Der Aufbau von Erdwärmeanlagen

2

Anlagen zur Gewinnung von Erdwärme sind in unterschiedlichster technischer Ausführung bekannt. Im Handbuch Energiemanagement [2] werden zahlreiche offene Systeme (Bohrungen zur Heißwasserförderung) und geschlossene Systeme (Erdwärmesonden, Wärmepfähle, Wärmekörbe, Erdkollektoren u. a.) erläutert. Dort können die Anlagentypen nachgelesen werden, die in diesem Buch nicht näher behandelt werden.

2.1 Drei Systeme zur Erdwärmegewinnung

Für die Gebäudeheizung und -klimatisierung am weitesten verbreitet sind drei prinzipielle Anlagentypen (s. Abb. 2.1).

Tiefbohrungen in die Erdkruste (EWS, Erdwärmesonden)
Sie besitzen den geringsten Platzbedarf und beeinflussen die Bauteile des Gebäudes nicht. Im Bohrloch wird eine Flüssigkeit oder ein Kältemittel zirkuliert, das die an der Bohrlochwand aufgenommene Wärme nach oben trägt. Der Wärmegewinn je Meter Bohrloch liegt je nach Installationsvariante deutlich über 30 W/m.

Erdwärmekollektorsysteme
Hierbei werden Rohrschlangen in 1–3 m Tiefe verlegt, durch die zunächst kaltes Wasser strömt und beim Durchlauf durch die Rohrschlange erwärmt wird. Diese Anlagen erfordern eine relativ große Fläche für die mehrere Hundert Meter lange Rohrschlange (der Rohrabstand sollte mindestens 1–2 m betragen), der Wärmegewinn je Meter Rohr ist im Winter infolge der niedrigen Erdreichtemperatur geringer als 10 W/m.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

F. Häfner et al., *Bau und Berechnung von Erdwärmeanlagen,*
DOI 10.1007/978-3-662-48201-8_2

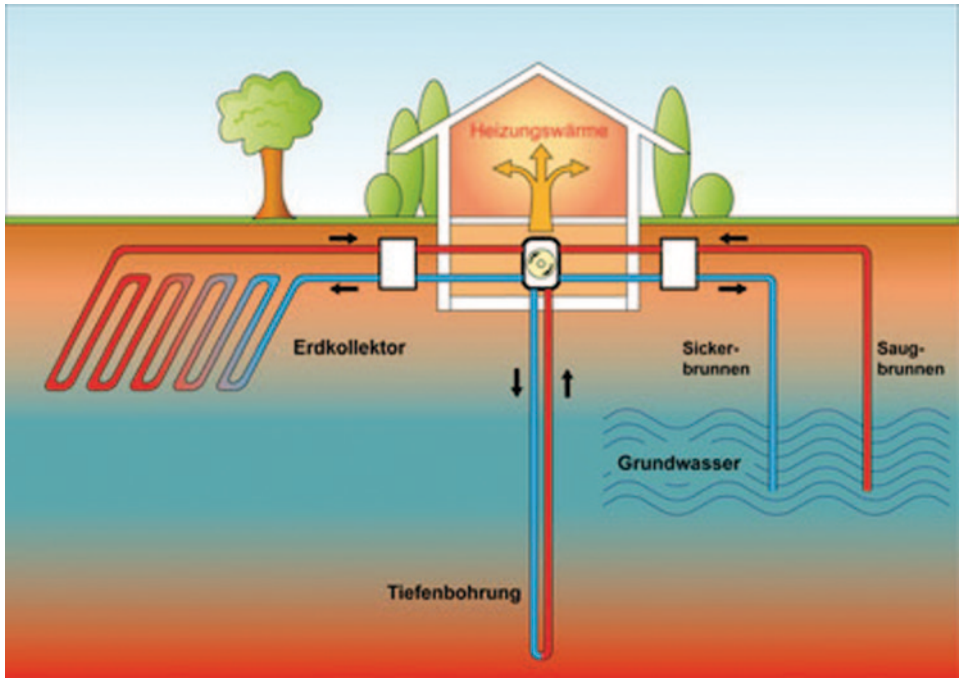


Abb. 2.1 Technische Varianten von Erdwärmeanlagen. (Quelle: www.erdwaerme-heizung.biz)

Brunnensysteme

Zwei Brunnen dienen der Entnahme bzw. Injektion von Grundwasser, das unterhalb 10 m stets Temperaturen im Bereich 8–12 °C aufweist. Der Vorteil dieses Typs liegt im hohen Wärmegewinn, da jeder Liter gefördertes Wasser bei Abkühlung um 1 Grad bereits 4184 J Wärme bereitstellt, so dass bei einer Zirkulationsrate von 1 l/s und 5 K Abkühlung bereits eine geothermische Leistung von mehr als 20 kW erreichbar ist. Wesentlicher Nachteil dieser Ausführung ist, dass oftmals keine oberflächennahen, grundwasserführenden Schichten am Ort vorhanden sind bzw. keine wasserwirtschaftliche Genehmigung erteilt wird und der Injektionsbrunnen durch Ablagerungen (Eisenoxidausfällungen bei Sauerstoffzutritt, Ockerbildung) verockert, d. h. wenig oder kein Wasser mehr aufnehmen kann.

Abbildung 2.1 zeigt diese technischen Anlagentypen. Die hier gezeigten Anlagen gewinnen die Erdwärme bei sehr geringen Temperaturen unterhalb der natürlichen geothermischen Temperatur, die bei den oberflächennahen Anlagen im Bereich von 8–12 °C liegt. Üblicherweise wird die Erdwärme bei Temperaturen von −3 °C bis +5 °C dem Erdreich entnommen, so dass sie durch eine Wärmepumpe auf die jeweilige Vorlauftemperatur der Gebäudeheizung (35 °C bis 70 °C) angehoben werden muss.

Das vorliegende Buch behandelt ausschließlich Anlagen, welche die Erdwärme aus Erdwärmesonden (EWS) bezieht, weil dieser Typ wegen seines geringen Platzbedarfes nahezu überall einsetzbar ist – sowohl im Zentrum von Städten als auch in Industriegebieten oder auf dem Land und bei ordnungsgemäßer Ausführung keine Verunreinigung des

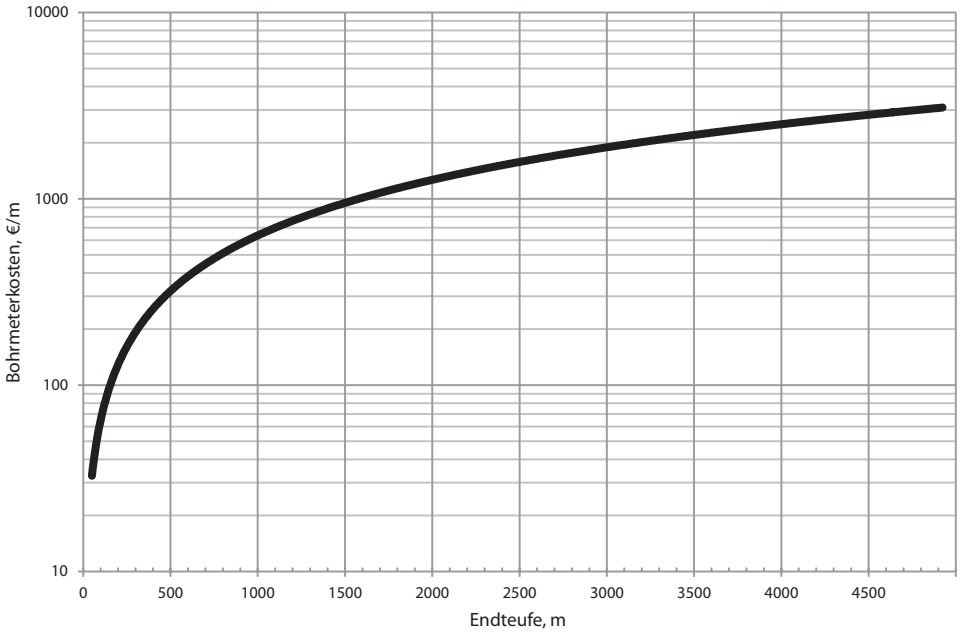


Abb. 2.2 Kosten je Bohrmeter bei verschiedenen Tiefen (Endteufe) der Bohrung

Grundwassers befürchten läßt. Für Einfamilienhäuser genügt zumeist ein einziges Bohrloch mit 60–120 m Tiefe, für große Gebäude werden Sondenfelder mit 100 EWS und mehr im Abstand von 2 m bis 10 m angelegt. Derartige Anlagen werden in der Heizperiode zur Wärmegewinnung genutzt, können aber auch in der Sommerperiode sehr rationell zur Gebäudekühlung (Klimatisierung) eingesetzt werden. Die Tiefe der Bohrungen hängt sehr stark vom Verwendungszweck und der gewünschten Gesamtwärmeleistung der Anlage ab.

Für Einfamilienhäuser mit und ohne Klimakältebedarf wird man EWS mit Tiefen kleiner als 100 m einsetzen. Sie erfordern keine bergrechtliche Genehmigung.

Bei größeren Gebäuden mit dem Schwerpunkt auf Beheizung können aber durchaus größere Tiefen bis 400 m rationell sein, insbesondere wenn die verfügbare Fläche (z. B. in Stadtzentren) klein ist. Eine sommerliche Klimakältegewinnung ist jedoch hierbei weniger sinnvoll, weil die natürlichen Temperaturen am EWS-Fuß dann schon über 20 °C liegen.

Tiefe Erdwärmesonden, d. h. Bohrungen von mehr als 400 m Tiefe, sind thermodynamisch sehr nützlich, scheiden aber aus wirtschaftlichen Gründen zumeist aus.

In Abb. 2.2 sind die aktuellen Kosten je Meter einer Tiefbohrung als grobe Anhaltswerte dargestellt. Die tatsächlichen Kosten hängen natürlich vom jeweiligen geologischen Bau, der Marktlage und einer Vielzahl individueller Gegebenheiten ab, aber die Relation, dass eine 100 m tiefe Bohrung deutlich weniger als Zehntausend € und eine 5000 m tiefe Bohrung weit mehr als 10 Mio. € kostet, wird wohl auch mittelfristig erhalten bleiben.

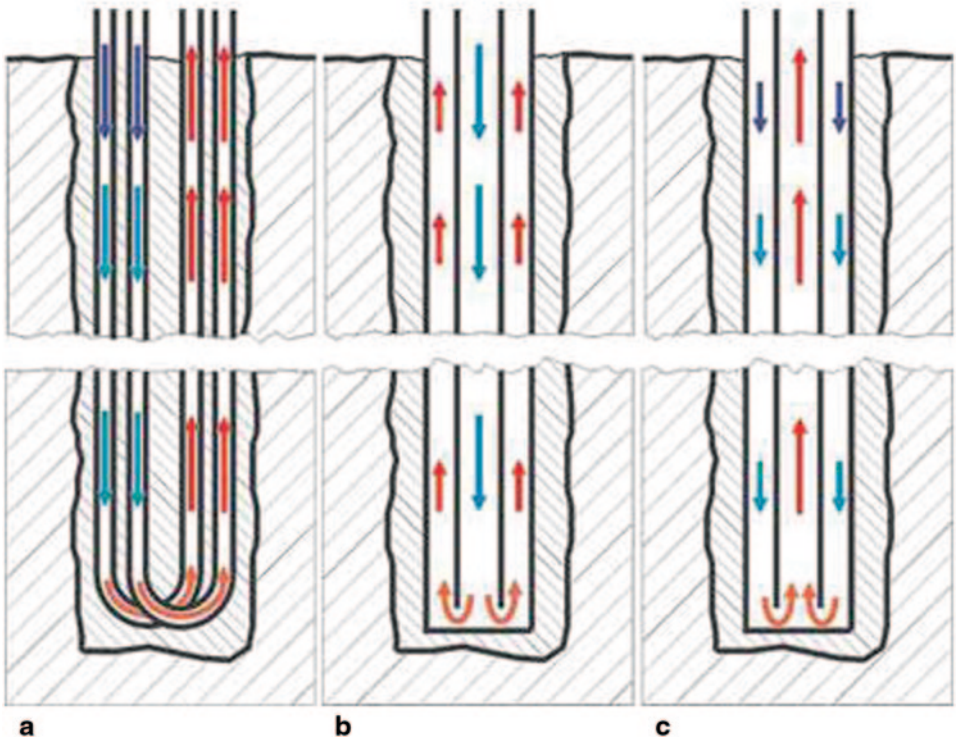


Abb. 2.3 Installationsvarianten für U-Rohr Erdwärmesonden, nach [2]. **a** Doppel-U-Rohr, **b**, **c** Koaxial–Sonden mit unterschiedlicher Zirkulationsrichtung

2.2 Oberflächennahe EWS-Systeme mit Wasserzirkulation

EWS-Systeme unterscheiden sich in der Art des zirkulierenden Wärmeträgermediums (Wasser, Kältemittel) und in der Art der technischen Installation (Komplettierung). Die weit verbreitete Technologie ist die Zirkulation von Wasser mit und ohne einen frostbeständigen Zusatz (Salzwasser, Ethanol, Glykol) in einem U-Rohr.

U-Rohr und Doppel-U-Rohrsonde

Die heute übliche Installation einer EWS, die mit Wasserzirkulation arbeitet, ist die U-Rohr- oder Doppel-U-Rohr-Komplettierung (s. Abb. 2.3a). Dazu wird in das mit Wasser oder Tonspülung gefüllte Bohrloch ein Polyethylen (PE)-Schlauch eingebaut, das Bohrloch wird anschließend mit einer Zement-Bentonit-Suspension verfüllt. Während der Verfüllung müssen die U-Rohrschenkel mit Wasser, das unter Druck steht, gefüllt sein, um den Schlauch offen zu halten. Man kann die beiden Schenkel des U-Rohres mit Abstandshaltern versehen, um den thermischen Widerstand zwischen den Schenkeln zu vergrößern. Trotzdem besteht in diesen Sonden ein teilweiser thermischer Kurzschluss zwischen auf-

und absteigendem Schenkel, der die Wärmeleistung am Sondenkopf verringert, weil die Entfernung der Schenkel voneinander relativ klein ist.

Koaxialsonden

Koaxialsonden (s. Abb. 2.3b und 2.3c) bestehen aus einem Aussenrohr, das verfüllt wird und einem nach unten offenen Innenrohr, das im wassergefüllten Bohrloch hängt [5]. Diese Komplettierung besitzt den Vorteil, dass das PE-Innenrohr dickwandig ausführbar ist und den thermischen Widerstand zum Ringraum zwischen Innen- und Aussenrohr vergrößert. Diese Installation ist ohne Zweifel die thermodynamisch günstigste Lösung, weil die wärmeaufnehmende bzw. –abgebende Bohrlochmantelfläche am größten ist. Zusätzlich kann die Zirkulationsrichtung sehr einfach geändert werden, für den Heizbetrieb nach Abb. 2.3c, für den Kühlbetrieb nach Abb. 2.3b.

Der wesentliche und kostenmäßig entscheidende Nachteil besteht darin, dass das Aussenrohr eine relativ hohe Festigkeit gegen Einbeulen besitzen muss. Die Verwendung eines dickwandigen PE-Rohres führt zu einem größeren Wärmewiderstand, so dass bei tiefen Sonden oftmals nur der Einsatz eines Stahlrohres möglich ist, dessen Meterpreis jedoch weit über dem eines Polyethylen (PE)- oder Polyamid (PA)-Rohres liegt.

Ringrohrsonden

Ringrohrsonden sind eine Neuentwicklung [7] und nutzen die Vorteile der Koaxial-Bauweise ohne deren Nachteile.

Aus Abb. 2.4 wird die Weiterentwicklung mit ihren Vorteilen deutlich:

- die Wärmeaufnahme in den PE-Ringrohren erfolgt am äußersten Rand des Bohrloches, wobei die Ringrohre mit Aussendurchmessern 12 mm bzw. 16 mm auch bei nur 2 mm Wanddicke einbeulfest sind und
- einen geringen Wärmedurchgangswiderstand besitzen. Das Innenrohr in Abb. 2.4 (3) kann thermisch sehr gut isoliert werden mit einem dickwandigen PE-Rohr und durch Verwendung eines Verfüllbaustoffes mit geringer Wärmeleitfähigkeit (preiswert, ca. 0,8 W/(m K) Leitfähigkeit).

Beim Einbau in das Bohrloch wird das gesamte Rohrbündel in einen schwach durchlässigen Gewebesack (Gaze-Sack) eingehüllt und gemeinsam mit diesem auf die gewünschte Tiefe gebracht. Der Gewebesack dient als Auffangbehälter für das Verfüllmaterial. Er wird so ausgelegt, dass er im gefüllten Zustand sicher die Bohrlochwand erreicht und somit unabhängig von den geologischen Bedingungen eine Abdichtung zwischen der Sondenbohrung und dem Gebirge gewährleistet.

In Abb. 2.4 (3) sind aus Übersichtlichkeitsgründen nur 6 Ringrohre dargestellt, tatsächlich enthält die technische Ausführung 12 Ringrohre. Auch hier ist es effizient und leicht möglich, die Zirkulationsrichtung im Kühlbetrieb umzukehren.

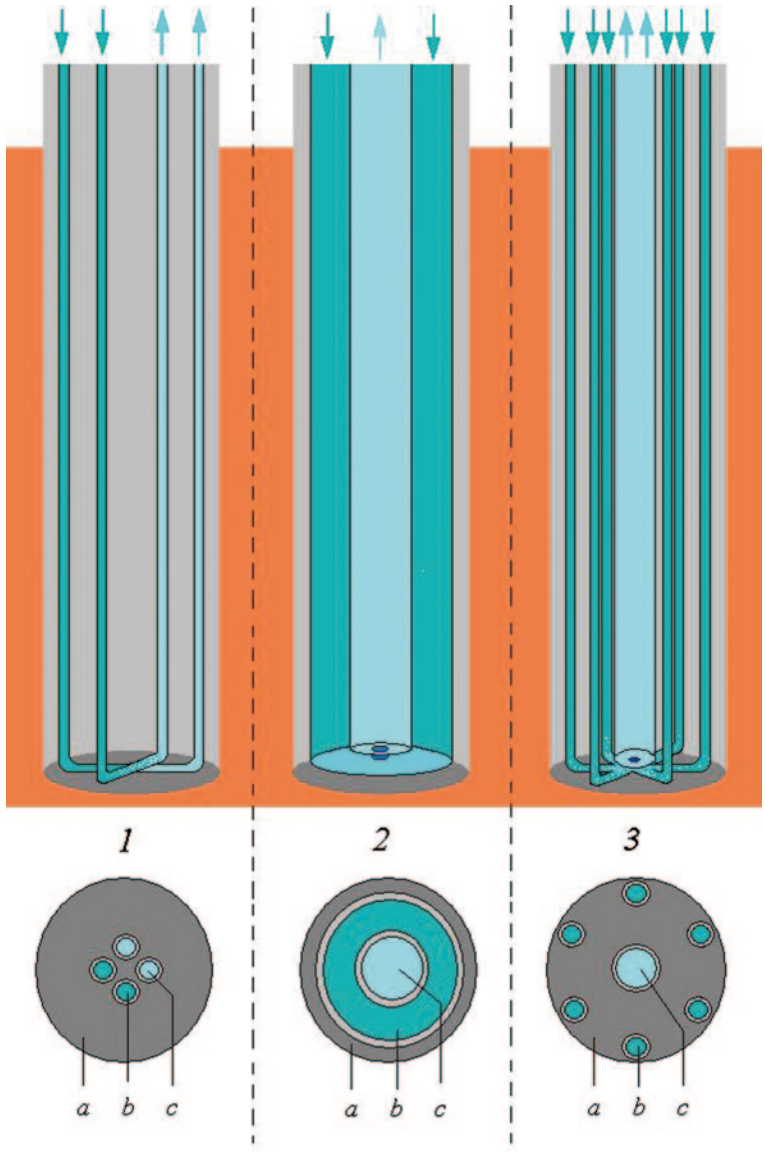


Abb. 2.4 Ringrohrsonde *3* in Längs-(*oben*) und Querschnittsdarstellung (*unten*) im Vergleich mit einer Doppel-U-Rohrsonde *1* und einer Koaxialsonde *2*. *a* Verfüllmaterial, *b* Kaltwasser, *c* Warmwasser

Tab. 2.1 Kältemittel für Direktverdampfersonden im Überblick

Kältemittel	Bezeichnung nach DIN 8960	Dampfdruck bei 0 °C, bar absolut	Verdampfungs-enthalpie bei 0 °C, kJ/kg	Wasser- Gefähr-dungsklasse
Propan, C_3H_8	R-290	4,71	373	nwg
Kohlenstoffdi-oxid, CO_2	R-744	34,86	231	nwg
Ammoniak, NH_3	R-717	4,29	1261	2
FCKW	R-404A	6,03	169	1
FCKW	R-407C	4,52	223	1
Wasser, H_2O	R-718	0,0061	2835	–

nwg nicht wassergefährdend, *FCKW* Fluorkohlenwasserstoffe

2.3 Oberflächennahe EWS-Systeme als Direktverdampfer (Phasenwechselsonden)

Als Direktverdampfersonden bezeichnet man EWS, in denen ein Kältemittel zirkuliert. Kältemittel sind Flüssiggase, die bei Wärmeaufnahme – im Gegensatz zu Wasser – bereits bei geringen Temperaturen verdampfen (Propan, Kohlenstoffdioxid, Ammoniak und zahlreiche andere anorganische und organische Stoffe, die in der Klimatechnik und in der DIN 8960 als Kältemittel bezeichnet werden). Der wesentliche Vorteil der Verwendung von Kältemitteln anstatt Wasser besteht darin, dass die Nutzwärme in Form der Verdampfungsenthalpie (Energie, die zur Verdampfung eines flüssigen Kältemittels erforderlich ist) bei nahezu konstanter Temperatur in der Sonde aufgenommen und transportiert werden kann – im Gegensatz zu wässrigen Flüssigkeiten, die bei Wärmeaufnahme ihre Temperatur erhöhen bzw. bei Wärmeentzug ihre Temperatur absenken. Aus Tab. 2.1 ist ersichtlich, dass Wasser infolge seines geringen Dampfdruckes bei üblichen EWS-Temperaturen als Kältemittel ausscheiden muss, obwohl es die höchste Verdampfungsenthalpie aufweist. Unter den anderen Kältemitteln wäre Ammoniak zwar wegen seiner zweithöchsten Verdampfungsenthalpie sehr günstig. Es muss aber im Regelfall ebenfalls ausscheiden, weil es der Wassergefährdungsklasse 2 angehört und deshalb oftmals behördlich nicht genehmigt wird.

So verbleiben als beste Kältemittel für den EWS-Einsatz Propan und Kohlenstoffdioxid, wobei der Nachteil von Kohlenstoffdioxid im relativ hohen Druckniveau von 20 bar abs bis 65 bar abs bei Temperaturen von −20 °C bis +25 °C besteht. Die gesamte Installation (Rohre, Wärmetauscher, Ventile etc.) muss auf dieses Druckniveau ausgelegt werden und ist damit deutlich aufwändiger als bei Propan.

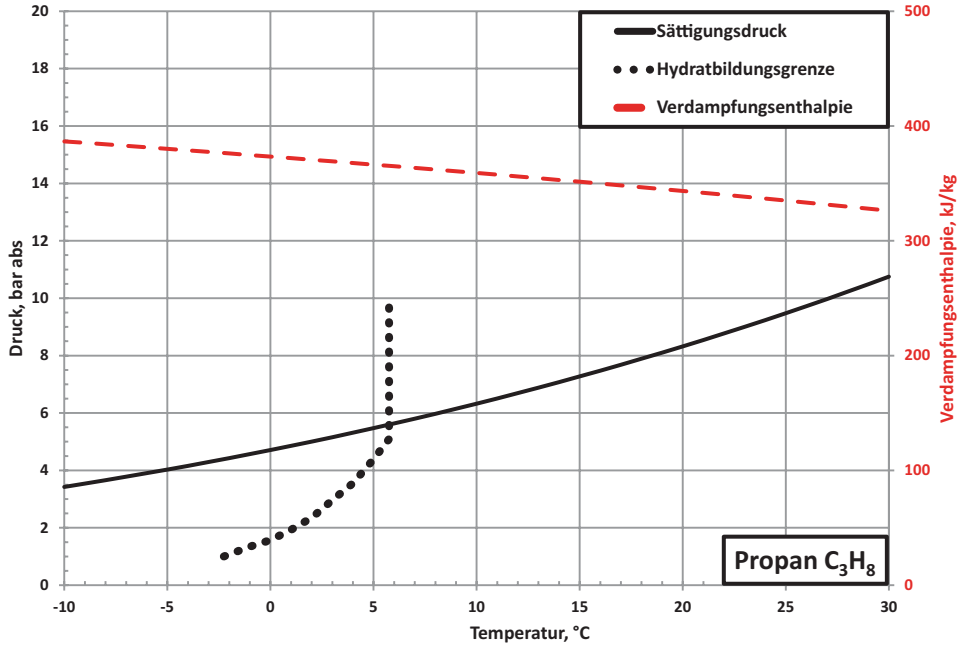


Abb. 2.5 Sättigungsdruck, Hydratbildungsgrenze und Verdampfungsenthalpie von Propan in Abhängigkeit von der Temperatur. Oberhalb der durchgezogenen Linie des Sättigungsdruckes ist keine Verdampfung möglich, oberhalb der gepunkteten Linie kann Hydratbildung eintreten. (Quelle: [1], [4], [6])

Propan und Kohlenstoffdioxid als Kältemittel in EWS

Zur Kennzeichnung des thermodynamischen Verhaltens der Gase dienen Abb. 2.5 und Abb. 2.6. Im typischen EWS-Temperaturbereich bis maximal +30 °C verdampft Propan im gesamten Temperaturintervall nur bei Drücken unterhalb 11 bar und scheidet damit von vornherein zur Verwendung in EWS tiefer als ca. 150 m aus. CO_2 verdampft in diesem Temperaturbereich bei Drücken unterhalb 71 bar, hat aber eine stark abfallende Verdampfungsenthalpie und ist deshalb auch nur bis EWS-Tiefen von maximal 300 m geeignet.

Propan, viele andere Kohlenwasserstoffgase und auch Kohlenstoffdioxid bilden bei geringen Temperaturen und hohen Drücken im Kontakt mit Wasser Eiskristalle, sogenannte Gashydrate. Die Hydratbildung führt zur Verstopfung aller Armaturen und legt den Betrieb einer Direktverdampfersonde lahm. Aus Abb. 2.5 und Abb. 2.6 ist zu erkennen, dass Direktverdampfer-EWS mit Propan und CO_2 im gesamten Arbeitsbereich durch Hydratbildung gefährdet sind, da sich für Propan erst oberhalb einer Temperatur von +6 °C und für CO_2 oberhalb +10 °C keine Hydrate mehr bilden. Deshalb muss bei Bau und Betrieb derartiger Sonden streng darauf geachtet werden, dass das Verdampferrohr vor dem Einfüllen des Kältemittels und später völlig wasserfrei ist und bleibt.

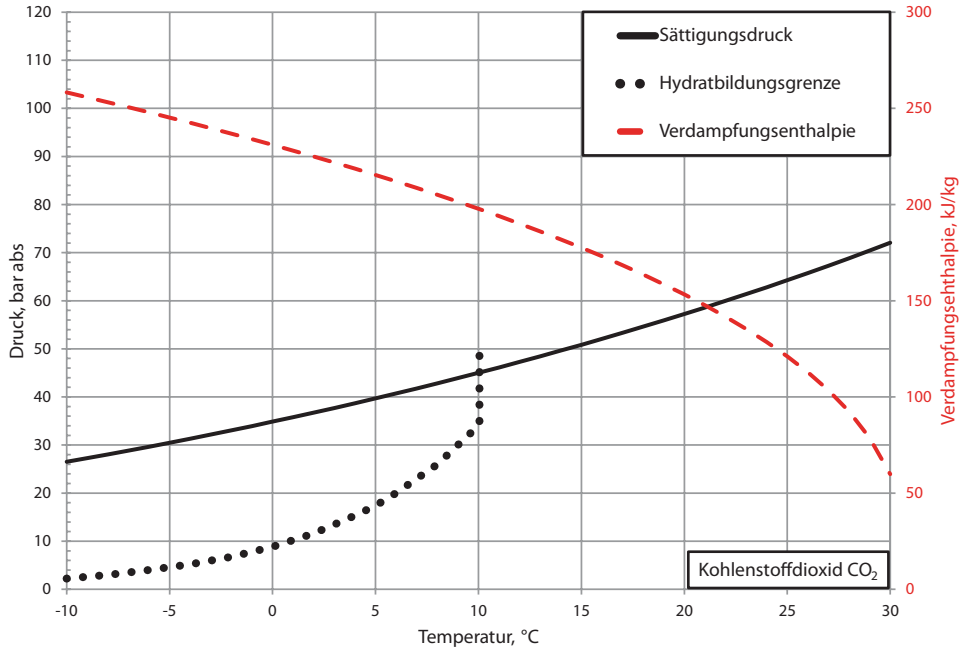


Abb. 2.6 Sättigungsdruck, Hydratbildungsgrenze und Verdampfungsenthalpie von Kohlenstoffdioxid in Abhängigkeit von der Temperatur. Oberhalb der durchgezogenen Linie des Sättigungsdruckes ist keine Verdampfung möglich, oberhalb der gepunkteten Linie kann Hydratbildung eintreten. (Quelle: [1], [4], [6])

Komplettierung von Direktverdampfersonden (Phasenwechselsonden)

Direktverdampfersonden (Phasenwechselsonden) können alleine für den Heizbetrieb relativ einfach installiert werden, für den Heiz- und Kühlbetrieb ist ein zusätzlicher Wasserkreislauf erforderlich. Abb. 2.7 zeigt den Aufbau einer Sonde im Heizbetrieb.

Die Sonde besitzt als Kernstück eine am Fuß verschweißte Verrohrung (zumeist als Stahlrohr oder Stahl-Wellrohr), die mit einer Zementsuspension mit hoher Wärmeleitfähigkeit (bis 2,4 W/(m K) Wärmeleitfähigkeit) hinterfüllt ist. Auf dem Sondenkopf sitzt ein Zweiphasenwärmetauscher, dessen Warmseite offen gegenüber der Verrohrung ist. In die Verrohrung wird nach dem Entleeren von Wasser und dem Ausblasen bzw. Ausfrieren des Restwassers Kältemittel (Propan bzw. CO_2, ca. 5–20 kg) eingefüllt. Die Rohrtour bildet mit der Warmseite des Wärmetauschers eine völlig abgeschlossene Einheit. Die Kaltseite des Wärmetauschers ist gleichzeitig der Ansaugraum des Verdichters der Wärmepumpe.

Im Ruhezustand verdampft das flüssig eingebrachte Kältemittel durch die aus dem Erdreich zuströmende Wärme und es stellt sich der Sättigungsdruck je nach dem Mittelwert der geothermischen Temperaturverteilung ein. In einer Propansonde mit einer mittleren geothermischen Temperatur von 12 °C stellt sich z. B. ein Druck von ca. 6,7 bar abs ein (s. Abb. 2.5). Sobald die Wärmepumpe in Betrieb geht, kühlt sich die Kaltseite des Kopfwärmetauschers ab (z. B. auf −2 °C) und das auf der Warmseite des Wärmetauschers befindliche Kältemittel

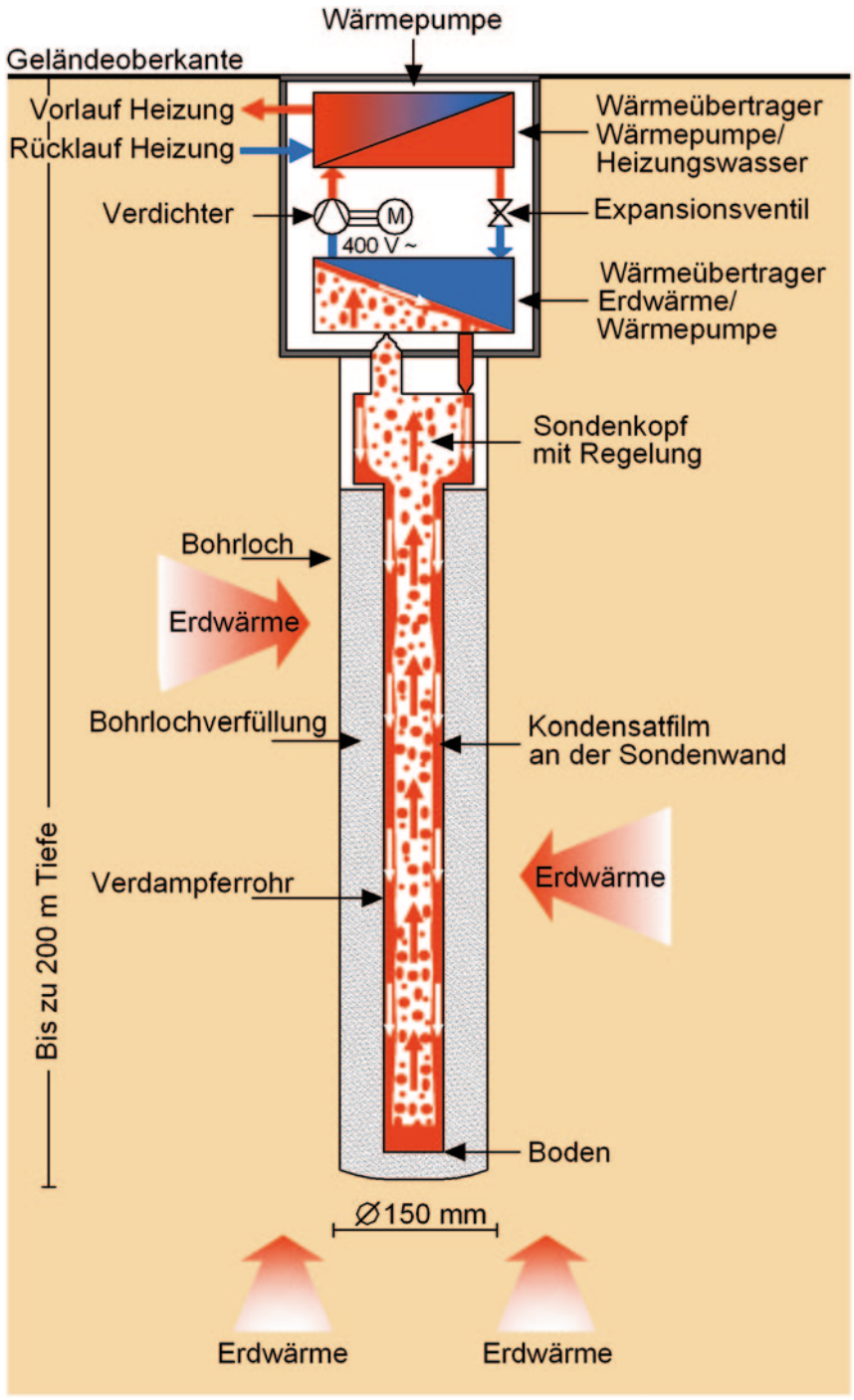


Abb. 2.7 Typischer Aufbau einer Direktverdampfersonde für den Heizbetrieb

http://www.springer.com/978-3-662-48200-1

Bau und Berechnung von Erdwärmeanlagen
Einführung mit praktischen Beispielen
Haefner, F.; Wagner, R.M.; Meusel, L.
2015, XIV, 183 S. 70 Abb., 60 Abb. in Farbe., Hardcover
ISBN: 978-3-662-48200-1