

Roland Koenigsdorff

# Oberflächennahe Geothermie für Gebäude

Grundlagen und Anwendungen  
zukunftsfähiger Heizung und Kühlung

Roland Koenigsdorff

**Oberflächennahe Geothermie für Gebäude**  
**Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger**  
**Heizung und Kühlung**



Roland Koenigsdorff

# **Oberflächennahe Geothermie für Gebäude**

**Grundlagen und Anwendungen  
zukunftsfähiger Heizung und Kühlung**

Fraunhofer IRB Verlag

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-8271-1 ISBN (E-Book) 978-3-7388-0810-0

Herstellung: Dietmar Zimmermann  
Layout: Dietmar Zimmermann  
Umschlaggestaltung: Martin Kjer  
Satz: Fotosatz Buck, Kumhausen/Hachelstuhl  
Druck: fgb freiburger graphische betriebe, Freiburg

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

### Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2011  
Fraunhofer-Informationszentrum  
Raum und Bau IRB  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon (0711) 9 70-25 00  
Telefax (0711) 9 70-25 08  
E-Mail: [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)  
<http://www.baufachinformation.de>

## Vorwort

Der Übergang von der heutigen, überwiegend auf fossilen Energieträgern basierenden Energieversorgung zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft gehört zu den wichtigsten Herausforderungen der Gegenwart und der Zukunft. Ein unverzichtbares, zentrales Element dieses Übergangs ist der zügige und umfassende Ausbau der Gewinnung und der effizienten Nutzung erneuerbarer Energien.

Die Geothermie gehört hierbei zu denjenigen erneuerbaren Energiequellen, die grundsätzlich unabhängig von Tages- und Jahreszeit oder Klimabedingungen immer zur Verfügung stehen. Der Schwerpunkt des vorliegenden Buches liegt auf den Hauptanwendungen der oberflächennahen Geothermie, der Heizung und der Kühlung von Gebäuden.

In Bauprojekten, Forschungsvorhaben sowie bei der Betriebsbegleitung und -optimierung von Gebäuden, die oberflächennahe Geothermie nutzen, ist eine meiner wesentlichen Erfahrungen stets, dass der fach- und gewerkübergreifende Blick auf das Gesamtsystem eine entscheidende Voraussetzung für den technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Erfolg ist. Auch die Arbeit und der Austausch in der Hochschullehre, der Weiterbildung, in Richtlinienausschüssen sowie mit Planenden, Ausführenden, Bauherren, Nutzern und Gutachtern zeigt mir den nach wie vor hohen Informations- und Diskussionsbedarf hierzu.

Dieses Buch soll denjenigen, die sich mit der Planung, Ausführung und dem Betrieb oberflächennaher Geothermieanlagen und der damit versorgten Gebäude befassen, aber auch allen anderen technisch Interessierten fundierte Informationen und Hilfestellung geben. Das Kernanliegen ist, eine ganzheitliche Sicht auf Gebäudeenergiesysteme mit oberflächennaher Geothermie zu ermöglichen. Durch die Zusammenfassungen wichtiger physikalischer und technischer Grundlagen zu den einzelnen Themen kann das Buch auch als Lehrbuch dienen.

Allen Firmen, Bauherren, Betreibern, Behörden, Verbänden und Privatpersonen, die mir Informationen sowie Bildmaterial zur Verfügung gestellt haben, möchte ich für die umfangreiche und großzügige Unterstützung danken. Allen im Kollegium der Hochschule Biberach sowie an anderen Hochschulen (vor allem Simone Walker-Hertkorn und Werner Schenk), die sich Zeit für meine Fragen genommen haben, danke ich für die vielen wertvollen Diskussionen, Informationen und Impulse, ebenso meinen Gesprächspartnern in Behörden und Ministerien (insbesondere Eva de Haas und Sven Rumohr) sowie den Mitgliedern des VDI-Richtlinienausschusses VDI 4640 unter dem Vorsitz von Manfred Reuß.

Weiterhin danke ich den privaten und öffentlichen Geldgebern, Förderern und Projektpartnern der Forschungsvorhaben, deren Ergebnisse zum Inhalt dieses Buches beigetragen haben. Wesentlichen Anteil an den Ergebnissen dieser am Institut für Gebäude- und Energiesysteme der Hochschule Biberach durchgeführten Projekte haben die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter Philipp Feuerstein,

Stephan Heinrich, Stefan Hudjetz, Andreas Köhler, Meinhard Ryba, Martina Sedlak und Tobias Stuhlenmiller. Ebenso leisteten viele Studierende der Hochschule mit Ihren Projekt- und Abschlussarbeiten wichtige Beiträge. Herzlichen Dank!

Den Verantwortlichen sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im Fraunhofer IRB Verlag danke ich für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Otto Embacher herzlichen Dank für das Gegenlesen wesentlicher Teile des Manuskripts und die wichtige Diskussion hierzu.

Ein ganz besonderes Dankeschön und Kompliment meinem Sohn Simon für die unermüdliche und wertvolle Arbeit bei der Erstellung von Tabellen und Grafiken sowie als Erstkorrektor des gesamten Textes.

Text, Zeichnungen und Berechnungen in diesem Buch wurden mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt. Dennoch können Fehler nie gänzlich ausgeschlossen werden. Auch haben die Schemata und Berechnungen Beispielcharakter und befinden sich Produkte, Verfahren und technische Regeln z. T. im Wandel. Für die Richtigkeit und Anwendbarkeit im konkreten Anwendungsfall kann daher keine Gewähr übernommen werden. Für Hinweise und Anregungen bin ich jedoch stets dankbar.

Roland Koenigsdorff

Biberach a.d. Riß, März 2011

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>2 Grundlagen der geothermischen Energienutzung</b> . . . . .	<b>16</b>
2.1 Energiehaushalt der Erde und Geothermie . . . . .	16
2.2 Thermische und hydraulische Eigenschaften des Untergrundes . . . . .	18
2.3 Tiefe Geothermie . . . . .	32
2.4 Oberflächennahe Geothermie . . . . .	35
<b>3 Wärmepumpen und Kältemaschinen</b> . . . . .	<b>37</b>
3.1 Physikalisches Funktionsprinzip . . . . .	38
3.2 Wärmepumpensysteme und Bauarten . . . . .	46
3.2.1 Kompressionswärmepumpen . . . . .	46
3.2.2 Absorptionswärmepumpen . . . . .	50
3.2.3 Weitere Typen von Wärmepumpen . . . . .	51
3.3 Bezeichnung, Kenngrößen und Einsatzbereiche von Wärmepumpen . . . . .	52
3.3.1 Bezeichnung von Wärmepumpen . . . . .	52
3.3.2 Energetische Kenngrößen . . . . .	53
3.3.3 Einsatzbereiche und -grenzen . . . . .	58
<b>4 Oberflächennahe geothermische Quellensysteme</b> . . . . .	<b>62</b>
4.1 Genehmigungsfragen . . . . .	63
4.2 Brunnenanlagen . . . . .	66
4.2.1 Systembeschreibung und Funktionsweise . . . . .	66
4.2.2 Planung und Bemessung . . . . .	70
4.2.3 Ausführung und Inbetriebnahme . . . . .	74
4.2.4 Betrieb . . . . .	77
4.3 Erdwärmesonden . . . . .	78
4.3.1 Systembeschreibung und Funktionsweise . . . . .	78

4.3.2	Planung und Bemessung . . . . .	82
4.3.3	Ausführung und Inbetriebnahme . . . . .	102
4.3.4	Thermal Response Test (TRT) . . . . .	108
4.3.5	Betrieb . . . . .	110
4.4	Erdwärmekollektoren . . . . .	111
4.4.1	Systembeschreibung und Funktionsweise . . . . .	111
4.4.2	Planung und Bemessung . . . . .	113
4.4.3	Ausführung, Inbetriebnahme und Betrieb . . . . .	123
4.5	Energiepfähle und sonstige erdberührte Bauteile . . . . .	127
4.5.1	Systembeschreibung und Funktionsweise . . . . .	127
4.5.2	Planung und Bemessung . . . . .	129
4.5.3	Ausführung, Inbetriebnahme und Betrieb . . . . .	131
4.6	Luft-Erdwärmetauscher . . . . .	132
4.6.1	Systembeschreibung und Funktionsweise . . . . .	132
4.6.2	Planung und Bemessung . . . . .	137
4.6.3	Ausführung, Inbetriebnahme und Betrieb . . . . .	144
4.6.4	Alternative Systeme zur geothermischen Luft-Vorkonditionierung . . . . .	147
4.7	Sondersysteme . . . . .	148
<b>5</b>	<b>Gebäude- und Systemtechnik für die Nutzung oberflächennaher Geothermie . . . . .</b>	<b>152</b>
5.1	Aspekte der Systemplanung . . . . .	152
5.2	Betriebsweisen von Wärmepumpen . . . . .	155
5.3	Geothermie- und wärmepumpengerechte Wärme- und Kälteverbraucher . . . . .	158
5.3.1	Raumheiz- und -kühlflächen . . . . .	158
5.3.2	Raumlufttechnische Anlagen . . . . .	167
5.3.3	Trinkwassererwärmung . . . . .	168
5.4	Systemtechnik . . . . .	174
5.4.1	Wärmepumpenheizung . . . . .	174

5.4.2	Direkte geothermische Kühlung und integrierte Wärme- und Kältenutzung . . . . .	180
5.4.3	Einbindung thermischer Solaranlagen . . . . .	183
5.4.4	Einsatz in Bestandsgebäuden . . . . .	185
5.5	Betrieb, Regelung und Automatisierung, Überwachung und Monitoring .	188
<b>6</b>	<b>Berechnungs- und Simulationsverfahren für Erdwärmesonden . . . . .</b>	<b>197</b>
6.1	Numerische Simulation geothermischer Quellsysteme . . . . .	197
6.2	Simulation auf Basis analytischer Lösungen («g-functions») . . . . .	201
6.3	Handrechenverfahren und Software GEO-HAND <sup>light</sup> . . . . .	209
6.4	Auslegung von Erdwärmesonden mit GEO-HAND <sup>light</sup> . . . . .	220
6.4.1	Ermittlung der Basisdaten: geothermisches Lastprofil eines Einfamilienhauses . . . . .	220
6.4.2	Auslegung einer Einzelsonde für reinen Heizbetrieb (Basisfall) . . . . .	222
6.4.3	Sensitivitätsanalyse: Einfluss verschiedener Randbedingungen . . . . .	224
6.4.4	Sondenauslegung auf verschiedene Temperaturgrenzen und Frostfreiheit	227
6.4.5	Gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden: Sondenfeld . . . . .	228
6.4.6	Sommerliche Regeneration und direkte geothermische Kühlung . . . . .	231
6.4.7	Bivalenter Anlagenbetrieb . . . . .	237
6.4.8	Sonden mit geringem Bohrlochwiderstand . . . . .	238
6.4.9	Berechnungen mit EED und Vergleich mit GEO-HAND <sup>light</sup> . . . . .	240
6.5	Berechnung und Simulation von Gesamtsystemen . . . . .	242
<b>7</b>	<b>Projektbeispiele . . . . .</b>	<b>246</b>
7.1	Gebhard-Müller-Schule in Biberach a. d. Riß . . . . .	246
7.2	Bürogebäude der Drees & Sommer-Gruppe in Stuttgart-Vaihingen . . . . .	253
7.3	EnBW Zentrum Oberschwaben in Biberach a. d. Riß . . . . .	258
7.4	Wohnhaus mit Erdwärmesonden in Untersiggenthal (CH) . . . . .	261
7.5	Gebäude mit Erdwärmekörpern in Bad Schussenried . . . . .	265
7.6	Passivhausschule Günzburg . . . . .	268

7.7	Power Tower in Linz. . . . .	271
7.8	Jordanbad in Biberach a.d. Riß. . . . .	273
<b>8</b>	<b>Ökonomische und ökologische Bewertung . . . . .</b>	<b>276</b>
8.1	Energieeffizienz oberflächennaher Geothermie- und Wärmepumpenanlagen . . . . .	276
8.2	Wirtschaftlichkeit der Nutzung oberflächennaher Geothermie . . . . .	281
8.3	Ökologische Aspekte von Wärmepumpen und Anlagen zur Nutzung oberflächennaher Geothermie . . . . .	293
8.3.1	Grundwasser und Untergrund. . . . .	294
8.3.2	Luftschadstoffe und Treibhausgase. . . . .	298
8.3.3	Primärenergie und Exergie . . . . .	302
8.4	Zusammenfassende Bewertung und Empfehlungen . . . . .	308
	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis. . . . .</b>	<b>313</b>
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>327</b>

# 1 Einleitung

Der nachhaltige Umgang mit Energiequellen und Wasser gehört zu den wichtigsten globalen Herausforderungen, denen sich der Mensch heute und in Zukunft stellen muss. Der Begriff der nachhaltigen Entwicklung (»sustainable development«) bezieht sich gleichermaßen auf die Bereiche Soziales, Umwelt und Wirtschaft [Brundtland, 1987]. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung ist mit vorhandenen Ressourcen so umzugehen, dass sie für die heutige Menschheit und für künftige Generationen dauerhaft nutzbar bleiben, alle Menschen in gerechter sowie sozial verträglicher Weise an der Nutzung partizipieren können und die Umwelt dabei nicht irreversibel geschädigt wird.

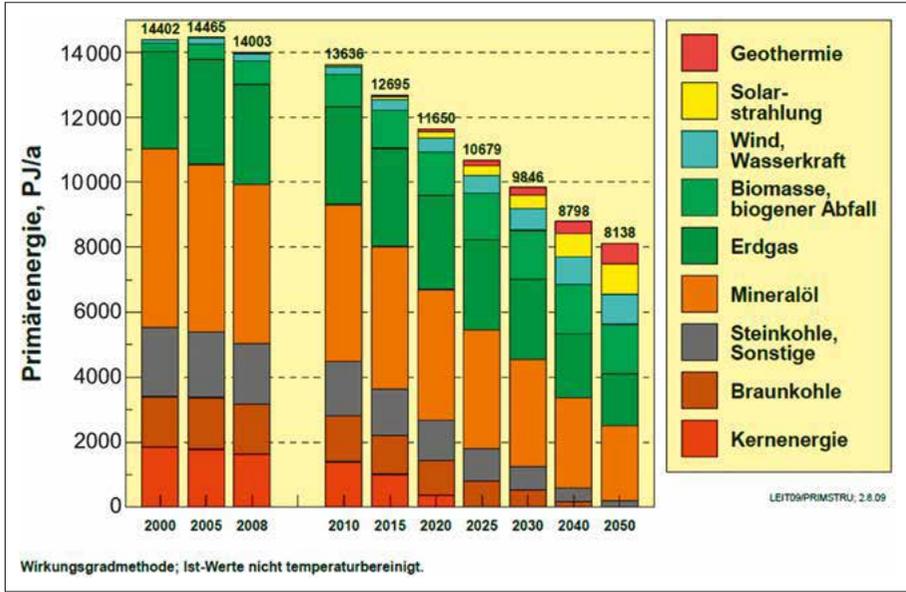
Die heutige Energieversorgung beruht zum Großteil auf den fossilen Energieträgern Kohle, Öl und Gas, die nur begrenzt verfügbar sind. Weiterhin entsteht bei ihrer Nutzung durch Verbrennung das Treibhausgas Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und gelangt in die Erdatmosphäre. Dadurch ist die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre von 280 ppm vor der Industrialisierung auf heute 385 ppm angestiegen, also bereits um über 35%. Hinzu kommen weitere vom Menschen verursachte Emissionen einer ganzen Reihe anderer Treibhausgase, wie z. B. Methan und Distickstoffoxid (Lachgas). Gleichzeitig erleben wir derzeit eine unnatürlich rasche globale Erwärmung der erdnahen Atmosphäre. Es herrscht wissenschaftlicher Konsens, dass dieser Klimawandel aller Wahrscheinlichkeit nach in erster Linie eine Folge des vom Menschen verursachten Anstiegs der Treibhausgase ist.

Um die negativen Folgen dieser Klimaerwärmung auf ein vertretbares Maß zu beschränken, darf der Temperaturanstieg gegenüber vorindustrieller Zeit höchstens 2 Grad Celsius betragen. Dies bedeutet, dass die weltweiten jährlichen anthropogenen Treibhausgasemissionen bis 2050 mehr als halbiert werden müssen. Hierbei ist die Entwicklung der Weltbevölkerung zu berücksichtigen, ebenso wie die langfristige erforderliche weltweit gerechte Verteilung der  $\text{CO}_2$ -Emission pro Kopf. In der Konsequenz sind Industrieländer wie Deutschland deshalb aufgefordert, bis im Jahre 2050 jährlich 80 bis 90% weniger  $\text{CO}_2$  zu emittieren als 1990 [BUND, 2009, S. 136–139].

Dies kann nur mit einer Abkehr von der überwiegend fossilen Energieversorgung zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft gelingen. Den erneuerbaren Energien kommt dabei eine zentrale Rolle zu. Einen möglichen Pfad zu diesem Ziel zeigen die im Auftrag des Bundesumweltministeriums (BMU) erarbeiteten »Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland«. Im ersten Zwischenbericht hierzu wurde das »Leitszenario 2009« erstellt, das eine Senkung des energiebedingten  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes auf etwa 20% des Wertes von 1990 beinhaltet [Nitsch, 2009].

In Bild 1 ist die Entwicklung und Zusammensetzung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland für dieses Leitszenario dargestellt. Angestrebt wird, bis 2050 den Primärenergieverbrauch um über 40% zu senken und knapp die Hälfte des verblei-

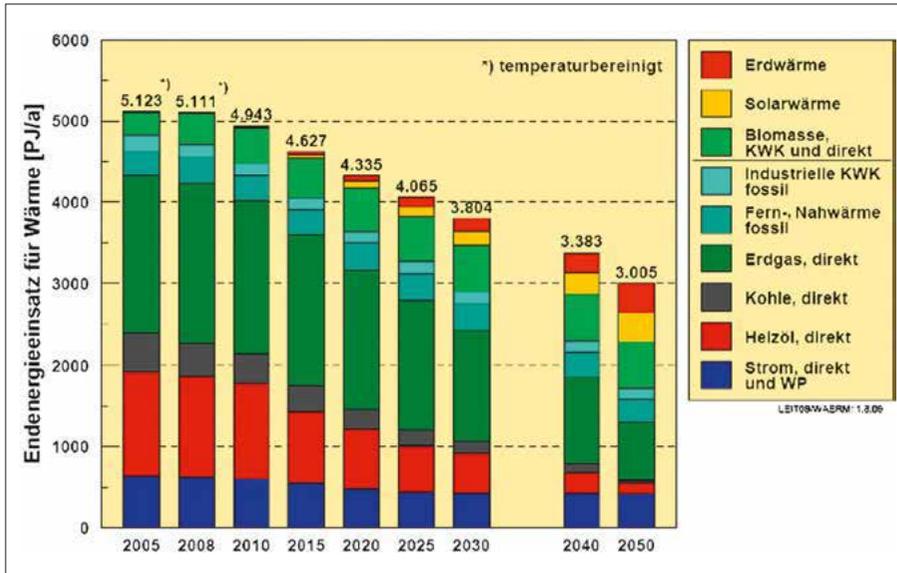
benden Rests durch einen Mix aus erneuerbaren Energien zu decken. Die Nutzung der Erdwärme (Geothermie) hat in diesem Szenario einen zunächst geringen, längerfristig aber deutlich steigenden Anteil.



**Bild 1:** Entwicklung des Primärenergieverbrauchs Deutschlands im Leitszenario 2009 des Bundesumweltministeriums. [Nitsch, 2009]

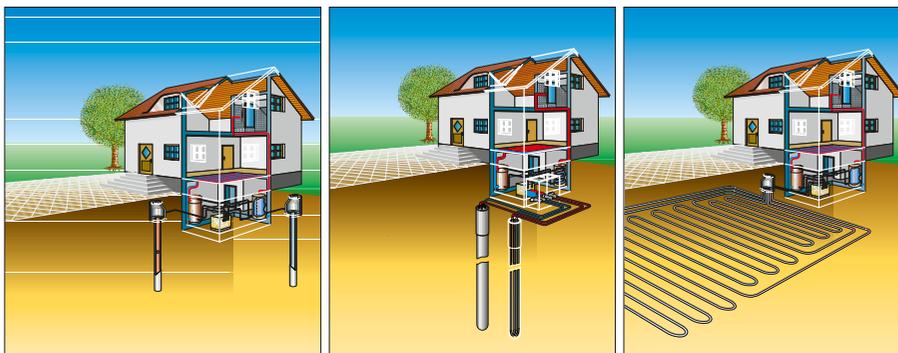
Die Entwicklung des Sektors Wärmebereitstellung innerhalb des Leitszenarios zeigt Bild 2. Der Anteil der Geothermie tritt in der Grafik an zwei Stellen zutage, nämlich beim steigenden Anteil der gewonnenen Erdwärme und beim nur mäßig zurückgehenden Stromeinsatz für die Wärmebereitstellung, der u. a. für den Betrieb von Wärmepumpen (WP) erforderlich ist. Im Konzert der erneuerbaren Wärmelieferanten Biomasse, Solarstrahlung und Geothermie wird der Erdwärme im Laufe der Zeit eine ebenso wichtige Rolle zugemessen wie den beiden anderen erneuerbaren Energiequellen.

Erdwärme kann, wenn sie bei entsprechend hoher Temperatur vorliegt, direkt für die Wärmebereitstellung genutzt werden. Zur Erschließung des dafür erforderlichen Temperaturbereichs werden in den allermeisten Fällen Bohrungen von großer Tiefe benötigt (tiefe Geothermie). Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, das oberflächennahe Erdreich und dessen moderate Temperatur zur Wärme- und auch zur Kältebereitstellung zu nutzen. Die Nutzung dieser oberflächennahen Geothermie, insbesondere für Gebäude, ist Gegenstand dieses Buches.



**Bild 2:** Entwicklung des Energieeinsatzes zur Wärmebereitstellung in Deutschland im Leit-szenario 2009 des Bundesumweltministeriums (Abkürzungen: KWK = Kraft-Wärme-Kopplung, WP = Wärmepumpen). [Nitsch, 2009]

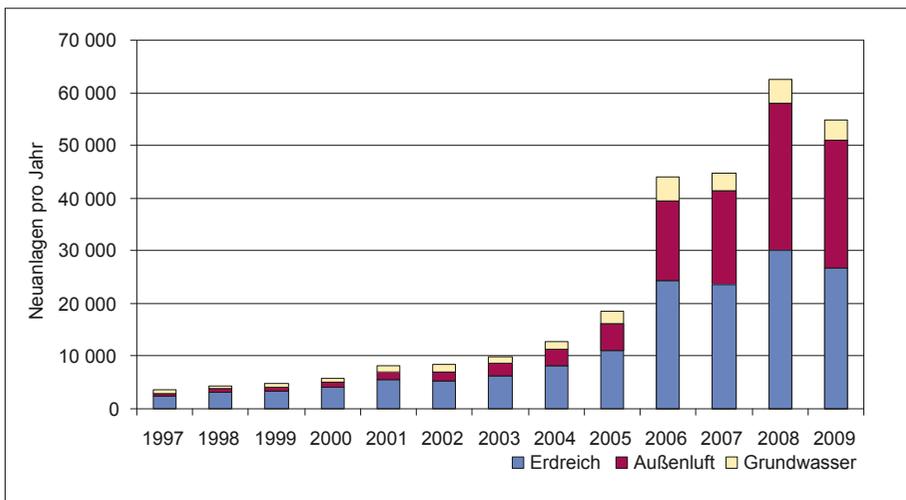
Die in geringer Tiefe unter der Erdoberfläche angetroffenen Temperaturen sind im Regelfall so niedrig, dass sie mithilfe von Wärmepumpen auf das benötigte Temperaturniveau angehoben werden müssen. Zur Gewinnung der oberflächennahen Erdwärme für solche erdgekoppelten Wärmepumpen ist eine ganze Reihe unterschiedlicher Anlagensysteme am Markt verfügbar. Die drei wichtigsten Typen – Grundwasserbrunnen, Erdwärmesonden und Erdwärmekollektor – sind in Bild 3 skizziert.



**Bild 3:** Standardsysteme zur Nutzung oberflächennaher geothermischer Energie für Wärmepumpen; von links nach rechts: Grundwasserbrunnen, Erdwärmesonden, Erdwärmekollektor. [Quelle: Bundesverband Wärmepumpe e. V.]

Einen ersten Boom erlebten Wärmepumpen in Deutschland nach der zweiten Ölpreiskrise ab dem Ende der 70er Jahre. Mit dem damaligen schlagartigen Marktwachstum waren mitunter auch entsprechende »Kinderkrankheiten« technischer und planerischer Art verbunden. Dies und der Ölpreisverfall Anfang der 80er Jahre ließen den Wärmepumpenmarkt massiv einbrechen [Baumann 2010; Reichelt, 2008]. Mit inzwischen langjähriger Erfahrung und ausgereiften Produkten entwickelte sich der Markt seit etwa 2000 zunächst langsam und dann zunehmend dynamisch wieder aufwärts. Die stark wachsende Bedeutung der oberflächennahen Geothermie in Verbindung mit elektrisch angetriebenen Heizungswärmepumpen zeigen die Absatzzahlen in Bild 4, die seit einem sprunghaften Anstieg 2006 zwischen ca. 40 000 und ca. 60 000 Neuanlagen pro Jahr liegen. Neben den erdgekoppelten Wärmepumpen (Wärmequellen Erdreich und Grundwasser) sind in Bild 4 auch die mit Außenluft als Wärmequelle arbeitenden Anlagen aufgeführt. Nicht in dieser Statistik enthalten sind u. a. Luft-Luft-Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung in Lüftungsanlagen, Wärmepumpen zur Trinkwassererwärmung mit Wärmeentzug aus dem Aufstellungsraum, wie z. B. dem Heizkeller, sowie gasbetriebene Wärmepumpen.

Um einen möglichst großen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung zu leisten, müssen oberflächennahe Geothermieanlagen und die daran angeschlossenen Wärmepumpen energieeffizient, umweltschonend sowie in Anschaffung und Betrieb wirtschaftlich vertretbar sein. In welchem Maß die Energieressourcen durch ihren Einsatz geschont werden, hängt von der nicht unerheblichen Höhe des Energieverbrauchs der Wärmepumpen selbst sowie der benötigten Hilfsaggregate ab (vgl. Stromeinsatz zur Wärmebereitstellung in Bild 2). Bei der Erstellung und dem Betrieb von Geothermieanlagen ist insbesondere der erforderliche Schutz des Grundwassers



**Bild 4:** Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen mit den Wärmequellen Geothermie (Erdreich, Grundwasser) und Außenluft. [Quelle: Zahlen laut Bundesverband Wärmepumpe e. V.]

sowie des Untergrundes und der darauf gegründeten Bauwerke unbedingt sicherzustellen.

Fachlich ist die Erdwärmenutzung, vor allem die oberflächennahe Geothermie in Gebäuden, ein interdisziplinäres Thema, bei dem Fragen der Geologie und Hydrogeologie sowie der Energie- und Gebäudetechnik gleichermaßen wichtig sind. Über fachspezifische Fragen hinaus ist daher das korrekte interdisziplinäre Zusammenspiel, also die Qualität des Gesamtsystems, für den Erfolg oberflächennaher Geothermieanlagen entscheidend. Neben den behandelten Einzelthemen ist es deshalb ein Hauptziel der folgenden Kapitel, Einblicke in wichtige Systemzusammenhänge zu schaffen.

Zunächst werden in Kapitel 2 einige Grundlagen der geothermischen Energienutzung erläutert. In Kapitel 3 folgt eine Einführung in Wärmepumpen und Kältemaschinen.

Die verschiedenen oberflächennahen geothermischen Quellensysteme werden in Kapitel 4 behandelt, gefolgt von wichtigen Elementen der zugehörigen Gebäude- und Systemtechnik in Kapitel 5. Berechnungsverfahren und Simulationswerkzeuge für Erdwärmesonden werden in Kapitel 6 vorgestellt. Kapitel 7 enthält die Darstellung einiger Projektbeispiele.

Abschließend wird in Kapitel 8 auf ökonomische und ökologische Aspekte oberflächennaher Geothermieanlagen eingegangen.

Wichtige physikalische und technische Grundlagen sind in den Kapiteln jeweils in einem Kasten zusammengefasst.

## 2 Grundlagen der geothermischen Energienutzung

### 2.1 Energiehaushalt der Erde und Geothermie

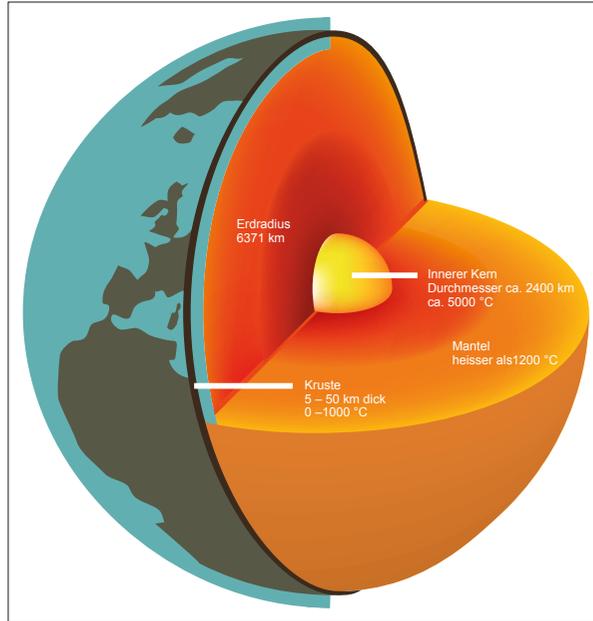
Der Begriff Geothermie stammt aus dem Griechischen und bedeutet »Wärme aus der Erde« bzw. »Erdwärme« [BMU, 2007]. Gemeint ist damit zunächst die gesamte unter der Erdoberfläche gespeicherte thermische Energie, im engeren Sinne jedoch lediglich der zugängliche und technisch nutzbare Anteil.

Die Erde besitzt einen mittleren Radius von ca. 6370 km und besteht nach Erkenntnissen, die aus seismischen Messungen gewonnen wurden, aus mehreren Schalen (siehe Bild 5). Die äußere, feste Schale, die Erdkruste, ist unter den Kontinenten im Mittel ca. 40 km dick, unter den Ozeanen dagegen dünner. Unter der Erdkruste befindet sich der ebenfalls feste, jedoch fließfähige Erdmantel, der bis in eine Tiefe von knapp 3000 km reicht. Er wird in den oberen Mantel, eine Übergangszone sowie den unteren Mantel unterteilt. Der Erdkern besteht aus dem äußeren, flüssigen Kern von ca. 2200 km Dicke und dem inneren Kern mit einem Radius von ca. 1200 km (2400 km Durchmesser), welcher wegen des hohen Drucks fest ist [Kaltschmitt, 2003; Stober & Lorinser, 2007].

Die Temperatur des Erdkörpers nimmt von der Oberfläche zum Zentrum hin zu. An der Oberfläche liegt die weltweite mittlere Temperatur (bodennahe Lufttemperatur) derzeit bei ca. 14,5 °C. Die Temperaturzunahme mit der Tiefe, der sogenannte geothermische Temperaturgradient, beträgt unterhalb der Erdoberfläche durchschnittlich zunächst ca. 30 °C/km (3 K pro 100 m). Im Erdmantel steigt die Temperatur von ca. 1000 °C auf ca. 3000 °C an. Dieser Temperaturanstieg setzt sich im Erdkern fort, sodass im inneren Erdkern vermutlich Temperaturen um die 5000 °C herrschen. Damit sind 99% des Volumens der Erde heißer als 1000 °C und nur 0,1% kühler als 100 °C. Ein Teil des damit verbundenen Wärmeinhalts der Erde stammt aus der Gravitationsenergie und der Ursprungswärme bei der Entstehung der Erde, ein anderer Teil wird beim Zerfall radioaktiver Isotope in der Erdkruste kontinuierlich gebildet [Kaltschmitt, 2003; Stober & Lorinser, 2007].

Aufgrund des Temperaturgefälles in der Erde strömt ständig ein Wärmestrom, im Folgenden geothermischer Wärmestrom genannt, von innen nach außen. An der Erdoberfläche tritt der geothermische Wärmestrom mit der sogenannten terrestrischen oder geothermischen Wärmestromdichte von i. d. R. zwischen 0,03 bis 0,2 W/m<sup>2</sup> zutage, im weltweiten Mittel beträgt er ca. 0,065 W/m<sup>2</sup> [Sanner, 2004]. An diesem Wärmestrom haben die erwähnten radioaktiven Zerfallsprozesse einen Anteil von ca. 70 %, der Rest stammt aus der im Erdmantel und Erdkern gespeicherten Wärme. Die Wärmeabstrahlung der Erde in den Weltraum ist damit geringfügig – nämlich um den geothermischen Wärmestrom – größer als die von der Sonne aufgenommene Wärmeleistung.

Über die gesamte Erdoberfläche liefert der geothermische Wärmestrom eine jährliche Energiemenge von ca.  $2,9 \cdot 10^{14}$  kWh/a. Dies entspricht dem 2,2fachen Weltprimär-



**Bild 5:**  
Aufbau der Erde.  
[Quelle: Geopower AG]

energieverbrauch des Jahres 2007 von über  $1,3 \cdot 10^{14}$  kWh/a [Quaschnig, 2009]. Dem steht eine auf die Erdoberfläche auftreffende Sonneneinstrahlung von im Mittel knapp  $180 \text{ W/m}^2$  gegenüber (siehe Bild 6), was pro Jahr etwa das 6200fache des Weltprimärenergieverbrauchs 2007 ergibt. Betrachtet man die Bundesrepublik Deutschland, dann beträgt die aus ihrer Oberfläche jährlich austretende geothermische Wärmemenge ca. 5% des Primärenergieverbrauchs Deutschlands im Jahre 2008. Die pro Jahr auf Deutschland einfallende Solarstrahlung liefert etwa das 88fache dieses Verbrauchs. Darüber hinaus ist die Energie des geothermischen Wärmestroms an der Erdoberfläche nur zu einem geringeren Anteil praktisch nutzbar als die eingestrahlte Sonnenenergie. Der Grund hierfür ist das – von lokalen Ausnahmen abgesehen – niedrige Temperaturniveau der Erdoberfläche von im Mittel ca.  $14,5 \text{ °C}$ . Aus physikalischen Gründen ist Wärme jedoch umso wertvoller, je höher die Temperatur ist, bei der sie vorliegt (2. Hauptsatz der Thermodynamik, Erläuterungen dazu siehe Kasten 2 in Kapitel 3.1).

Betrachtet man ausschließlich den im natürlichen Gleichgewicht vorliegenden geothermischen Wärmestrom, erscheint das Potenzial der Energiequelle Geothermie bei dieser Betrachtung sowohl im Umfang als auch in der Qualität (Temperatur, Energiedichte) als sehr gering. Dabei lässt man allerdings die enorme im Untergrund gespeicherte Wärmemenge außer Acht: Würde man die gesamte Erde um nur  $1/100 \text{ °C}$  abkühlen, betrüge die freigesetzte Wärmeenergie knapp das 130 000fache des Weltprimärenergieverbrauchs des Jahres 2007. Bei Abkühlung der äußeren 10 km der



**Bild 6:**  
Wärmebilanz der Erde.  
[Quelle des Fotos: NASA]

Erdkruste um denselben Betrag wäre dies immer noch etwa das 600fache. Aus den oberen 10 km Erdkruste unter Deutschland ließe sich mit ebenfalls  $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$  Abkühlung eine Wärmemenge von nahezu dem 14fachen des Primärenergieverbrauchs 2008 des Landes gewinnen. Auch existieren weltweit viele Gebiete, in denen aufgrund sogenannter positiver Anomalien mit hohen Temperaturen besonders günstige Voraussetzungen für eine technische Nutzung der Erdwärme nahe der Erdoberfläche vorliegen. Vulkanismus und heiße Quellen sind sichtbare Belege dafür, dass Temperaturen, Wärmeströme und gespeicherte Wärmemengen an manchen Stellen erhöht sind.

Darüber hinaus speist sich der Energiehaushalt des Bodens direkt unter der Erdoberfläche maßgeblich aus dem Austausch mit den Energieströmen in der bodennahen Erdatmosphäre (Temperatur, Einstrahlung, Niederschläge), die alle von der Sonne angetrieben werden. Ein Teil der direkt unter der Erdoberfläche nutzbaren Wärme ist damit letztendlich gespeicherte Sonnenenergie. Die im Folgenden dargestellten thermischen und hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes sind eine Grundlage für die nähere Betrachtung dieser Vorgänge.

## 2.2 Thermische und hydraulische Eigenschaften des Untergrundes

Die Temperaturverteilung im Untergrund ist im Wesentlichen das Resultat der dort stattfindenden Wärmeleitung (konduktiver Anteil) und des Wärmetransports durch strömende Flüssigkeiten (Konvektion) in Verbindung mit dem Wärmespeichervermögen der beteiligten Stoffe. Die Wärmeproduktion durch radioaktiven Zerfall trägt

zwar insgesamt maßgeblich zum geothermischen Wärmestrom bei, sie ist mit einer Größenordnung von  $1 \text{ mW/m}^3$  jedoch von so geringer volumetrischer Dichte, dass sie sich erst bei Betrachtung mehrerer Kilometer dicker Schichten quantitativ spürbar auswirkt [Kaltschmitt, 2003].

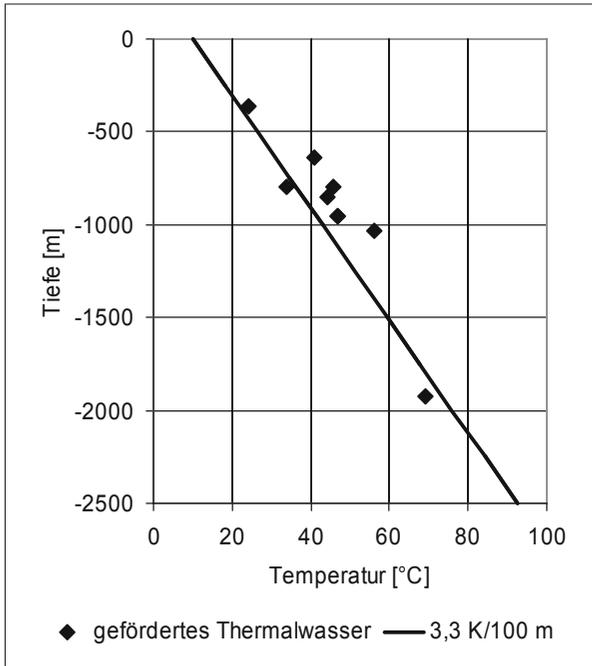
Tabelle 1 enthält beispielhafte Werte der Dichte, der Wärmeleitfähigkeit und der volumenbezogenen (volumetrischen) Wärmekapazität des Untergrundes. Die Definitionen dieser und weiterer wichtiger physikalischer Größen und Zusammenhänge finden sich in Kasten 1 (S.29–31). Mit einer angenommenen mittleren Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes von  $2,1 \text{ W/(mK)}$  und einem mittleren geothermischen Temperaturgradienten von  $30 \text{ K/km}$  lässt sich die Größe der mittleren terrestrischen Wärmestromdichte an der Erdoberfläche nachvollziehen:

$$\dot{q}_{geo} = \lambda_E \cdot \left. \frac{\Delta \vartheta}{\Delta h} \right|_{geo} = -2,1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot \frac{30 \text{ K}}{-1000 \text{ m}} = 0,063 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \approx 0,065 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \quad (1)$$

**Tabelle 1:** Beispiele thermischer Kenndaten des Untergrundes. [Quelle: VDI 4640-1:2010; VDI 4640-4:2004), Werte der Temperaturleitfähigkeit z. T. durch den Autor ergänzt]

Boden/Gestein (Index E: Erdreich)	Dichte $\rho_E$ [ $10^3 \text{ kg/m}^3$ ]	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda_E$ [W/(m·K)]	volumenbezogene Wärmekapazität ( $\rho_E \cdot c_{p,E}$ ) [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]	Temperatur- leitfähigkeit $a_E$ [m <sup>2</sup> /s]
Sand, trocken	1,16–1,7	0,3–0,8	1,3–1,6	$\approx 0,28 \cdot 10^{-6}$
Sand, wasserge- sättigt	1,6–2,2	1,7–5,0	2,2–2,9	$\approx 0,94 \cdot 10^{-6}$
Kies, trocken	1,5–1,8	0,4–0,5	1,4–1,6	$\approx 0,27 \cdot 10^{-6}$
Kies, wasserge- sättigt	ca. 2,2	ca. 1,8	ca. 2,4	$\approx 0,75 \cdot 10^{-6}$
Mergelstein	2,3–2,6	1,8–2,9	2,2–2,3	$\approx 1,0 \cdot 10^{-6}$
Kalkstein	2,4–2,7	2,0–3,9	2,1–2,4	$\approx 1,3 \cdot 10^{-6}$
Dolomitstein	2,4–2,7	3,0–5,0	2,1–2,4	$\approx 1,8 \cdot 10^{-6}$
Quarzit	2,5–2,7	5,0–6,0	2,1	$\approx 2,5 \cdot 10^{-6}$

Abhängig von der lokalen geologischen Situation weichen der oberflächennahe geothermische Temperaturgradient und die geothermische Wärmestromdichte von den mittleren Gegebenheiten ab. In den alten Kontinentalplatten (z. B. Indien) ist ein Temperaturgradient von nur ca.  $10 \text{ K/km}$  anzutreffen, in tektonisch aktiven, jungen Krustengebieten, wie z. B. in Larderello (Italien), wurden dagegen bis ca.  $200 \text{ K/km}$  gemessen [Kaltschmitt, 2003, S. 105]. In Deutschland liegen beispielsweise die im Oberrheingraben anzutreffenden Spitzenwerte bei  $100 \text{ K/km}$ , während im Mittel wiederum  $30 \text{ K/km}$  vorliegen, mit einer großräumigen Streuung von unter  $20$  bis über  $40 \text{ K/km}$ . Als Beispiel enthält Bild 7 die Temperaturen des aus verschiedenen Bohrungen zwischen Ulm und Bodensee geförderten Thermalwassers sowie den unge-



**Bild 7:** Zusammenhang zwischen Bohrtiefe und Temperatur des geförderten Thermalwassers sowie ungefährer geothermischer Temperaturgradient im Raum zwischen Ulm/Neu-Ulm und Ravensburg. [Quellen der Zahlenwerte: Geothermisches Informationssystem GeotIS ([www.geotis.de](http://www.geotis.de); Pester et al., 2007) sowie LGRB Freiburg (LGRB, 2005)]

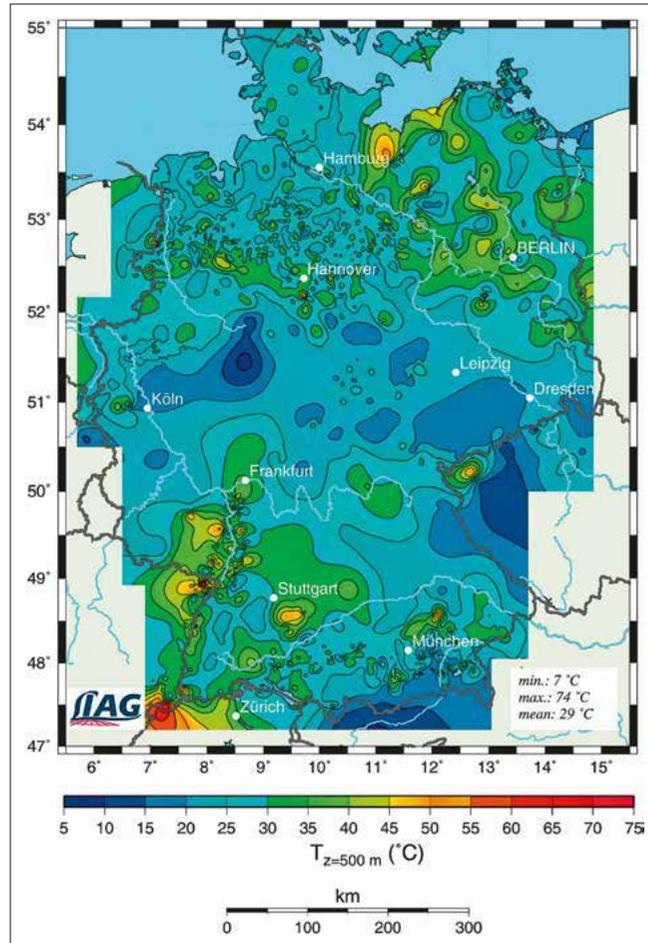
fähren geothermischen Temperaturgradienten in dieser Region, der etwas über dem Mittelwert in Deutschland liegt. Die beträchtlichen Unterschiede in der großräumigen Verteilung der Untergrundtemperatur in 500 m Tiefe unter Deutschland zeigt Bild 8.

Im Gegensatz zu den geologisch bedingten Temperaturen in der Tiefe wird das thermische Verhalten des Untergrunds direkt unter der Erdoberfläche von der angrenzenden Erdatmosphäre (Strahlung, Luft, Niederschläge), den Grundwasserhältnissen sowie lokalen Störfaktoren, wie z. B. ins Erdreich eingreifende Bauwerke und Überbauung der Erdoberfläche, bestimmt. Die Temperatur der freien Erdoberfläche kann in erster Näherung der Temperatur der Umgebungsluft gleich gesetzt werden [Dibowski, 2003, S. 12–13]. Für unbebautes Erdreich mit konstanter Temperaturleitfähigkeit und ohne konvektive Einflüsse, also ohne nennenswerte Beeinflussung durch strömendes Grund- oder Niederschlagswasser, lässt sich der eingeschwungene, tiefenabhängige Jahresgang der Erdreichtemperatur  $\vartheta_E$  mit der folgenden Gleichung berechnen [VDI 4640-4:2004]:

$$\vartheta_E(t, z) = \vartheta_m - \Delta\vartheta_{Ampl} \cdot \exp\left[-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{t_p \cdot a_E}}\right] \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{t_p} \cdot \left[t - t_0 - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{t_p}{\pi \cdot a_E}}\right]\right) \quad (2)$$

mit:

$\vartheta_m$ : Jahresmittelwert der Lufttemperatur [°C]



**Bild 8:**  
Temperaturverteilung  
in 500 m Tiefe unter  
Deutschland.  
[www.liag-hannover.de;  
Schellschmidt, 2002]

$\Delta\vartheta_{Ampl}$ : Amplitude der mittleren jährlichen Erdoberflächentemperatur bezogen auf  $\vartheta_m$  [°C] bzw. [K], Richtwerte: ca. 8 bis 10 K [Dibowski, 2000] bzw. 12 K [VDI 4640-4:2004]

$z$ : Position unterhalb der Oberfläche (Tiefe) [m]

$t_p$ : Periodendauer [h], hier: des Jahresverlaufs ( $t_p = 8760$  h)

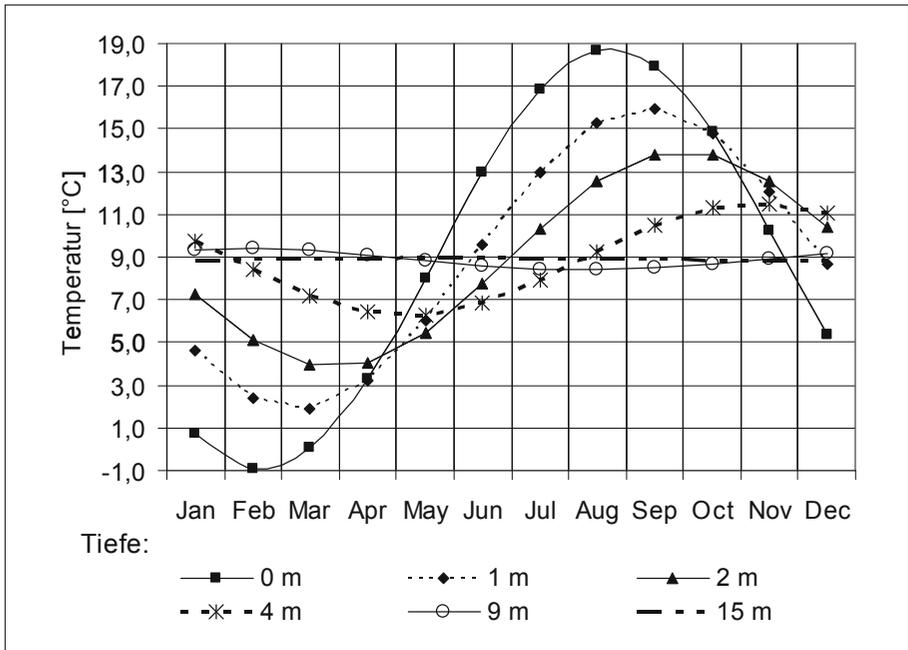
$\alpha_E$ : Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs [m<sup>2</sup>/h] (Achtung: die Temperaturleitfähigkeit ist hier auf Stunden anstatt auf Sekunden bezogen einzusetzen)

$t$ : aktueller Zeitpunkt im Jahr [h]

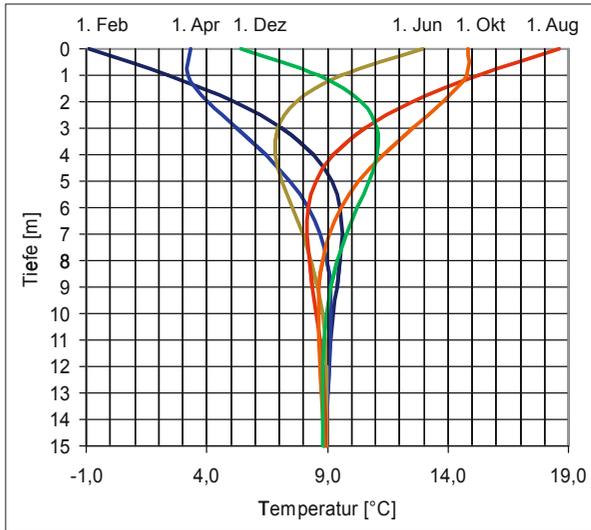
$t_0$ : Phasenkonstante [h], d. h. Zeitpunkt im Jahr, an dem die Temperatur der Erdoberfläche ihr Minimum aufweist (typischer Wert in unseren Breiten: 35 Tage,  $t_0 = 840$  h, also 4. Februar, 24 Uhr [Dibowski, 2003]).

Diese Gleichung wurde theoretisch hergeleitet und ihre Parameter an Messergebnisse angepasst. Sie beschreibt den Jahresgang der Erdreichtemperatur als harmonische Schwingung über das Jahr. Als Amplitude  $\Delta\vartheta_{Ampl}$  wird entweder die Sommer- oder die Winteramplitude angesetzt, also der Betrag der Differenz zwischen dem höchsten bzw. niedrigsten Monatsmittelwert der Lufttemperatur und dem Jahresmittelwert  $\vartheta_m$ , oder aber der Mittelwert aus Sommer- und Winteramplitude.

Die Bilder 9 und 10 zeigen zwei Darstellungen eines mit Gleichung (2) berechneten Jahresgangs. Verwendet wurden dabei die Standard-Klimadaten für Deutschland aus der Norm DIN V 18599 [DIN V 18599, 2007], die auch Grundlage für Berechnungen nach der Energieeinsparverordnung EnEV [EnEV, 2009] sind. Der Jahresmittelwert von  $8,9\text{ }^\circ\text{C}$  entstammt der DIN V 18599. Die Amplitude ist der Mittelwert aus Sommer- und Winteramplitude, gebildet aus dem Jahresmittelwert ( $8,9\text{ }^\circ\text{C}$ ) sowie der höchsten und der tiefsten Monatsmitteltemperatur (August:  $18,3\text{ }^\circ\text{C}$ , Januar:  $-1,3\text{ }^\circ\text{C}$ ). Die Ergebnisse zeigen die mit der Tiefe stark abnehmende Amplitude sowie zunehmende Phasenverschiebung der Erdreichtemperatur. Im berechneten Beispiel beträgt die jährliche Temperaturschwankung in einer Tiefe von 9 m nur noch  $\pm 0,5\text{ K}$ , wobei dort die Zeitpunkte minimaler und maximaler Temperatur, Februar und August, gegenüber der Erdoberfläche genau vertauscht sind.



**Bild 9:** Berechneter Jahresgang (Monatsmittelwerte) der Erdreichtemperatur in unterschiedlichen Tiefen (Jahresmitteltemperatur  $\vartheta_m = 8,9\text{ }^\circ\text{C}$ ; Temperaturamplitude  $\Delta\vartheta_{Ampl} = 9,8\text{ K}$ ; Temperaturleitfähigkeit  $\alpha_E = 0,92 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s} = 3,3 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2/\text{h}$ ).

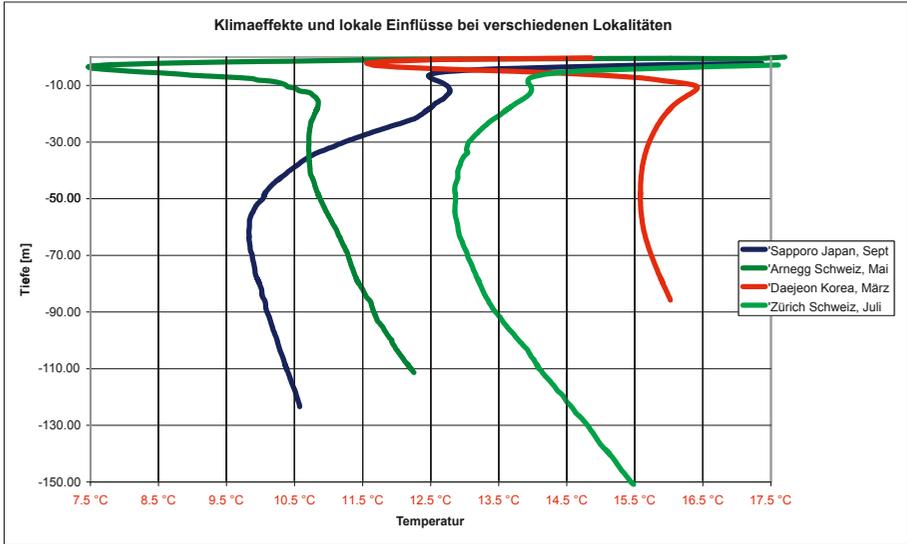


**Bild 10:** Berechnete Tiefenprofile der Erdreichtemperatur für verschiedene Monate (Parameter identisch mit Bild 9).

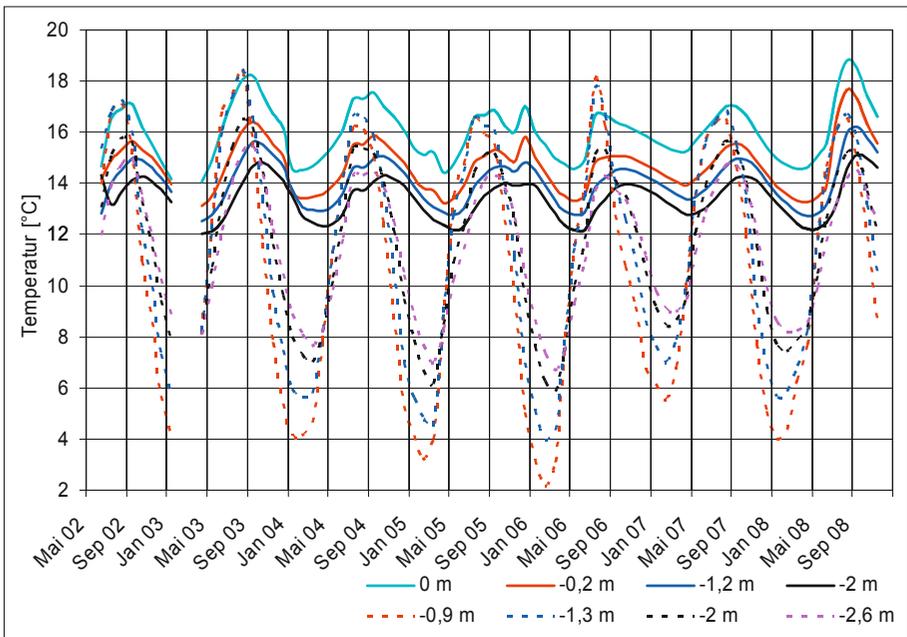
Die sogenannte neutrale Zone ist der Bereich, ab dem die Untergrundtemperatur um nicht mehr als 0,1K schwankt. Sie liegt meist in Tiefenbereichen zwischen 10 und 20m. Ab diesem Bereich nimmt die Erdreichtemperatur entsprechend dem lokalen geothermischen Temperaturgradienten mit der Tiefe weiter zu (vgl. Bild 7). Gemessene Temperaturprofile bestätigen dies zwar grundsätzlich, zeigen jedoch häufig Abweichungen von der idealtypisch linearen Zunahme mit der Tiefe. Als Gründe hierfür liegen zunächst Grundwassereinflüsse sowie eine mit der Tiefe variierende Zusammensetzung des Untergrundes nahe.

In Bild 11 sind in Erdsondenbohrungen gemessene Temperaturprofile aufgetragen, die noch weitere Einflüsse aufzeigen [Rohner, 2007]. Bei allen diesen Profilen bildet sich in den oberen 10 bis 20m die jährliche Schwingung des Außenklimas ab, während in größerer Tiefe der lineare Verlauf des geothermischen Temperaturgradienten sichtbar wird. Dazwischen zeigt sich ein gekrümmter Übergangsbereich, in welchem die Erdreichtemperatur nach oben hin zunimmt, je nach Standort jedoch unterschiedlich stark. In schwach bzw. nicht bebauten Gebieten (in Bild 11: Arnegg) ist diese Temperaturzunahme eine Folge der allmählichen Klimaerwärmung der vergangenen Jahrzehnte. Eine Bebauung, insbesondere Großstädte mit großer Ausdehnung und hoher Baudichte, verstärkt diesen Effekt. Sie verursacht eine Art Wärmestau, der die Temperatur der Erdoberfläche zusätzlich anhebt und im Laufe der Zeit den Untergrund in zunehmender Tiefe erwärmt. Die Ursache für diesen Wärmestau ist zum einen die Dämmwirkung der Bauwerke, zum anderen die mit der Bebauung verbundene Wärme-freisetzung durch Beheizung, innere Wärmeabgabe im Zuge der Nutzung usw. (in Bild 11: Bohrung in Sapporo nahe der U-Bahn).

Als Beispiel für die Erwärmung des Untergrundes direkt unter einem Bauwerk sind in Bild 12 Temperaturmesswerte des Erdreichs unter und neben einem nicht unter-



**Bild 11:** Klimaeffekte und lokale Einflüsse bei gemessenen oberflächennahen Temperaturprofilen des Erdreichs. [Rohner, 2007]



**Bild 12:** Messwerte der Untergrundtemperatur (Monatsmittelwerte) unter und neben dem nicht unterkellerten, ebenerdigen Technikum Gebäudeklimatik der Hochschule Biberach (Die Unterbrechungen und Störungen der Temperaturverläufe haben ihre Ursache in Ausfällen der Datenerfassung sowie im zeitweiligen Versuchsbetrieb des Luft-Erdwärmetauschers neben und des Bodenabsorbers unter dem Gebäude; bis auf die Datenlücke im Februar und März 2003 sowie den Temperaturanstieg unter dem Gebäude im 2. Halbjahr 2008 geben die Messdaten jedoch weitgehend die ungestörten Temperaturen wieder).

kellerten Gebäude mit ebenerdiger Bodenplatte aufgetragen. Das Gebäude wurde im Frühjahr 2001 in Betrieb genommen, die Temperaturen werden seit Juni 2002 kontinuierlich aufgezeichnet. Bereits wenige Meter neben dem Gebäude zeigt die Erdreichtemperatur einen Jahresgang, der mit dem berechneten Verlauf in Bild 9 gut übereinstimmt und lediglich im gesamten Niveau etwas höher liegt. Der Temperatur-Jahresgang mittig unter dem Gebäude weist eine deutlich geringere Amplitude auf als der Jahresgang neben dem Gebäude. Auch treten die höchsten und tiefsten Temperaturen jeweils noch später im Jahr auf. Der Jahresmittelwert der Erdreichtemperaturen im Bereich der obersten 2 m unter dem Gebäude liegt etwa 3,5 K höher als das Temperaturniveau neben dem Gebäude im selben Tiefenbereich. Bei der Planung von oberflächennahen geothermischen Anlagen direkt an oder unter Gebäuden ist diese starke und gegenseitige Temperaturbeeinflussung zu beachten.

Neben den thermischen Eigenschaften sind auch die Grundwasserverhältnisse sowie die hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes für eine energetische Nutzung bedeutsam. Zum einen können Grundwasserströme durch konvektiven Wärmetransport den thermischen Energiehaushalt und die Temperaturen des Untergrundes maßgebend beeinflussen. Zum anderen ist die direkte Nutzung von Grundwasser über Brunnen eine attraktive Möglichkeit, falls die erforderlichen geologischen, technischen und wasserrechtlichen Voraussetzungen gegeben sind.

Die maßgebende Kenngröße für die Durchlässigkeit eines Untergrundes für Wasser (Wasserwegsamkeit) ist der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  [m/s], auch hydraulische Leitfähigkeit genannt [VDI 4640-1:2010; Hölting, 2005]. Analog zum Fourierschen Gesetz der Wärmeleitung (siehe Kasten 1 auf S. 29–31) gilt für den Grundwassertransport im Erdreich das Gesetz von Darcy:

$$\dot{V} \text{ [m}^3\text{/s]} = k_f \text{ [m/s]} \cdot A \text{ [m}^2\text{]} \cdot \frac{\Delta h \text{ [m]}}{\Delta l \text{ [m]}}. \quad (3)$$

Es besagt, dass der durch einen bestimmten Querschnitt strömende Wasser-Volumenstrom  $\dot{V}$  dem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$ , der durchströmten Querschnittsfläche  $A$  sowie dem hydraulischen Gradienten oder Gefälle (Druckhöhenunterschied  $\Delta h$  geteilt durch die Fließlänge  $\Delta l$ , entlang derer der Druckhöhenunterschied auftritt) proportional ist.

Die  $k_f$ -Werte von Lockergesteinen reichen von unter  $10^{-9}$  m/s bis in den Bereich von  $10^{-1}$  m/s (Unterteilung dieses Wertebereichs siehe Tabelle 2). Sie weisen damit, selbst innerhalb einer Bodenart, eine deutlich größere Bandbreite auf als die in Tabelle 1 angegebenen thermischen Kenndaten und sind ohne Kenntnis der konkreten Situation vor Ort mit einer größeren Unsicherheit behaftet.

**Tabelle 2:** Einteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte nach DIN 18130-1. [DIN 18130, 1998/2003]

$k_f$ -Wert [m/s]	
$> 10^{-2}$	sehr stark durchlässig
$10^{-2}$ bis $10^{-4}$	stark durchlässig
$10^{-4}$ bis $10^{-6}$	durchlässig
$10^{-6}$ bis $10^{-8}$	schwach durchlässig
$< 10^{-8}$	sehr schwach durchlässig

### Zahlenbeispiel: Grundwasserströmung

Ein Grundstück wird auf seiner gesamten Breite von 25 m von Grundwasser angeströmt. Das Baugrundgutachten für dieses Grundstück liefert folgende Werte:

Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f \approx 2 \cdot 10^{-3}$  m/s (stark durchlässig),

Mächtigkeit (Schichtdicke/Höhe) des Grundwasserleiters: 14 m,

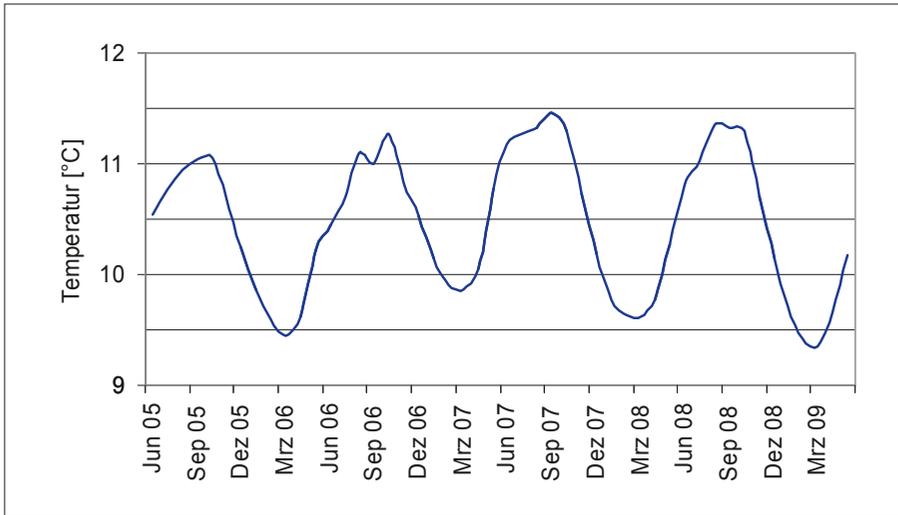
Grundwassergefälle in Fließrichtung: 0,3 m Pegelunterschied auf 100 m Abstand.

Die durch das Grundstück fließende Grundwassermenge ist nach Gleichung (3):

$$\dot{V} [\text{m}^3/\text{s}] = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 25 \cdot 14 \text{ m}^2 \cdot \frac{0,3 \text{ m}}{100 \text{ m}} = 0,0021 \text{ m}^3/\text{s} = 2,1 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Bild 13 zeigt den Verlauf der Temperatur von Grundwasser bei der Entnahme aus einem geothermischen Grundwasserbrunnen über mehrere Jahre hinweg. Der Grundwasserleiter erstreckt sich an diesem Standort, dem Kreisberufsschulzentrum Biberach (in Kapitel 7.1 beschriebenes Beispiel), von ca. 3 m bis ca. 16 m unter Geländeoberkante. Die gezeigte Temperatur wurde nicht direkt im Brunnen gemessen, sondern erst kurz vor der Wärmepumpenanlage im Dachgeschoss. Durch die Wärmeabgabe der Tauchpumpe und eine gewisse Wärmeaufnahme beim Durchströmen der gedämmten Rohrleitung im Gebäude dürften die Messwerte wenige Zehntel Grad höher sein als die tatsächliche Grundwassertemperatur an der Entnahmestelle. Die Messergebnisse zeigen, dass der Brunnen dauerhaft das benötigte Grundwasser bei stabilen Temperaturen zwischen ca. 9,5 und 11,5 °C liefert, einem für Grundwasserbrunnen typischen Temperaturbereich. Der Jahresgang der Grundwassertemperatur ist somit gegenüber der Lufttemperatur an der Erdoberfläche stark gedämpft. Seine Amplitude entspricht der berechneten Amplitude der Erdreichtemperatur in den Bildern 9 und 10.

Entsprechend den in den Bildern 11 und 12 erkennbaren Einflüssen durch Bebauung liegen die Temperaturen im obersten Grundwasserleiter unter Großstädten und Ballungsräumen zumindest im Zentrum einige Grad höher als die Werte in Bild 13. Laut Untersuchungen aus Berlin ist in dicht besiedelten Gebieten die Grundwassertemperatur gegenüber dem Freiland um mehr als 2 °C erhöht [ISU, 2009]. Im Zentrum von München sind sogar maximale Grundwassertemperaturen zwischen 17 und 20 °C



**Bild 13:** Monatsmittelwerte der Temperatur des aus dem Geothermie-Brunnen der Gebhard-Müller-Schule im Kreisberufsschulzentrum Biberach a. d. Riß entnommenen Grundwassers. [Quelle: Heinrich, 2008; Messwerte Hochschule Biberach bis Mai 2009 fortgeschrieben]

gemessen worden [Dohr, 1989]. Derartige lokale Unterschiede sind bei der Planung und Auslegung von oberflächennahen Geothermieanlagen zu beachten. Zunehmend wird auch die Genehmigungsfähigkeit, insbesondere der Wärmeeinleitung in das Grundwasser für Kühlzwecke, hierdurch mitbestimmt.

Die thermische Nutzung des Grundwassers oder des Erdreichs ist stets mit dem Ein- oder Ausspeichern von Wärme verbunden. Die beiden folgenden Zahlenbeispiele verdeutlichen die Größenordnungen der dabei umgesetzten Energien und Leistungen (Erläuterung der zugehörigen Grundlagen siehe Kasten 1 auf S. 29–31).

### Zahlenbeispiel: thermische Nutzung von Grundwasser

Eine Brunnenanlage fördert 1 Liter Grundwasser pro Sekunde ( $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ ), welches zur Kühlung verwendet und dabei um  $\Delta\vartheta = 3 \text{ K}$  erwärmt wird:

Spezifische Wärmekapazität von Wasser:  $c_p \approx 4190 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .

Dichte von Wasser:  $\rho \approx 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Es gilt:

$$\Delta Q = c_p \cdot m \cdot \Delta\vartheta = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta\vartheta. \quad (4)$$

Je Liter ( $V = 1/1000 \text{ m}^3$ ) nimmt das Kühlwasser damit  $12,57 \text{ kJ}$  Wärme auf.

Als kontinuierlicher Prozess mit einem Volumenstrom  $\dot{V}$  von 1 l/s ergibt sich mit

$$\dot{Q} = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta\vartheta = \dot{Q} = c_p \cdot \rho \cdot \dot{V} \cdot \Delta\vartheta \quad (5)$$

entsprechend eine Kühlleistung von 12,57 kW. Gleichung (5) gilt für jegliche Nutzung von Fluiden (Flüssigkeiten oder Gasen) als Wärmetransportmedium, z. B. auch für das Wasser in Heizungsanlagen oder die Solemischung im Geothermiekreislauf von Wärmepumpenanlagen, solange kein Phasenwechsel (Verdampfung oder Kondensation) auftritt.

### Zahlenbeispiel: Auskühlen von Erdreich durch Wärmeentzug

Durch eine vertikale Erdwärmesonde von 100 m Tiefe wird das Erdreich in einem Umkreis (Radius) von 5 m um die Bohrung im Laufe eines Jahres um  $\Delta\vartheta = -2\text{ K}$  abgekühlt; es gilt wiederum Gleichung (4):

Volumen  $V$  (Zylinder, 100 m hoch, 10 m Durchmesser): 7854 m<sup>3</sup>.

Volumetrische Wärmekapazität ( $c_{p,E} \cdot \rho_E$ ): 2180 kJ/(m<sup>3</sup> · K).

$$Q = (c_{p,E} \cdot \rho_E) \cdot V \cdot \Delta\vartheta = -3,42 \cdot 10^7 \text{ kJ} = -9512 \text{ kWh (negativ, weil Wärmeentzug)}.$$

Dies ist die Größenordnung der jährlichen geothermischen Ergiebigkeit einer einzelnen Erdwärmesonde und entspricht etwa der Wärmemenge, die bei der Verbrennung von 950 m<sup>3</sup> Erdgas bzw. 950 Litern Heizöl gewonnen werden kann.

Selbstverständlich ändert sich in der Realität die Temperatur innerhalb des von der Erdwärmesonde beeinflussten Erdreichvolumens nicht gleichmäßig, weil für den räumlichen Transport der Wärme ein Temperaturgefälle im Erdreich erforderlich ist. Die Temperatur sinkt nahe der Sonde stärker ab, es bildet sich allmählich ein sogenannter Temperaturtrichter um die Sonde herum aus. Dabei überlagert sich der Wärmetransport durch Wärmeleitung mit dem Ein- oder Ausspeichern von Wärme und den damit verbundenen Temperaturänderungen an jeder Stelle. Man spricht dann von dynamischer oder instationärer Wärmeleitung. Die hierfür charakteristische Eigenschaft ist die Temperaturleitfähigkeit  $a$ , in die sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die volumetrische Wärmekapazität des beteiligten Stoffes eingehen (siehe Kasten 1 auf S. 29–31).

Der von der Erdwärmesonde verursachte Temperaturtrichter hat zur Folge, dass mit der Zeit Wärme von allen Seiten in das hier willkürlich abgegrenzte Volumen nachströmt. Das Erdreich um die Sonde kühlt sich damit auch bei dauerhafter Wärmeentnahme nicht ständig weiter ab – also nicht um 200 K in 100 Jahren, wie aus dem Zahlenbeispiel gefolgert werden könnte – sondern es stellt sich langfristig ein Gleichgewichtszustand aus Wärmeentnahme an der Sonde und Wärmezufuhr aus der Umgebung ein. Entscheidend für eine korrekte Anlagenauslegung in der Praxis ist, dass dieses Gleichgewicht nicht bei unzulässig tiefen Temperaturen liegt. Auf die daraus resultierenden Anforderungen an die Planung und Bemessung von Geothermieanlagen wird in den Kapiteln 4 und 6 eingegangen.

**Kasten 1****Bezeichnungen und Einheiten für Energie, Wärme und Leistung:**

Energie als Zustandsgröße eines Systems kann in verschiedenen Formen auftreten. Hier sind insbesondere die Energieform Wärme sowie elektrische und mechanische Energie zum Antrieb von technischen Anlagen von Bedeutung.

Verwendete Energieeinheiten: Joule [J], Kilojoule [kJ]:  $1 \text{ kJ} = 1000 \text{ J}$ ,  
 Megajoule [MJ]:  $1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$ ,  
 Kilowattstunde [kWh]:  $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$ ,  
 Megawattstunde [MWh]:  $1 \text{ MWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ kJ}$ .

Wärmeenergie:  $Q$  [J] (Änderung eines Wärmeinhalts:  $\Delta Q$  [J]).

Als Leistung bezeichnet man die innerhalb einer bestimmten Zeiteinheit  $\Delta t$  umgesetzte Energie, also gewissermaßen die Geschwindigkeit des Energieumsatzes:

Leistung = umgesetzte Energie / benötigte Zeit (Einheit: Joule / Sekunde = Watt [W] bzw. kJ/s = kW).

Die in einer bestimmten Zeit umgesetzte Wärmemenge ist die Wärmeleistung. Handelt es sich um einen Vorgang der Wärmeübertragung, wird die in einer bestimmten Zeit übertragene Wärmemenge auch als Wärmestrom bezeichnet:

Wärmeleistung, Wärmestrom:  $\dot{Q}$  [W] =  $\frac{\Delta Q \text{ [J]}}{\Delta t \text{ [s]}}$ .

Bezug des übertragenen Wärmestroms auf die Übertragungsfläche  $A$ :

Wärmestromdichte:  $\dot{q}$  [W/m<sup>2</sup>] =  $\frac{\dot{Q} \text{ [W]}}{A \text{ [m}^2\text{]}}$ .

**Temperaturen:**

Verwendete Temperaturskalen: Celsius [°C] und Kelvin [K].

Absolute (oder thermodynamische) Temperatur:  $T$  [K] = 273,15 [K] +  $\vartheta$  [°C].

Differenzen von Celsius-Temperaturen werden meist in Kelvin angegeben und sind mit der Differenz der zugehörigen absoluten Temperaturen identisch. Es gilt also:

$\Delta \vartheta$  [°C] =  $\Delta \vartheta$  [K] =  $\Delta T$  [K].

**Stoffwerte:**

Dichte: volumenbezogene Masse eines Körpers:

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] =  $\frac{\text{Masse } m \text{ [kg]}}{\text{Volumen } V \text{ [m}^3\text{]}}$

Wärmeleitfähigkeit: Vermögen eines Körpers, eine bestimmte Wärmestromdichte bei einer anliegenden Temperaturdifferenz über eine bestimmte Schichtdicke zu transportieren:

$$\lambda \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]} = \frac{\text{Wärmestromdichte } \dot{q} \text{ [W/m}^2\text{]} \cdot \text{Schichtdicke } d \text{ [m]}}{\text{Temperaturdifferenz } \Delta\vartheta \text{ [K]}}$$

Wärmekapazität eines Körpers bei konstantem Druck: pro [K] Temperaturänderung (Anhebung oder Absenkung) von einem Körper aufgenommene bzw. abgegebene Wärmemenge:

massebezogene (spezifische) Wärmekapazität:

$$c_p \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} = \frac{\text{Änderung des Wärmeinhalts } \Delta Q \text{ [J]}}{\text{Masse } m \text{ [kg]} \cdot \text{Temperaturänderung } \Delta\vartheta \text{ [K]}}$$

volumenbezogene (volumetrische) Wärmekapazität: Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte:

$$(c_p \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} \cdot \rho \text{ [kg/m}^3\text{)}) = \frac{\text{Änderung des Wärmeinhalts } \Delta Q \text{ [J]}}{\text{Volumen } V \text{ [m}^3\text{]} \cdot \text{Temperaturänderung } \Delta\vartheta \text{ [K]}}$$

Temperaturleitfähigkeit: Stoffwert zur Beschreibung des dynamischen Temperaturverhaltens eines Körpers:

$$a \text{ [m}^2\text{/s]} = \frac{\lambda \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}}{\rho \text{ [kg/m}^3\text{]} \cdot c_p \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]}}$$

**Ein- bzw. Auspeichern von Wärme in einen bzw. aus einem Körper:**

$$\begin{aligned} \Delta Q \text{ [J]} &= c_p \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} \cdot m \text{ [kg]} \cdot \Delta\vartheta \text{ [K]} \\ &= (c_p \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} \cdot \rho \text{ [kg/m}^3\text{)}) \cdot V \text{ [m}^3\text{]} \cdot \Delta\vartheta \text{ [K]} \end{aligned}$$

Aufgenommene bzw. abgegebene Wärmeleistung, wenn die Temperaturänderung in einem bestimmten Zeitintervall  $\Delta t$  erfolgt:

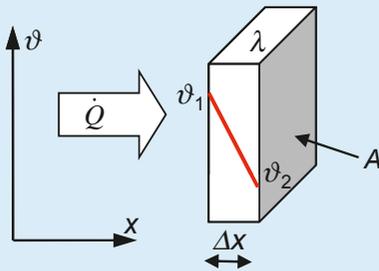
$$\begin{aligned} \dot{Q} \text{ [J/s = W]} &= c_p \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} \cdot m \text{ [kg]} \cdot \frac{\Delta\vartheta \text{ [K]}}{\Delta t \text{ [s]}} \\ &= (c_p \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} \cdot \rho \text{ [kg/m}^3\text{)}) \cdot V \text{ [m}^3\text{]} \cdot \frac{\Delta\vartheta \text{ [K]}}{\Delta t \text{ [s]}} \end{aligned}$$

Aufgenommene bzw. abgegebene Wärmeleistung, wenn ein bestimmter Stoffstrom (Massendurchsatz pro Zeiteinheit bzw. Volumendurchsatz pro Zeiteinheit) eine Temperaturänderung erfährt:

$$\begin{aligned}\dot{Q} \text{ [J/s = W]} &= c_p \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} \cdot \dot{m} \text{ [kg/s]} \cdot \Delta\vartheta \text{ [K]} \\ &= c_p \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]} \cdot \rho \text{ [kg/m}^3\text{/s]} \cdot \dot{V} \text{ [m}^3\text{/s]} \cdot \Delta\vartheta \text{ [K]}.\end{aligned}$$

### Wärmeleitung:

Fouriersches Gesetz der stationären und eindimensionalen Wärmeleitung zwischen zwei Ebenen eines Körpers mit der Querschnittsfläche  $A$  und dem Temperaturgradienten  $\Delta\vartheta/\Delta x$ :



$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$$

$$\dot{Q} \text{ [W]} = -A \text{ [m}^2\text{]} \cdot \lambda \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]} \cdot \frac{\Delta\vartheta \text{ [K]}}{\Delta x \text{ [m]}}$$

$$\text{bzw. } \frac{\dot{Q}}{A} = \dot{q} \text{ [W/m}^2\text{]} = -\lambda \cdot \frac{\Delta\vartheta}{\Delta x}$$

### Vorzeichenregel:

- + Energiezunahme im betrachteten System; es strömt Energie in das System hinein; Energie-/Wärmestrom in positiver Koordinatenrichtung (z. B. in x-Richtung).
- Energieabnahme im betrachteten System; es strömt Energie aus dem System hinaus; Energie-/Wärmestrom in negativer Koordinatenrichtung (z. B. der x-Richtung entgegengesetzt).

### Hinweis:

Die in dieser Aufstellung enthaltenen grundlegenden Definitionen und Beziehungen sind z. T. in vereinfachter Form dargestellt, wie sie in der technischen Praxis für die Fragestellungen dieses Buches gelten. Sie stellen keine für alle Fälle exakten und umfassenden Definitionen dar. Hierfür sei auf einschlägige Grundlagenwerke verwiesen [Dubbel, 2001; Recknagel, 2007; u. v. a. m.].

## 2.3 Tiefe Geothermie

Die Nutzung der Erdwärme wird in oberflächennahe und tiefe Geothermie unterteilt, wobei die Unterteilung nicht alleine nach der Tiefe erfolgt und es fließende Übergänge gibt: »Die tiefe Geothermie umfasst Systeme, bei denen die geothermische Energie über Tiefbohrungen erschlossen wird und deren Energie direkt (d. h. ohne Niveauanhebung) genutzt werden kann« [PK, 2007]. In Abgrenzung zur oberflächennahen Geothermie liegt eine Nutzung tiefer Geothermie ab Tiefen von unterhalb ca. 400 m vor (vgl. Kapitel 2.4), was allerdings Untergrundtemperaturen bereits ab 20 bis 25 °C beinhaltet (vgl. Bild 7). Ziel der tiefen Geothermie ist jedoch meist die Erschließung höherer Temperaturen, weshalb eine engere Definition eine Eingrenzung auf Tiefen ab 1000 m und Temperaturen  $\geq 60$  °C vornimmt. Das Baden in warmen Quellen (Thermalquellen) ist mit einigen tausend Jahren die älteste Nutzungsart der Geothermie durch den Menschen [BINE, 2004]. Die Gewinnung und direkte Nutzung von Thermalwässern für Bade- und Heizzwecke zählt unabhängig von der Tiefe, also auch bei in Quellen aufsteigendem Thermalwasser, im weiteren Sinne zur tiefen Geothermie. Ebenfalls zur tiefen Geothermie gehört die Nutzung von Wässern aus Bergwerken, Kavernen und Tunneln, wobei die dabei anzutreffenden Wassertemperaturen meist eher dem oberflächennahen Temperaturregime zuzuordnen sind [Stober & Lorinser, 2007].

Außerhalb dieser Sonderanwendungen erfolgt die Erschließung der Erdwärme in größeren Tiefen mit sogenannten hydro- und petrothermalen Systemen [BMU, 2009]:

### Hydrothermale Systeme

Diese Systeme nutzen im Untergrund vorhandenes Wasser. Man unterscheidet:

- Systeme mit niedriger Enthalpie (niedrigem Wärmeinhalt), z. B. Aquifere (Grundwasserleiter) mit heißem ( $>100$  °C), warmem (60–100 °C) oder thermalem ( $>20$  °C) Wasser. Wird das geförderte Wasser ausschließlich thermisch genutzt und nicht z. B. als Bade- oder Trinkwasser weiterverwendet (falls die Wasserqualität dies zulässt), erfolgt die Erschließung häufig über eine sogenannte geothermische Dublette. Hierbei wird das geförderte Wasser über eine oder mehrere Injektionsbohrungen wieder demselben Grundwasserleiter zugeführt, womit dieser nachhaltig bewirtschaftet wird. Geologische Störungen bzw. Störungszonen in diesem Temperaturbereich wurden in Deutschland bislang nicht geothermisch genutzt [Kaltschmitt, 2003].
- Systeme mit hoher Enthalpie (Wärmeanomalien, vulkanisch aktive Gebiete mit hoher Temperatur) mit Nutzung von Dampf- oder Zweiphasensystemen sind in Deutschland nicht vorhanden. Die weltweit erste Anlage zur geothermischen Stromerzeugung in Larderello (Toskana) nutzt seit Anfang des 20. Jahrhunderts ein derartiges vulkanisch aufgeheiztes unterirdisches Dampfreservoir.