

Technische und wirtschaftliche Synergien zwischen Solarthermie und geothermischer Tiefensonde

Prof. Dr. Erdmann , J. Hinrichsen, J. Rädler, T. Schrag (gefördert von der DBU)
TU-Berlin, Institut für Energietechnik, FG Energiesysteme, Einsteinufer 25, 10587 Berlin
Tel. 049/30/ 314-22 890 Fax. 049/30/ 314-26 908

Dr. H. Liebisch
EKT, Energie und Kommunal- Technologie GmbH, Max-Dohrn-Str. 10, 10589 Berlin
Tel. 049/30/34 98 05 13 Fax. 049/30/34 98 05 62

Zusammenfassung

Für Nahwärmesysteme mit regenerativen Deckungsraten über 30% können solarthermische Anlagen, mit ihrer saisonal und tageszeitlich schwankenden Energiebereitstellung, ideal durch eine geothermische Tiefensonde ergänzt werden.

In dem kombinierten System Gesootherm S erfolgt der regenerative Beitrag im Sommer solarthermisch und überschüssige Solarenergie wird im Erdreich gespeichert, im Winter wird der regenerative Beitrag vorwiegend geothermisch durch die Tiefensonde geleistet.

Der sich ergänzende Betrieb verspricht hohe regenerative Deckungsraten bei gleichzeitig hohen Wirkungsgraden und günstigen wirtschaftlichen Bedingungen beider Systeme.

Aus der Simulation des Systems in der Simulationsumgebung SMILE liegen erste Ergebnisse bezüglich des Speicher- und Regenerationsverhaltens der Tiefensonde vor.

Einleitung

Derzeit erfolgt im Rahmen eines BMBF-Projektes die "Untersuchung der Durchführbarkeit des solar- geothermisch gestützten Wärmeversorgungssystems Gesootherm S". Die Untersuchung wird von der Energie und Kommunal- Technologie GmbH (EKT) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energietechnik FG Energiesysteme der TU-Berlin und der Ingenieurgesellschaft KEMA IEV erstellt. Die Studie beinhaltet die Simulation des Systems Gesootherm S mit Hilfe der Simulationsumgebung SMILE sowie Wirtschaftlichkeitsberechnungen für ausgewählte Systemkonfigurationen auf der Basis konkreter Firmenangebote und Erfahrungen aus anderen Projekten.

Ziel ist die kostengünstige Versorgung von Nahwärmesystemen mit Anschlußleistungen von 1-5 MW bei regenerativen Deckungsraten von 30-60%.

Systembeschreibung

Das Grundsystem, bestehend aus Kollektorfeld, Pufferspeicher, Spitzenlastkessel und Verteilnetz, wird ergänzt durch eine Tiefensonde mit Wärmepumpe.

Die Tiefensonde ist im Unterschied zu den meisten geothermischen Anlagen (Aquifere-, Hot-Dry-Rock-Systeme, etc.) ein geschlossenes System. Von oberflächennahen Erdsonden (Tiefe bis 100m) unterscheidet sie sich durch die Tiefe der Bohrung (bis 3.000m), um Erdwärme bei ca. 100° C zu nutzen. Sie besteht aus einer einzigen Bohrung mit einem Rohr-in-Rohr-System. Der geschlossene Kreislauf wird einmalig mit aufbereitetem Wasser befüllt. Die Leistung und die Sondaustrittstemperatur dieses Erdwärmetauschers wird über den Volumenstrom der

oberirdischen Pumpen geregelt. Die Anhebung der Sondenaustrittstemperatur auf das Niveau des Heiznetzes erfolgt durch eine Wärmepumpe. Eine Anlage dieser Art wird erstmals seit 1994 in Prenzlau betrieben.

Technische und wirtschaftliche Synergieeffekte der Systemkombination

Die regenerative Deckung von über 40 Prozent des Wärmebedarfs bei Nahwärmesystemen im Wohnungsbau ist allein mit solarthermischen als auch allein mit geothermischen Anlagen nur mit relativ hohem technischen Aufwand und entsprechend hohen spezifischen Kosten möglich.

Bei der Solarthermie ist die direkte Nutzung durch die saisonal- und tageszeitlich fluktuierende Solarstrahlung im wesentlichen auf die Warmwasserbereitung in den Sommermonaten beschränkt, d. h. 10 bis 20 Prozent des Jahresenergiebedarfs lassen sich kostengünstig decken. Für höhere Deckungsraten sind Langzeitwärmespeicher erforderlich, wie sie in verschiedenen Pilotprojekten (Friedrichshafen, Hamburg, Neckarsulm etc.) erprobt werden. Durch die zusätzliche Installation der Langzeitwärmespeicher liegen die spezifischen Kosten für die Bereitstellung von Heizenergie dabei ca. doppelt so hoch wie für die reine Warmwasserbereitung.

Die Nutzung einer Tiefensole ist nicht auf besondere geothermische Anomalien angewiesen. Sie ist in in den meisten Gebieten Deutschlands (z.B. Norddeutsches Becken, Münsterländer Becken, Nordalpines Molassebecken) möglich und hat völlig andere Charakteristika. Sie ist einerseits das ganze Jahr rund um die Uhr verfügbar, hat andererseits jedoch eine vergleichsweise niedrige Leistung (ca. 500 KW) bei relativ niedrigen Sondenaustrittstemperaturen (40 bis 60 °C). Diese muß i. d. R. durch eine Wärmepumpe angehoben werden (auch im Sommer sind für die Warmwasserbereitung 70° C Netzvorlauftemperatur notwendig). Wird eine gasmotorische Wärmepumpe betrieben, kann die Abwärme zum Heizen verwendet werden. Durch die betriebsbedingte Wärmebereitstellung der Wärmepumpe in etwa gleicher Größenordnung wie die geothermische Energie ist die größte mögliche Deckungsrate auf ca. 50 Prozent begrenzt. Bei alleinigem Betrieb des Systems "Tiefensole mit Wärmepumpe" müßte es die meiste Zeit des Jahres in der energetisch ungünstigen Teillast betrieben werden (niedrige Leistungszahlen, häufiges Takten). Des weiteren könnte die Tiefensole im Sommer den Energiebedarf zur Warmwasserbereitung zu 100 Prozent decken, jedoch ist auch dann durch den Betrieb der Wärmepumpe nur eine 50 prozentige regenerative Deckung möglich. Die mit angemessenem Aufwand erzielbaren Deckungsraten liegen daher etwa bei 30 bis 40 Prozent.

Bei einem zeitlich abgestimmten Betrieb beider regenerativen Energiequelle sind Deckungsraten über 30% als relativ leicht erreichbar zu erwarten. Die erforderliche Wärme wird in diesem System im Sommer durch die solarthermische und im Winter im wesentlichen durch die geothermische Anlage gedeckt. Eine einfache Addition der Energiemengen ist natürlich nicht möglich, da sie teilweise zeitgleich während eines geringen Wärmebedarfes anfallen und die Wirkungsgrade beider Systeme von niedrigeren Systemeintrittstemperaturen abhängen. Es ergeben sich auch Vorteile: überschüssige Solarenergie kann in der Tiefensole gespeichert werden und die, durch den Betrieb der Solaranlage bedingten, Stillstandszeiten der Tiefensole bewirken durch den Regenerationseffekt (Erwärmung des Erdreiches in Betriebspausen) eine bessere Nutzung der Geothermie zu einem späteren Zeitpunkt. Diese zeitliche Verschiebung ist ein positiver Effekt, wie er bei Solaranlagenkombinationen mit anderen Systemen (z. B. BHKW's) nicht auftritt. Um diese Effekte auch unter realistischen Betriebsbedingungen zu quantifizieren ist die detaillierte Simulation notwendig.

Darüberhinaus sind durch die relativ kleinen Kollektorflächen und die hydrogeologisch vergleichsweise unbedenklichen Tiefensonden auch innerstädtische Standorte möglich. Die Systemgröße mit Anschlußleistungen von 1 bis 5 MW entspricht den meisten heute geplanten neuen Nahwärmenetzen.

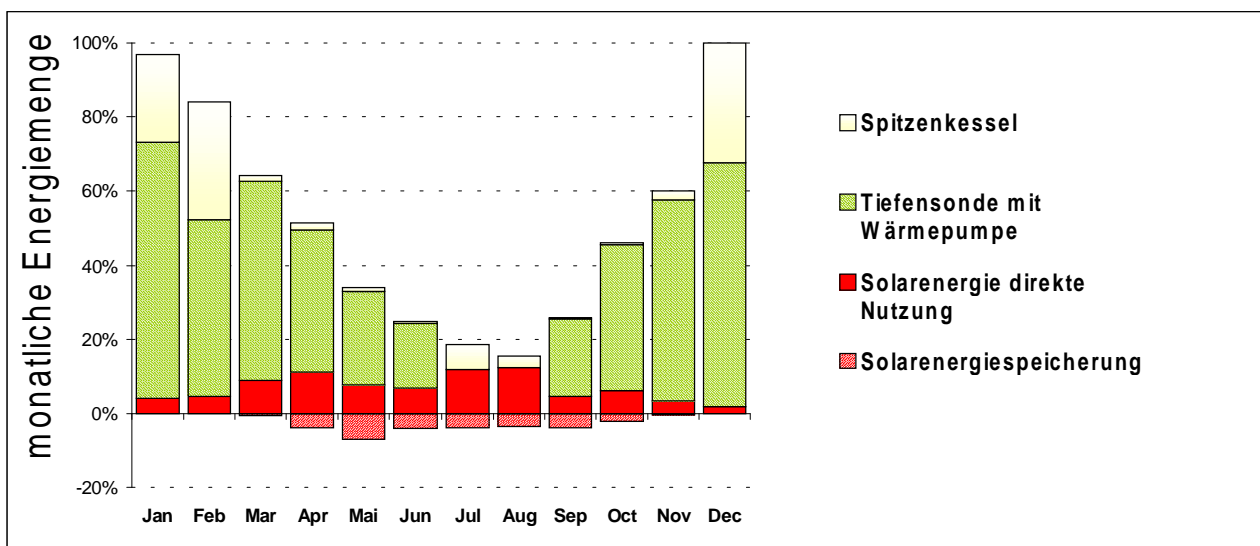
Eine erste Kalkulation dieser Systemkombination wurde für die Nahwärmeversorgung eines Wohngebietes durchgeführt.

Beispielprojekt

Für ein Wohngebiet (Standort: Berlin, 1.000 Wohneinheiten, Anschlußleistung: 4 MW, Jahreswärmebedarf ab Hausübergabestation: 7.700 MWh) wurde ein Anlagenkonzept entworfen und mit einem einfachen Modell simuliert. Grundlage war eine Anlagenkonfiguration mit 5.500 m² Sonnenkollektoren, einer Tiefensonde mit 2.500 m Tiefe, einer gasmotorischen Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 700 kW, einer Gaskesselanlage mit einer thermischen Leistung von 4.000 kW und einem 200 m³ Pufferspeicher. Aus dieser einfachen Simulation ergaben sich für den Jahresgang der erzeugten Wärmeenergie die in Bild 1 normiert dargestellten Werte.

In den Sommermonaten Juli und August wird dabei der Bedarf fast vollständig von der Solaranlage gedeckt und nicht direkt genutzte Energie (auch in sonnenreichen Perioden der anderen Monate) an das Erdreich abgegeben (ca 25% der Solarenergie). Über das ganze Jahr können dadurch 13% des Jahresenergiebedarfs solarthermisch in direkter Nutzung bereitgestellt werden.

Der verbleibende Bedarf wird von der geothermischen Energie zusammen mit der Abwärme der Wärmepumpe fast vollständig gedeckt (Geothermie: 35%, Gaswärmeeintrag der Wärmepumpe: 35%). Die Tiefensonde setzt dabei im Juli und August aus und das Erdreich regeneriert sich in dieser Zeit. Der Beitrag der Geothermie, der auf die Einspeicherung von Solarenergie zurückzuführen ist, wurde mit 3% bilanziert (im Bild nicht explizit ausgewiesen).



Durch den Spitzenkessel müssen lediglich 17% des Jahresenergiebedarfs erzeugt werden.

Bild 1: Gesootherm S - Jahresgang der erzeugten Wärmeenergie für ein Wohngebiet

Die Wärmepreiskalkulation wurde in Anlehnung an die VDI - Richtlinie 2067 durchgeführt. Aus den Werten für die kapitalgebundenen, verbrauchsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen Kosten ergaben sich bei einem Zinssatz von 6,5 % die in Tabelle 1 dargestellten Beträge der jährlichen Kosten für die Bereitstellung der Wärme aus den einzelnen Energiequellen und die Gemeinkosten der Energiebereitstellung (Heizhaus, Verteilnetz etc.). Aus der Verknüpfung dieser Kosten mit den Energiebeiträgen der verschiedenen Energiequellen ergeben sich deren Wärmegestehungskosten. Für die Bereitstellung der gesamten Energie ab Hausübergabestation ergab sich dabei ein Wärmepreis von 188 DM/MWh.

Die Wärmepreise für die Solarenergie (391 DM/MWh) und die Geothermie (157 DM/MWh) liegen dabei in der Größenordnung, wie sie für Anlagen mit "üblichen", d. h. niedrigen Deckungsgraden zu erwarten sind. Der mit 143 DM/MWh sehr günstige Preis für die Abwärme der gasmotorischen Wärmepumpe resultiert aus den sehr günstigen Betriebsbedingungen (Temperaturhub nur um

20-30° C). Die Bereitstellung aus der konventionellen Kesselanlage ist vergleichsweise teuer, da sie trotz geringem Beitrag (17%) auf die volle Anschlußleistung ausgelegt wurde.

	jährliche Kosten TDM/a	Energie- bereitstellung MWh/a	%	anteilige Gemeinkosten TDM/a	Wärmepreis ab HÜS DM/MWh
regenerativ					
Solarthermie	370	1.117	13	67	391
Geothermie	281	2.912	35	175	157
Summe	651	4.029	48		222
fossil					
Wärmepumpe	242	2.924	35	175	143
Kessel	182	1.431	17	86	187
Summe	424	4.355	52		157
Gesamtsumme	1.075	8.384	100		188

Tabelle 1: Gesootherm S - Wärmepreiskalkulation für die Versorgung eines Wohngebietes

Die angenommenen Parameter und das Systemverhalten werden in der derzeit laufenden Machbarkeitsstudie untersucht. Grundlage ist die im folgenden näher beschriebene detailliertere Simulation des Systems.

Simulation des Wärmeversorgungssystems Gesootherm S

Um die Annahmen über die Beiträge zur Wärmeversorgung zu überprüfen und um die Dimensionierung der Einzelkomponenten und die Regelung zu optimieren wurde das System in der Simulationsumgebung SMILE abgebildet.

Die Simulationsumgebung SMILE zur dynamischen Simulation komplexer energiewandelnder Systeme wurde an der Technischen Universität Berlin entwickelt und eignet sich besonders zur Untersuchung einer solchen kombinierten Energieversorgungsanlage. Sie zeichnet sich durch die strikte Trennung zwischen Modellen und Numerik aus (es stehen sechs verschiedene Gleichungslöser zur Verfügung). Dies und eine gleichungs- und objektorientierte Modellbeschreibungssprache erleichtern die Erstellung von Modellen. Die objektorientierte Struktur unterstützt außerdem die Erweiterung und Wiederverwendung der Modelle. Eine umfangreiche Komponentenbibliothek (Kessel, Wärmepumpe, Pufferspeicher, Kollektor, Verteilernetz, Wärmetauscher, etc.) ist bereits vorhanden, so daß für die Simulation des Systems Gesootherm S lediglich ein Modell der Tiefensonde neu erstellt werden mußte.

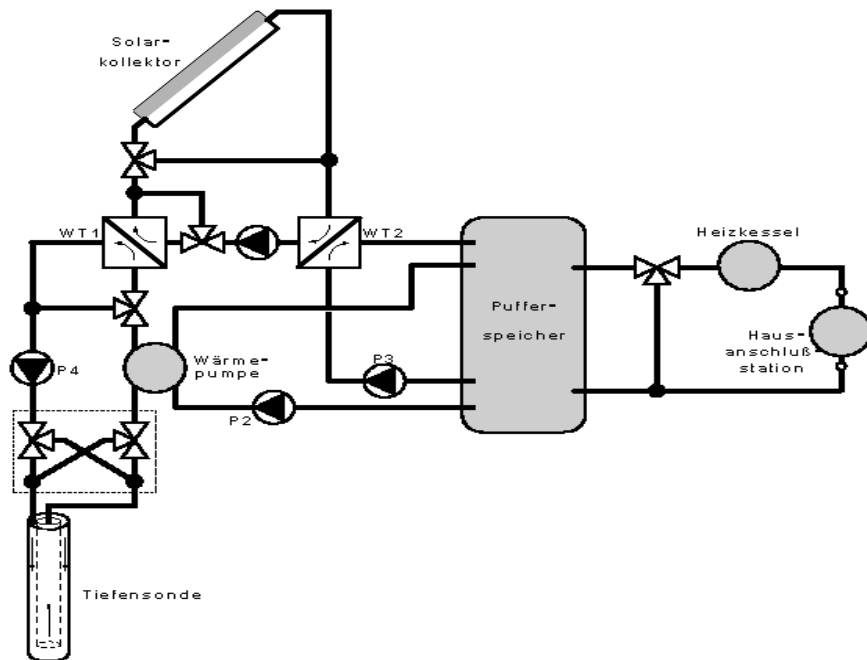


Bild 2: beispielhaftes Anlagenschema des kombinierten Systems

Eine mögliche Beispielschaltung des Systems Gesotherm S ist in Bild 2 dargestellt. Solarkollektor und Tiefensonde verfügen aus technischen Gründen über eigene geschlossene Kreisläufe. Die von der Sonde geförderte geothermische Energie wird über eine Wärmepumpe in den Pufferspeicher geladen. Die Schaltung bietet vielfältige Möglichkeiten, den Anlagenbetrieb über eine angepaßte Regelung zu optimieren. Der Pufferspeicher wird im Normalbetrieb durch die Kollektoren und die Wärmepumpe geladen. Der zwischen Sonden- und Kollektorkreis sitzende Wärmetauscher dient dazu, bei vollem Speicher Solarenergie über die Sonde im Erdreich zu speichern und Stagnationsprobleme des Kollektors abzufangen. Dazu wird die Fließrichtung in der Sonde umgekehrt. Sind Kollektor und Erdsonde in Betrieb, kann über den Wärmetauscher die Kollektorstücktemperatur zur Erhöhung des Kollektorwirkungsgrades gesenkt werden. Der Kollektorkreis kann bei hohen Sondenrücklauftemperaturen als Zwischenkreis zur direkten Beladung des Speichers ohne Wärmepumpe dienen.

Modellierung der Tiefensonde

Zur Untersuchung der Regelungsmöglichkeiten und der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Komponenten wurde ein detailliertes Modell der Tiefensonde erstellt. Dieses Gesamtmodell ist unterteilt in Erdreich- und Rohrmodelle, die schrittweise erstellt, getestet und dann kombiniert wurden.



Bild 3: Hierarchischer Aufbau des Erdmodells

Das Erdmodell basiert auf reiner Wärmeleitung. Grundwasserströmung und Konvektion kann für die geschlossene Sonde meist vernachlässigt werden und wurde daher bisher nicht implementiert. Ein zweidimensionales Finite-Differenzen-Zylindermodell mit radialer und axialer Wärmeleitung wurde konzipiert. Diese Vereinfachung ist aufgrund der schichtartigen Erdstruktur und des als Linienquelle darstellbaren Wärmetauscherrohres vertretbar. Der hierarchische Aufbau des

Erdmodells ist in Bild 3 dargestellt. Aufgrund dieser objektorientierten Modellierung lassen sich die Modelle einfach erweitern. Eine Berücksichtigung von Konvektion - sofern diese zweidimensional beschreibbar ist - oder anderer Abhängigkeiten ist durch einfaches Hinzufügen von Gleichungen in den abgeleiteten Modellklassen möglich.

Das Wärmetauscherrohr wird ebenfalls über finite Differenzen auf der Grundlage von Enthalpiebilanzen modelliert. Es sind wechselnde Fließrichtungen und -geschwindigkeiten im Innen- und Außenrohr darstellbar. Dieses Modell wird erweitert um die Möglichkeiten, alle Stoffwerte temperatur- und druckabhängig zu berücksichtigen und den Wärmeübergang strömungsabhängig darzustellen.

Zur Modellierung der kompletten Erdsonde werden nun Erdreich und Rohrmodell untereinander verbunden. Das entstehende Gesamtmodell beinhaltet jeweils mindestens eines der beschriebenen Erdreich- und Rohrmodelle (siehe Bild 4). Diese Einzelmodelle werden untereinander verknüpft und durch Rohrabschlußkomponenten ergänzt. Nur die für den Nutzer interessanten Parameter werden nach außen dargestellt. Dieses Erdsondenmodell kann je nach Anforderungen (Genauigkeit, Rechenzeit etc.) einfacher oder komplizierter modellierte Komponenten beinhalten. Simulationen können allein mit dem Erdsondenmodell oder in Kombination mit der oben vorgestellten (oder einer anderen) Anlage durchgeführt werden.

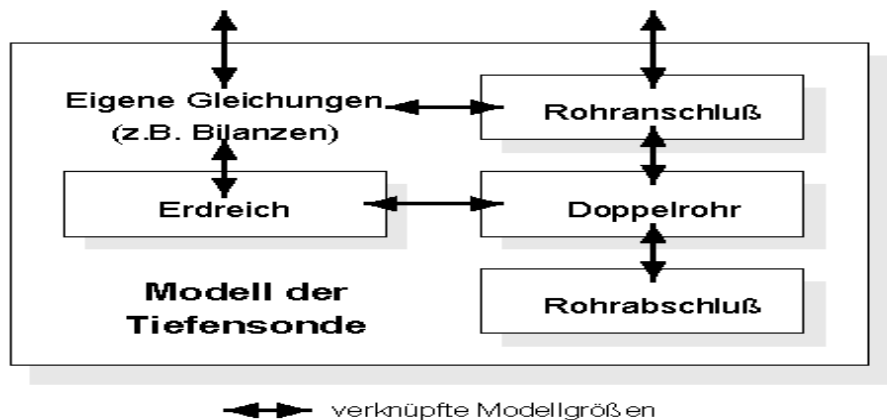


Bild 4: Zusammensetzung des Tiefensondenmodells

Für die Rohrkomponenten wurde durch Testrechnungen die Übereinstimmung mit den physikalischen Grundlagen bestätigt und die Simulation des Erdreichs zeigte eine sehr gute Übereinstimmung mit einem am geologischen Forschungszentrum in Potsdam genutzten und weiterentwickelten Programm. Zur Validierung des gesamten Sondenmodells, insbesondere zur Abschätzung der Zulässigkeit getroffener Vereinfachungen, werden Simulationsergebnisse mit den Meßdaten der bereits vorhandenen Tiefensonde in Prenzlau verglichen.

Simulation der Tiefensonde

Die ersten Untersuchungen wurden durchgeführt, um die grundlegenden Abhängigkeiten der Sondenleistung von Betriebsparametern wie Massenstrom und Einspeisetemperatur darzustellen und das zeitliche Verhalten der Sonde zu untersuchen. Es zeigt sich, daß hohe Massenströme zu höheren Sondenleistungen bei gleichzeitig geringeren Rücklauftemperaturen führen. Eine energetische Optimierung kann hier nur unter Berücksichtigung des Gesamtsystems, insbesondere der Wärmepumpe, erfolgen.

Bei der Kopplung der Sonde mit Sonnenkollektoren ist von besonderer Bedeutung, wie schnell sich die Erdtemperaturen bei einer Betriebspause wieder regenerieren und wie stark dieser Regenerationseffekt durch Energieeinspeicherung unterstützt wird. Es werden deshalb Simulationen mit durchgehendem Betrieb, mit Pausen zur Regeneration und mit Einspeicherung während dieser Pausen durchgeführt. Es wurde bisher das Verhalten mit Pausen von ein, zwei und drei Monaten pro Jahr berechnet, unter der Annahme, daß während dieser Zeit der Bedarf durch

die Kollektoren gedeckt wird. Die Ergebnisse dieser Simulationen haben hauptsächlich qualitativen Charakter, da hier noch keine optimierten Betriebsparameter (Massenströme, Temperaturen), kein zeitabhängiger Bedarf und keine Kopplung mit der restlichen Anlage berücksichtigt wurden.

In Bild 5 sind die Temperaturverläufe in der Umgebung der Tiefensonde bei einer Teufe von 2500 m für verschiedene Betriebsweisen dargestellt. Während des Sondenbetriebes sinken die Erdtemperaturen in Sondennähe ab, es bildet sich ein Temperaturtrichter, der sich langsam vergrößert. Die Sonde zieht mehr Wärme ab, als aus dem umliegenden Erdreich nachfließen kann. In einer Regenerationspause verflacht sich dieser Trichter durch Wärmefluß von außen nach innen. Bei Energieeinspeicherung wird der Trichter durch Energieabgabe der Sonde von innen wieder aufgefüllt.

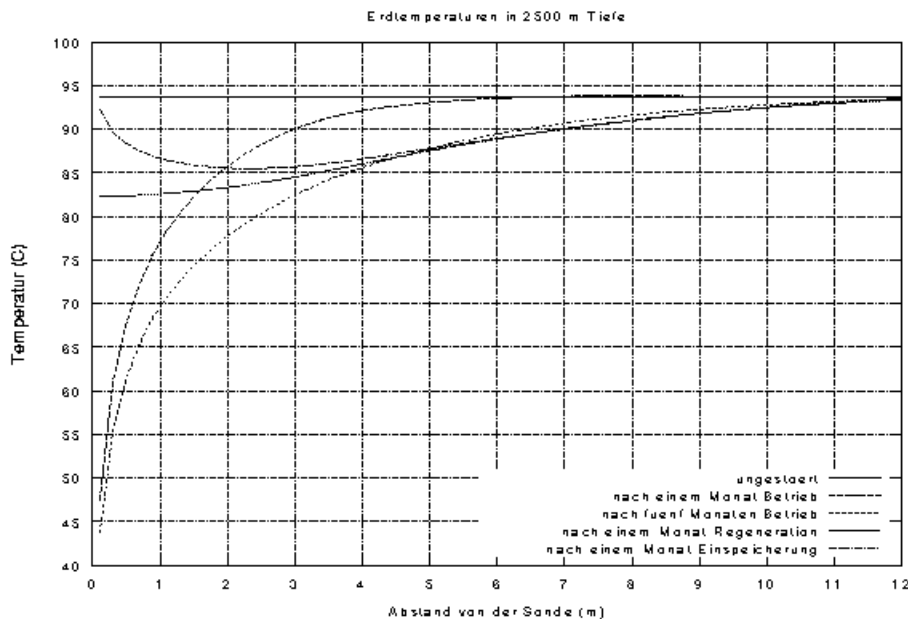


Bild 5: Einfluß von Förderung, Regeneration und Einspeicherung auf die Erdtemperaturen

Die Simulationen haben gezeigt, daß sich nach Regenerationspausen höhere Sondenleistungen einstellen. Setzt man den dadurch bedingten Mehrertrag ins Verhältnis zu der Energie, auf deren Förderung während der Pause verzichtet wird, ergibt sich ein Wirkungsgrad, der analog zu einem Speicherwirkungsgrad betrachtet werden kann. Er wird hier als Verschiebungswirkungsgrad bezeichnet, da er die Möglichkeit kennzeichnet, durch ein zweites Versorgungssystem einen Teil des Sondenertes zeitlich zu verschieben.

Ergebnisse dieser Simulationen sind in Bild 6 dargestellt. Es zeigt sich, daß kurze Pausen deutlich effektiver sind. Durch die Regeneration des Erdreiches verflacht sich der Temperaturtrichter, die Menge der nachströmenden Wärme wird geringer, die Regeneration erfolgt immer langsamer. Dem Verzicht auf Erdwärmennutzung steht ein immer kleiner werdender Regenerationseffekt gegenüber.

Bei der Einspeicherung wird dieser Verschiebungseffekt, der durch die fehlende Energieentnahme weiterhin besteht, überlagert durch den Einspeichereffekt. Der Nutzen der Einspeicherung besteht im Mehrertrag gegenüber dem Betrieb mit reinen Regenerationspausen gleicher Länge. Setzt man diesen ins Verhältnis zur eingespeicherten Energie, ergibt sich der reine Speicherwirkungsgrad. Der effektive Wirkungsgrad der Einspeicherung ergibt sich aus der Kombination aus Verschiebungs- und Speicherwirkungsgrad.

Es zeigt sich, daß die Speicherung großer Energiemengen über längere Zeiten mit großen Verlusten behaftet ist. Das ausgebeutete Erdreich regeneriert sich auf natürliche Weise durch Wärmeleitung und gleichzeitig durch Energieabgabe des Wärmetauscherrohres. Schon nach relativ kurzer Zeit sind die Erdtemperaturen um das Rohr wieder so hoch, daß im unteren Rohrbereich keine Energie mehr abgegeben werden kann. Die Erwärmung der Erde findet dann

hauptsächlich in geringeren Tiefen statt. Dort fehlt allerdings die natürliche Isolierung durch ein warmes umgebendes Erdreich, so daß nur ein geringer Teil der gespeicherten Energie später wiedergewonnen werden kann.

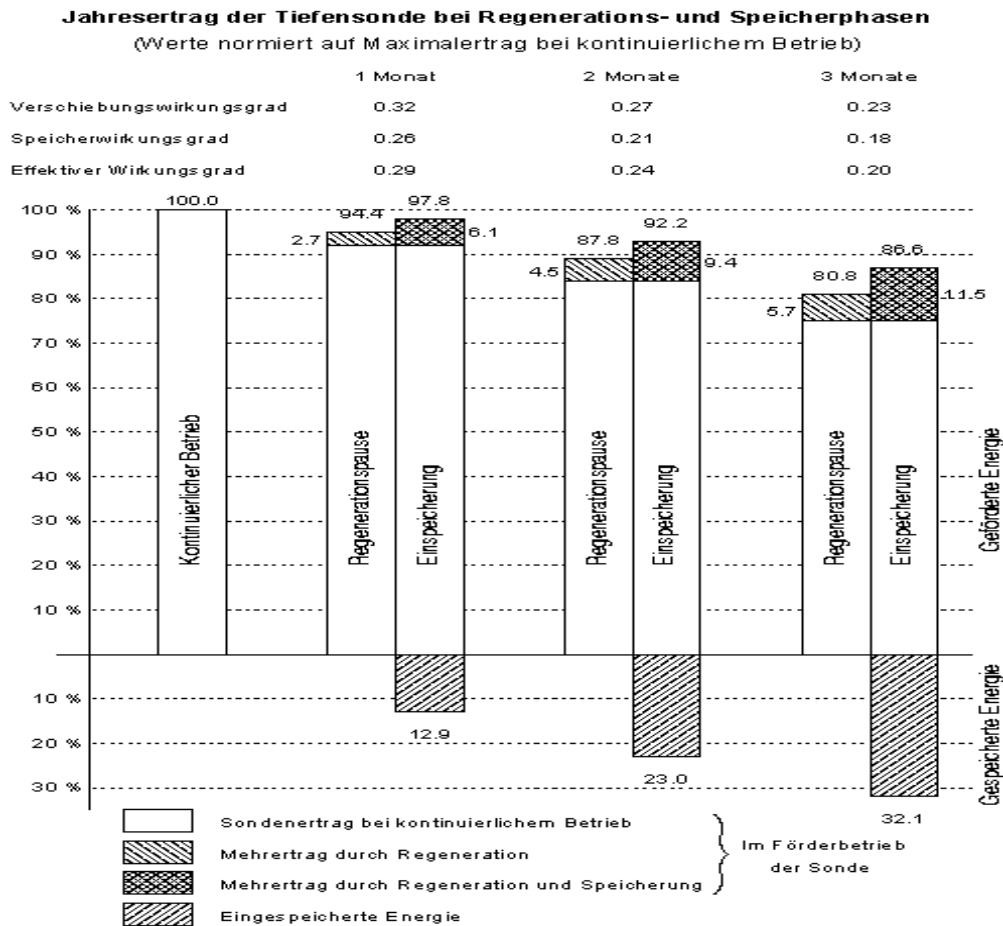


Bild 6: Einfluß von Regenerations- und Einspeicherphasen auf den Sondenertrag

Ausblick

Auch wenn diese ersten Ergebnisse auf starken Vereinfachungen basieren (z.B. zeitlich konstante Energieförderung bzw. -einspeicherung in den entsprechenden Phasen), zeigen sie doch eine deutliche Tendenz. Lange -eventuell saisonale- Regenerationspausen oder Phasen der Einspeicherung sind deutlich ineffektiver als kurze. Da der Regenerationseffekt zu höheren Sondastrittstemperaturen führt ist für die tiefergehende thermodynamische Bewertung der Speicher- und Verschiebeeffekte eine exergetische Betrachtung und für die technischen Bewertung die Wärmepumpe mit einzubeziehen. Ein oft wechselnder Betrieb von Kollektoren und Sonde kann im Zusammenwirken mit der Wärmepumpe interessante Synergieeffekte erbringen. Diese sind nur durch umfassende Simulation des Gesamtsystems mit zeitlich differenzierter Energiebedarfs- und Angebotsstruktur, sowie genauen Modellen aller Anlagenbestandteile richtig einzuschätzen. Mit dem oben dargestellten Modell des kombinierten Systems ist dies jetzt möglich. Neben der gegenseitigen Abstimmung der Dimensionierung aller Anlagenkomponenten wird die Entwicklung einer angepaßten Regelungsstrategie einen Schwerpunkt der weiteren Untersuchungen bilden.