unter die Sondeneingangstemperatur absinken.

Solange eine ausreichende Temperaturdifferenz zwischen Erdreich und Erdsonde besteht, wird der Wärmefluss nicht beeinträchtigt, die Wärmemenge verringert sich nicht.

Dadurch nimmt die Sondenausgangstemperatur (= Solevorlauftemperatur) einen Wert an, der um den etwa gleichen Betrag wie bei der Sondeneingangstemperatur höher ist als bei einem Betrieb ohne Wärmeübertragung.

Auf diese Weise steigt die Quelltemperatur allmählich an, der Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmesenke (Heizkreis) verringert sich mehr und mehr, die Effizienz der Wärmepumpenanlage erhöht sich.

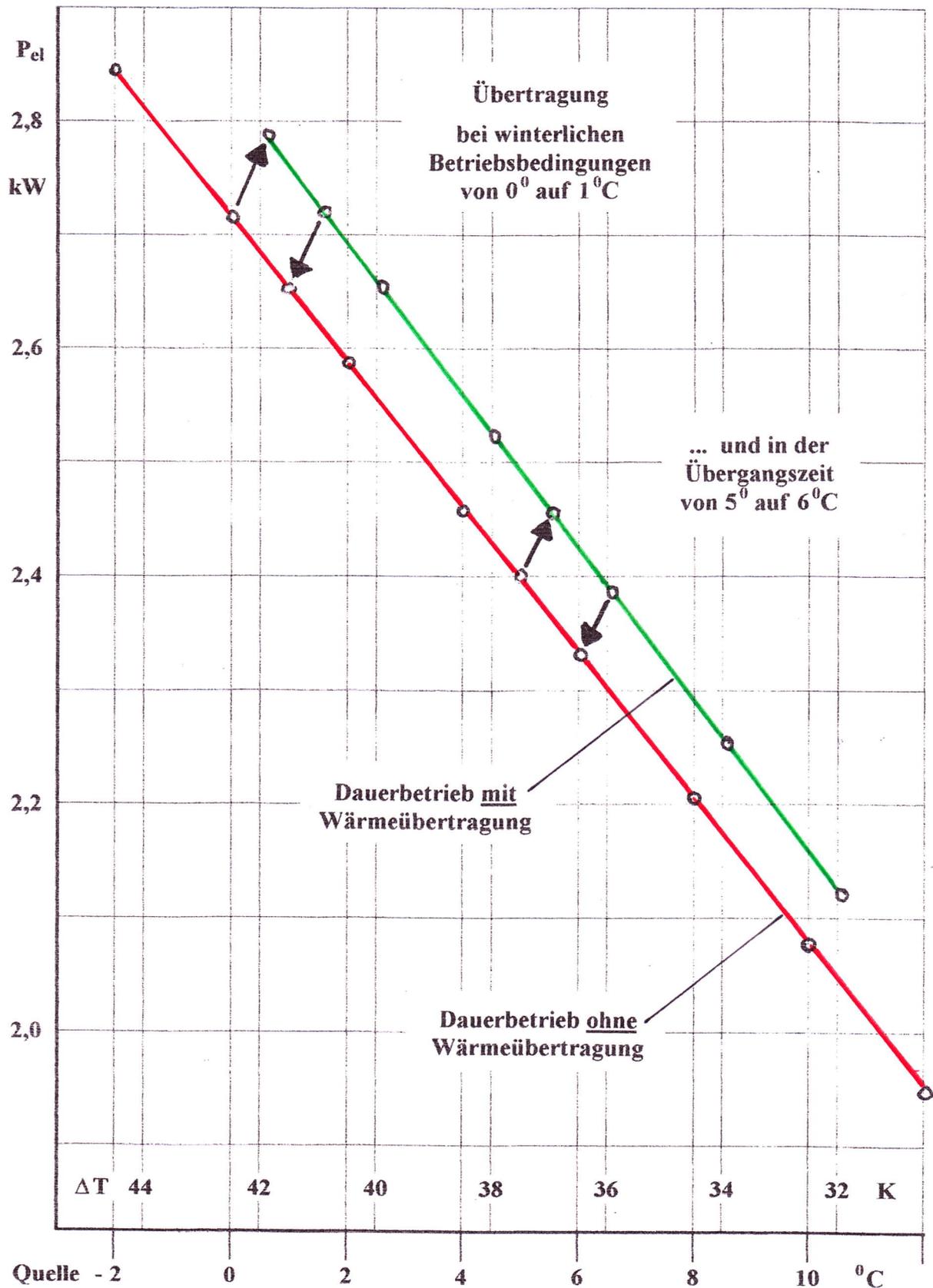
Dieser Vorgang kann so lange fortgesetzt werden, bis die Temperaturdifferenz zwischen Erdreich und Erdsonde nicht mehr ausreicht für den nötigen Wärmefluss, um in der verfügbaren Zeit bis zum nächsten Ladevorgang die Sole wieder so weit zu erwärmen, wie sie beim Ladevorgang abkühlt.

Dieser Zeitpunkt wird vom Regelsystem erfasst durch die Temperaturdifferenz zwischen Sondeneingang und Sondenausgang.

Die zusätzliche Erwärmung wird dann eingestellt, die Quelltemperatur verharrt auf dem erreichten Niveau, der nötige Wärmefluss vom Erdreich zur Erdsonde wird nicht eingeschränkt.

Die entsprechende Anpassung an die jeweils aktuelle Situation erfolgt über das Optimierungsprogramm des Regelsystems.

Anlage 3 Beschreibung der thermodynamischen und geothermischen Vorgänge



Anlage 4 Beispiele für eine kurzzeitige Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis auf den Quellenkreis zur Anhebung der Quelltemperatur um 1°C bei winterlichen Bedingungen und in den Übergangszeiten

(Berechnungsbeispiele siehe Anlage 2)

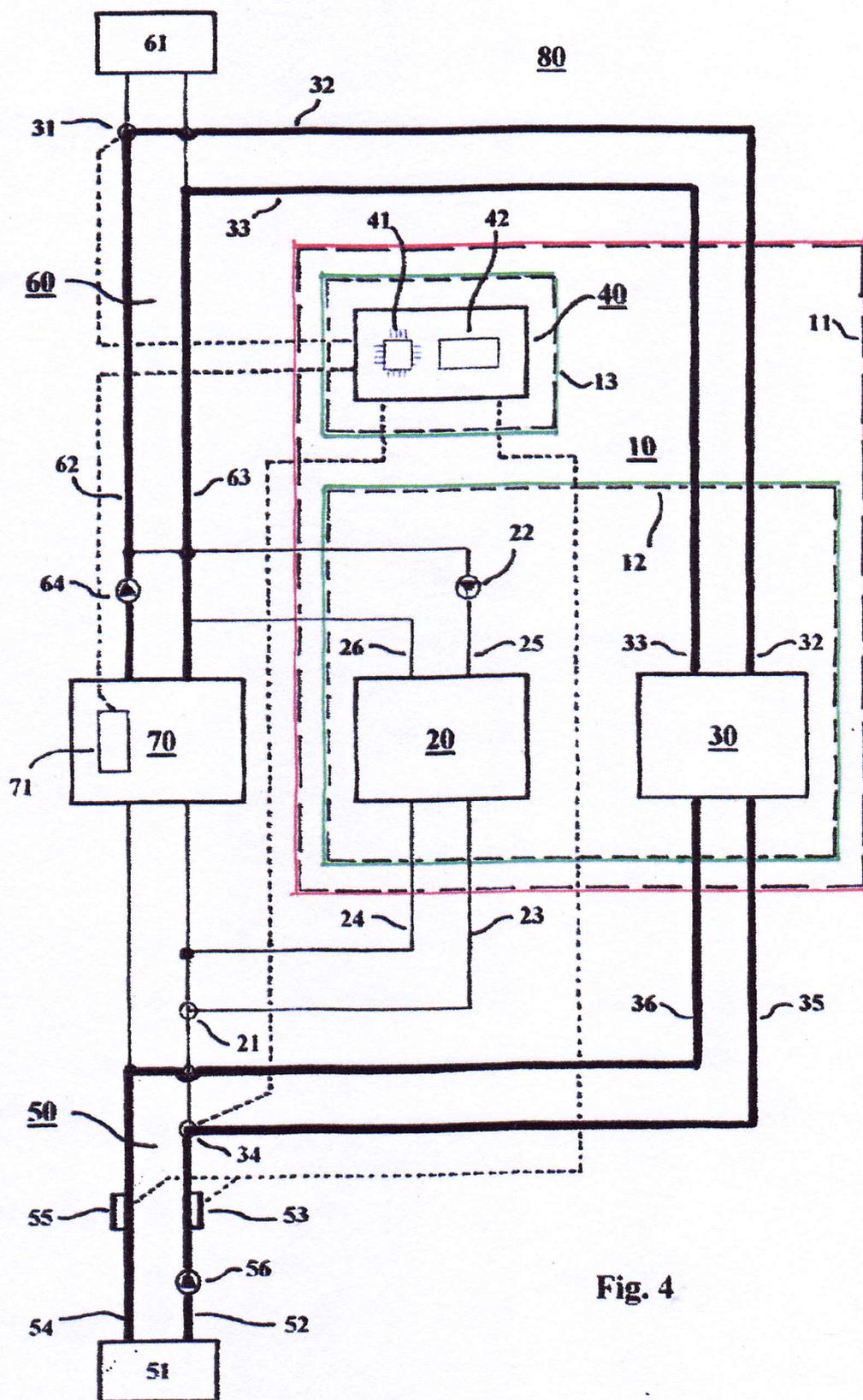
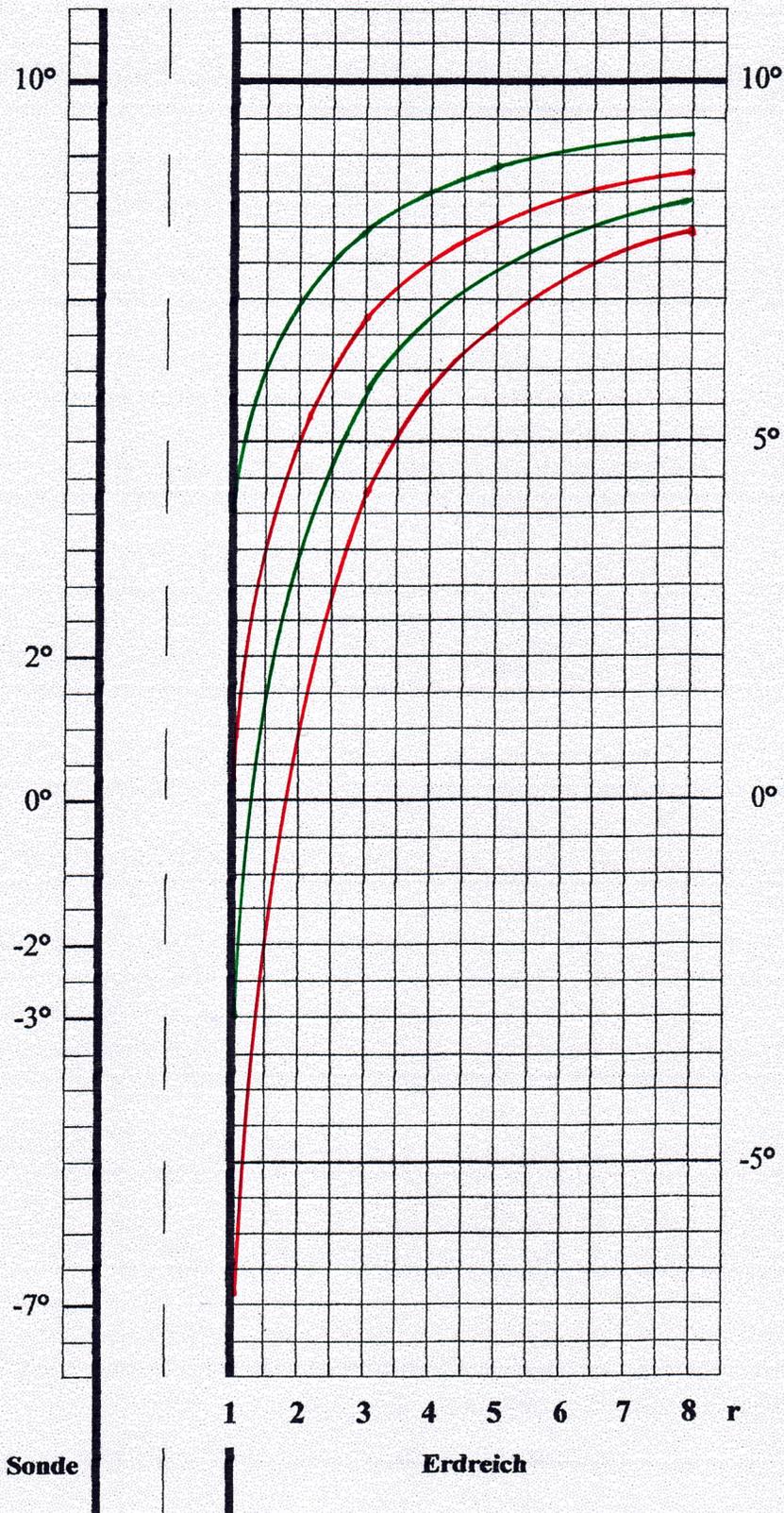


Fig. 4

Anlage 6 Einrichtung zur Umwandlung von Strom in Wärme

Bezugszeichenliste

- 10 Einrichtung zur Erhöhung der Quellentemperatur
- 11 Gehäuse der Einrichtung
- 12 Modul 1 / Wärmetauschersystem
- 13 Modul 2 / Regelsystem
- 20 Wärmetauscher 1
- 21 Dreiwegeventil 1 / Quellenvorlauf
- 22 Umwälzpumpe für Wärmetauscher 1
- 23 Zuleitung vom Quellenvorlauf zum Wärmetauscher 1
- 24 Zuleitung von Wärmetauscher 1 zur Wärmepumpe
- 25 Zuleitung vom Heizkreisvorlauf zum Wärmetauscher 1
- 26 Rückleitung vom Wärmetauscher 1 zum Heizungsrücklauf
- 30 Wärmetauscher 2
- 31 Dreiwegeventil 2 / Heizkreisvorlauf
- 32 Zuleitung vom Heizkreisvorlauf zum Wärmetauscher 2
- 33 Rückleitung vom Wärmetauscher 2 zum Heizkreisrücklauf
- 34 Dreiwegeventil 3 / Quellenvorlauf
- 35 Zuleitung vom Quellenvorlauf zum Wärmetauscher 2
- 36 Rückleitung vom Wärmetauscher 2 zum Quellenrücklauf
- 40 Regelsystem mit Optimierungsprogramm
- 41 Prozessor
- 42 Speicher
- 50 Quellenkreis (Primärkreis der Wärmepumpe)
- 51 Quelle (Erdsonden oder Speicher)
- 52 Quellenvorlauf
- 53 Temperatursensor im Quellenvorlauf
- 54 Quellenrücklauf
- 55 Temperatursensor im Quellenrücklauf
- 56 Quellenpumpe
- 60 Heizkreis
- 61 Heizungsanlage
- 62 Heizkreisvorlauf
- 63 Heizkreisrücklauf
- 64 Heizkreispumpe
- 70 Wärmepumpe
- 71 Elektrische Zusatzheizung
- 80 Wärmepumpenanlage (Gesamtdarstellung)



W	r	ΔT_o	ΔT_u
	1	6	13
	2	3	6,5
	3	2	4,33
	4	1,5	3,25
	5	1,2	2,60
	6	1,0	2,17
	7	0,86	1,86
	8	0,75	1,62
	9	0,67	1,44
	10	0,6	1,3

Anlage mit
Wärmetauscher:
Erhöhung der
Soletemperaturen
um 4 K

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

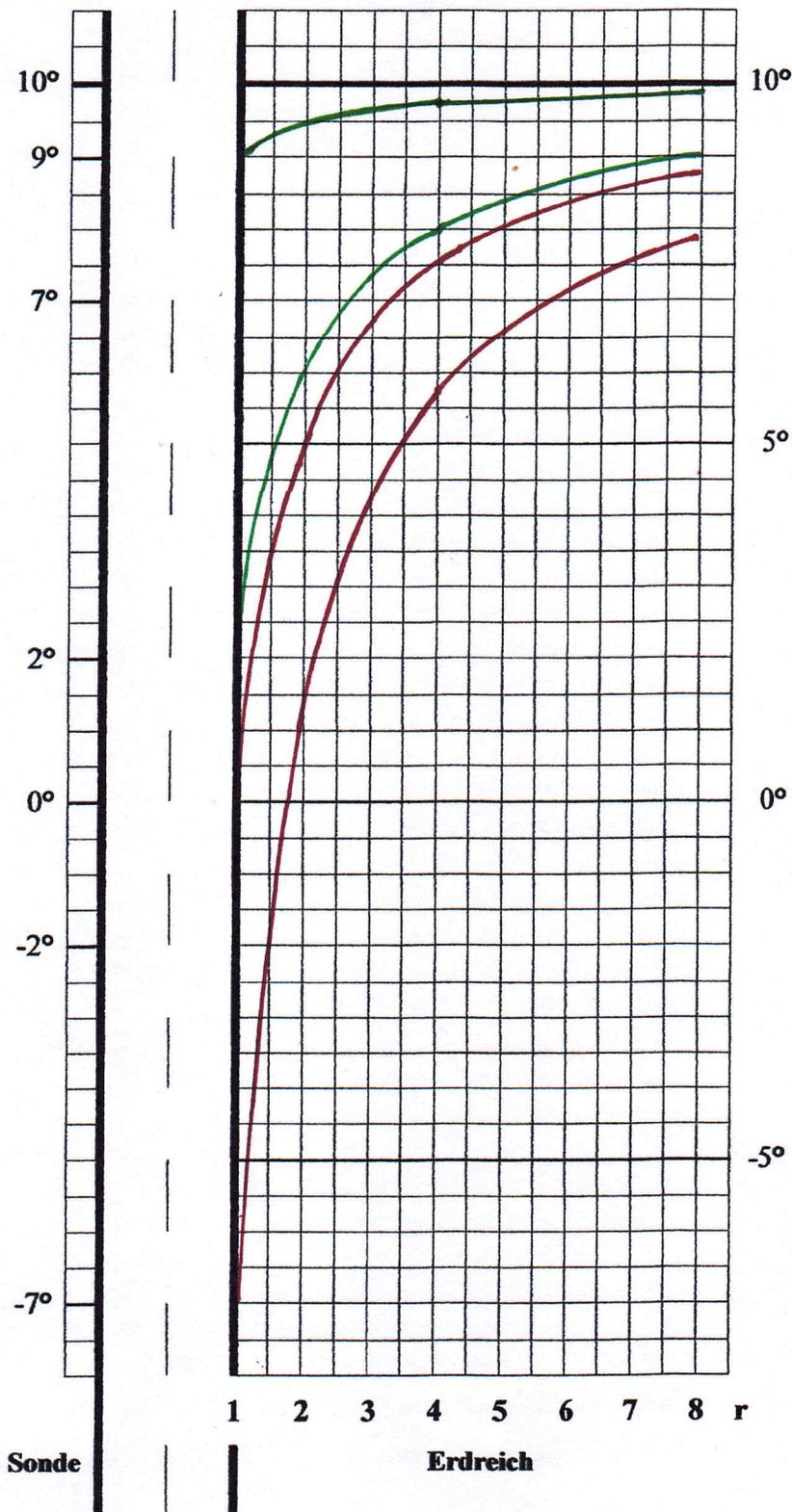
Anlage ohne
Wärmetauscher
(Bezugswerte)

Links: Temperaturen
an der Außenwand
der Erdsonde

Anlage 8 Temperaturverteilung im Erdreich 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	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 9 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)

Systemvergleich für ein Zahlenbeispiel

vorgegebene Größen	Einheit	Wert
Massenstrom Heizkreis	kg/s	1
spez. Wärmekapazität Heizkreis	J/kgK	4200
Massenstrom Solekreis	kg/s	1
spez. Wärmekapazität Solekreis	J/kgK	4200
abgegebene Heizleistung	kW	10

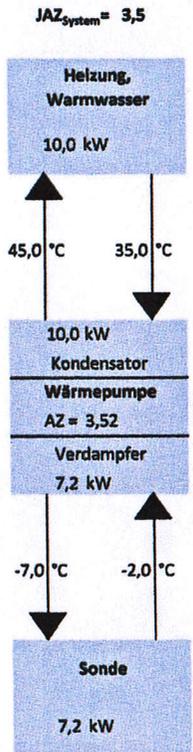
Werte Wärmepumpe		
Carnot'scher Gütegrad	-	0,5
Linearterm	-	n.a.
Quadratischer Term	-	n.a.

vorgegebene Temperaturen	Einheit	Wert
Vorlauf Heizkreis	°C	45,00
Rücklauf Solekreis (vor WÜ)	°C	2,00
T-Differenz WÜ heizkreisseitig	K	0,40

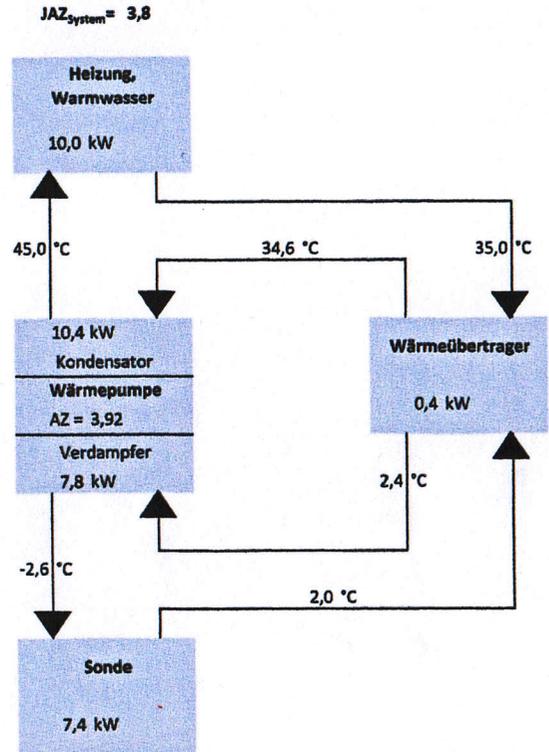
Vergleichsrechnung	Einheit	Referenz	Alternativ
Temperatur Vorlauf Heizung	°C	45,00	45,00
Temperatur Rücklauf Heizung	°C	35,00	35,00
Temperatur Rücklauf WÜ	°C	-	34,60
Temperatur Rücklauf Sonde	°C	-2,00	2,00
Temperatur Vorlauf Verdampfer	°C	-2,00	2,40
Temperatur Rücklauf Verdampfer	°C	-7,00	-2,60
Arbeitszahl WP	-	3,52	3,92
Leistung Wärmeübertrager WÜ	kW	-	0,40
Leistung Kondensator WP	kW	10,00	10,40
elektrische Leistung WP	kW	2,84	2,65
Leistung Verdampfer WP	kW	7,16	7,75
Leistung Sonde WP	kW	7,16	7,39
Systemarbeitszahl	-	3,52	3,77

Werte in gelb hinterlegten Feldern können geändert werden

Referenzsystem



Alternativsystem



Systemvergleich für ein Zahlenbeispiel

vorgegebene Größen	Einheit	Wert
Massenstrom Heizkreis	kg/s	1
spez. Wärmekapazität Heizkreis	J/kgK	4200
Massenstrom Solekreis	kg/s	1
spez. Wärmekapazität Solekreis	J/kgK	4200
abgegebene Heizleistung	kW	10

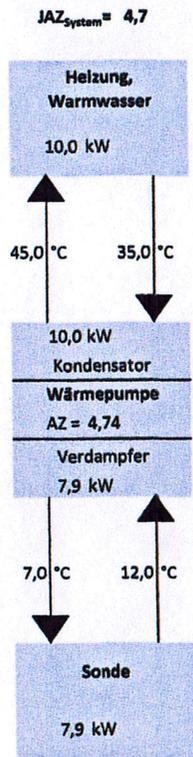
Werte Wärmepumpe		
Carnot'scher Gütegrad	-	0,5
Linearterm	-	n.a.
Quadratischer Term	-	n.a.

vorgegebene Temperaturen	Einheit	Wert
Vorlauf Heizkreis	°C	45,00
Rücklauf Solekreis (vor WÜ)	°C	11,60
T-Differenz WÜ heizkreisseitig	K	0,40

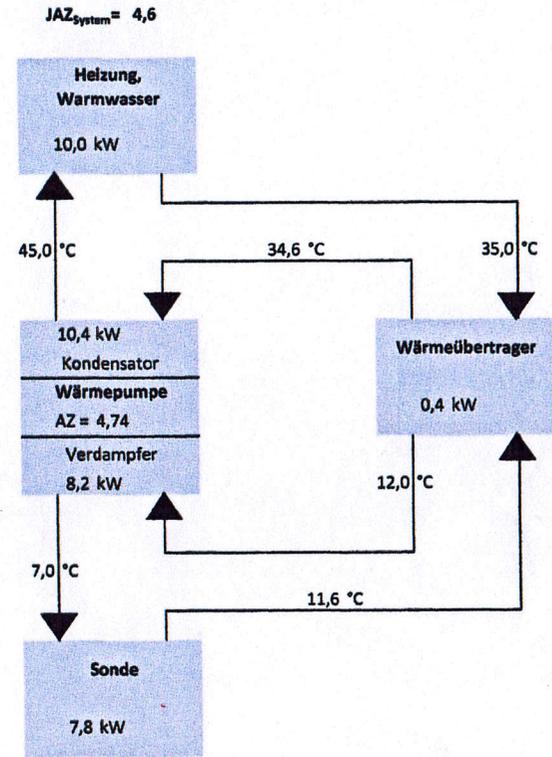
Vergleichsrechnung	Einheit	Referenz	Alternativ
Temperatur Vorlauf Heizung	°C	45,00	45,00
Temperatur Rücklauf Heizung	°C	35,00	35,00
Temperatur Rücklauf WÜ	°C	-	34,60
Temperatur Rücklauf Sonde	°C	12,00	12,00
Temperatur Vorlauf Verdampfer	°C	12,00	12,00
Temperatur Rücklauf Verdampfer	°C	7,00	7,00
Arbeitszahl WP	-	4,74	4,74
Leistung Wärmeübertrager WÜ	kW	-	0,40
Leistung Kondensator WP	kW	10,00	10,40
elektrische Leistung WP	kW	2,11	2,19
Leistung Verdampfer WP	kW	7,89	8,21
Leistung Sonde WP	kW	7,90	7,80
Systemarbeitszahl	-	4,74	4,56

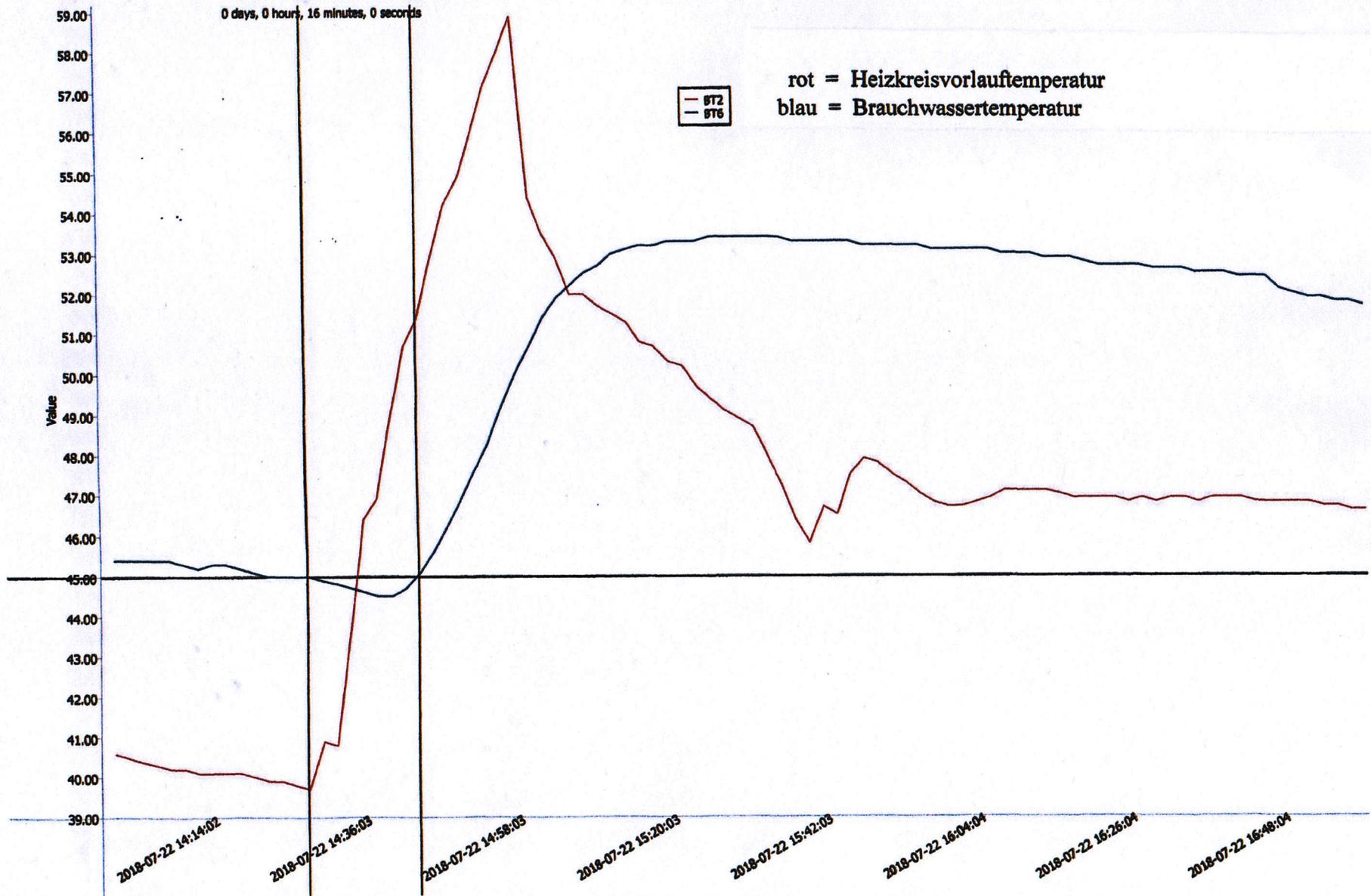
Werte in gelb hinterlegten Feldern können geändert werden

Referenzsystem



Alternativsystem





Anlage 12

Beispiel für die Erwärmung von Brauchwasser