



Mathias Bauer · Willi Freeden
Hans Jacobi · Thomas Neu *Hrsg.*

Handbuch Oberflächennahe Geothermie

Handbuch Oberflächennahe Geothermie

Mathias Bauer · Willi Freeden · Hans Jacobi ·
Thomas Neu
Hrsg.

Handbuch Oberflächennahe Geothermie

Herausgeber

Mathias Bauer
Lehr- und Forschungsgebiet
„Arbeits- und
Gesundheitsschutz“
RWTH Aachen
Aachen
Deutschland

Willi Freeden
Lehr- und Forschungsgebiet „Geomathematik“
TU Kaiserslautern
Kaiserslautern
Deutschland

Hans Jacobi
Jacobi & Partner Industrieberatung
Essen
Deutschland

Thomas Neu
Bergbau-Energie-Umwelt-Infrastruktur
proG.E.O. Ingenieurgesellschaft mbH
Saarbrücken
Deutschland

Die Darstellung von manchen Formeln und Strukturelementen war in einigen elektronischen Ausgaben nicht korrekt, dies ist nun korrigiert. Wir bitten damit verbundene Unannehmlichkeiten zu entschuldigen und danken den Lesern für Hinweise.

ISBN 978-3-662-50306-5 ISBN 978-3-662-50307-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-50307-2>

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung: Merlet Behncke-Braunbeck, Dr. Stephanie Preuß

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Der Beitrag der erneuerbaren Energien bei der Energieversorgung wächst ständig. Großes Entwicklungspotenzial unter den Erneuerbaren Energien besitzt die Erdwärmenutzung mit ihrem für menschliche Dimensionen unerschöpflichen Energievorrat. Erdwärme wird genutzt zum Heizen und Kühlen und zur stabilen Grundversorgung von Strom. Den Vorteilen – z. B. saisonale Unabhängigkeit von Wind, Sonne und anderen Wetterphänomenen, lokale autarke Produktion, umweltfreundlicher Charakter, optisch unauffälliger und geringer Flächenbedarf, optimale Energieausnutzung – stehen Risikomanagement und Umweltaspekte gegenüber. Insgesamt ist die Ressource Geothermie von größter Bedeutung und ein wesentlicher Bestandteil künftiger Energieversorgung.

Oberflächennahe Geothermie nutzt Bohrungen bis zu einer Tiefe von etwa 400 m. Die dort vorherrschenden Temperaturen von etwa 25 °C ermöglichen ein Beheizen und Kühlen von Gebäuden und technischen Anlagen. Erdwärme wird in offenen und geschlossenen Systemen gewonnen. Zu den offenen Systemen zählen Brunnenanlagen, zu den geschlossenen Systemen gehören Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, Koaxialsonden und Energiepfähle. In der oberflächennahen Geothermie ist zumeist der Einsatz von Primärenergie, z. B. einer Wärmepumpe, unvermeidlich. Für die Stromerzeugung ist die oberflächennahe Geothermie weniger geeignet, dies erfordert den Einsatz Tiefer Geothermie (vgl. Handbuch Tiefe Geothermie, Springer Spektrum, 2014).

Das vorliegende Handbuch stellt umfassend das Themenspektrum im Bereich Oberflächennahe Geothermie dar. Es vermittelt Grundlagen wie das Wärmepotential der Erde, die oberflächennahe Geologie, geophysikalische Grundlagen, mathematische Methoden, Risikomanagement und Bohrtechniken. In den angewandten Kapiteln geht es wesentlich um Geothermieprojekte aus Sicht eines Bauherrn, u. a. um Heizlastberechnung, Projektmanagement, Umweltaspekte, Finanzierung und Fördermöglichkeiten sowie die Dimensionierung von Anlagen. Auch verfahrenstechnische Grundlagen, Maschinentechnik, Qualitätssicherung, Fragen der Kommunikation und Akzeptanz wie auch der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes finden Behandlung.

Die verschiedenen Beiträge im vorliegenden Handbuch von unterschiedlichen Experten sollen dem interessierten Leser mehr Wissen vermitteln. Sie widmen sich explorativen, planerischen, rechtlichen, technischen, wirtschaftlichen und sicherheitsrelevanten

Aspekten der Beschäftigung mit oberflächennaher Erdwärme in der Region Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Alles in allem ist ein umfassender Überblick in der inhaltlich-kanonischen Abfolge eines oberflächennahen Geothermieprojektes angestrebt:

- Prospektion und Exploration,
- Projektmanagement und Planung,
- Realisierung und Bau,
- Nutzung und Erfahrung,
- Perspektiven.

Wesentliches Ziel ist die wissenschafts- und technologiebasierte Information über adäquate geowissenschaftliche Vorabinformation, Genehmigungsprozesse und rechtliche Belange, Umwelt- und Risikomanagement, technische Komplexität, wirtschaftliche Effizienz sowie Bewertung des Spannungsfeldes sozialer, politischer und öffentlichkeitswirksamer Einwirkungen.

Das Werk erhebt keinen Anspruch auf eine umfassende inhaltliche Durchdringung des Gesamtkomplexes Oberflächennahe Geothermie und seiner Subsysteme. Es versteht sich vielmehr als informativer und zuverlässiger Partner zu einem intensiveren und vertieften Verständnis.

Die Autoren und Herausgeber haben viel Zeit und Anstrengung investiert, um dieses Handbuch inhaltlich aktuell und hochwertig zu gestalten. Der Springer-Verlag zeigte sich allzeit offen für Anregungen und Wünsche. Besonderer Dank gebührt Frau Sabine Bartels und Herrn Clemens Heine, die wesentlich zum Gelingen beigetragen haben.

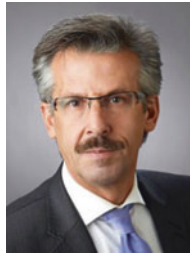
Die Herausgeber würden sich freuen, wenn es dem Handbuch gelänge, Oberflächennahe Geothermie den Entscheidungsträgern in Wirtschaft, Gesellschaft und Politik als höchst intelligente Wärmenutzungsform von umweltfreundlichem und langfristig kostengünstigem Charakter näher zu bringen und einen Beitrag zur Versachlichung der Diskussion von Risiken und sozialer Akzeptanz zu liefern. Konstruktive Kritik, Kommentare und Anmerkungen sind allzeit willkommen.

Im Februar 2018

M. J. Bauer, W. Freeden, H. Jacobi, T. Neu

Über die Herausgeber

Professor Mathias Bauer



- Mathias Bauer, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Rohstoff-Ingenieurstudium mit Zusatz Erdöl- und Erdgasgewinnung an der RWTH Aachen University 1980 bis 1985
- Promotion im Bereich Sicherheitstechnik (Gas-/Staubexplosionen)
- Habilitation über das Thema „Integrierte Managementsysteme“ (Entwicklung und Umsetzung Arbeitsschutzmanagementsystem)
- Buchautor mehrerer Fachbücher, Herausgeber der Buchreihe „Bexbacher/Aachener Beiträge für Consulting, Business und Management“ und Autor von mehr als 80 wissenschaftlichen Fachbeiträgen zu Arbeits- und Gesundheitsschutz, Betriebsorganisation
- Mitglied in zahlreichen Fachgremien und Ausschüssen, u. a. 10 Jahre Bundesjury Jugend forscht, zuletzt als Sprecher der Jury
- 1992 Handlungsbevollmächtigter, stv. Hauptabteilungsleiter für Berufsbildung, Arbeits- und Umweltschutz, Arbeitsmedizin sowie Leiter des am freien Markt tätigen Service-Centers Arbeits- und Umweltschutz eines Großkonzerns
- 2004–2005 Prokurist, Hauptabteilungsleiter für Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz in einem Energiekonzern
- 2005–2008 Mitglied der Werksleitung in einem Großbetrieb im Energiebereich
- von 1997 bis 2002 zusätzlich Privatdozent an der RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet für Arbeits- und Gesundheitsschutz

- seit 2003 apl. Univ.-Professor der der RWTH Aachen University
- 1998–2003 zusätzlich Rektor der Fachhochschule für Bergbau, Rohstoffveredelung und Arbeitswissenschaften, Saarbrücken
- 2000 Gastdozent an der Universität Aurel Vlaicu in Rumänien und 2002 Verleihung der Ehrendoktorwürde
- 2000 Mitbegründer und Gesellschafter der CBM GmbH, seit 2009 Consultant

Professor Willi Freeden



- Willi Freeden, Prof. Dr. rer. nat., Dipl.-Math.,
- Studium in Mathematik, Geographie und Philosophie an der RWTH Aachen, 1971 Diplom in Mathematik, 1972 Staatsexamen in Mathematik und Geographie, 1975 Promotion in Mathematik, 1979 Habilitation in Mathematik an der RWTH Aachen,
- 1979 Privatdozent an der RWTH Aachen, 1981/1982 Visiting Research Professor an der Ohio State University, Columbus (Department of Geodetic Science and Surveying), 1984 Professor in Mathematik an der RWTH Aachen (Institut für Reine und Angewandte Mathematik), 1989 Professor in Technomathematik (Industriemathematik), 1994 Leiter der Arbeitsgruppe Geomathematik, 2002 Dekan des Fachbereichs Mathematik, TU Kaiserslautern, 2002 Leiter der universitätsweiten Graduate School (ISGS) „International School for Graduate Studies“ der TU Kaiserslautern, 2003–2006 Vorsitzender des Rheinland-Pfalz Landesarbeitskreises „Curriculare Standards im Fach Mathematik in der Lehrerbildung an RP-Universitäten“, 2002–2006 Vizepräsident für Forschung und Technologie an der Technischen Universität Kaiserslautern,
- seit 2005 Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK), Bayerische Akademie der Wissenschaften,
- 2010 Editor des „Handbook of Geomathematics (HBGM)“, 2015 Zweite Edition des HBGM, 2014 Mitherausgeber des Springer Spektrum „Handbuch Tiefe Geothermie“ (HbTG), 2017 Mitherausgeber des Springer Spektrum „Handbuch der Geodäsie“ (HbG), 2017 Editor des Birkhäuser „Handbook of Mathematical Geodesy“,
- 2009 Editor in Chief des Springer „International Journal on Geomathematics (GEM)“,

- 2014 Editor in Chief der Springer Book Series „Geosystems Mathematics“,
- 2015 Editor in Chief der Birkhäuser Series „Lecture Notes in Geosystems Mathematics and Computing“,
- Mitglied der Editorial Boards von mehr als zehn internationalen Zeitschriften der Mathematik und den Geowissenschaften,
- (Mit-)Organisator von mehr als 50 internationalen Konferenzen und Symposia,
- Verfasser von mehr als 180 Beiträgen in internationalen Zeitschriften und Journalen der Mathematik und den Geowissenschaften,
- (Mit-)Verfasser von zwölf wissenschaftlichen Forschungs- und Lehrbüchern im Bereich Geomathematik.
- Leiter der BMWi-Projekte GEOFÜND und SPE

Professor Hans Jacobi



Studium Dipl.-Ing., später Dr. Ing., Berufsweg vom Schichtführer zum Vorstand, Mandate in Aufsichtsräten und Beiräten, Eigene Beratungsgesellschaft, Honorarprofessor an der RWTH Aachen

Präsident der GDMB, Präsident des ORC Fachverbandes

Herr Jacobi ist geschäftsführender Gesellschafter der Jacobi und Partner Industrieberatung GmbH. Er war viele Jahre in verantwortlichen Positionen im Bergbau, zuletzt als Vorstandsvorsitzender einer Aktiengesellschaft. Er war verantwortlich für Produktion, Restrukturierung von Bergwerken und Neubau von Anschlussbergwerken sowie Restrukturierung und Neubau von Kokereien. Er baute für den Konzern das internationale Geschäft auf, hat in eigener Verantwortung umfangreiche Veränderungsprozesse vorbereitet, moderiert und durchgeführt.

Als Präsident der GDMB, Gesellschaft der Metallurgen und Bergleute e. V. ist er für die Arbeit von Fachausschüssen der Metallurgie, und des Bergbaus, darunter ein Fachausschuss für Geothermie verantwortlich.

Der ORC Fachverband hat die Verbreitung einer Technologie zur Stromerzeugung auf niedrigem Temperaturniveau als Ziel.

Dipl.-Ing. Thomas Neu

- 1979 bis 1984 Bergbaustudium an der TU Clausthal, Studienschwerpunkt Rohstoffwirtschaft
- 1984 bis 1995 Saarbergwerke AG, verschiedene Aufgaben in Stab und Linie unter und über Tage, zuletzt Abteilungsleiter technisch-wirtschaftliche Planung und Umweltschutzbeauftragter des Bergwerkes Warndt/Luisenthal
- Bis Juli 2003 Technischer Geschäftsführer der SAARMontan Gesellschaft für bergbaubezogene Dienstleistungen mbH, Saarbrücken
- Bis Februar 2008 Geschäftsführender Gesellschafter der DRILLTHERM Gesellschaft für Erdwärmeanlagen, Brunnenbau und Bohrungen mbH, Saarbrücken, sowie der FORAT HERM Eurl, St. Avold
- Bis Februar 2010 Geschäftsführender Direktor der ENRO Energie SE, Essen und Geschäftsführer von deren Tochtergesellschaften ENRO Geothermie GmbH, Essen, und ENRO Geothermie Entwicklung GmbH, Ludwigsfelde.
- Bis Mai 2013 Geschäftsführer der Geothermische Kraftwerksgesellschaft Traunreut GmbH, Traunreut
- Ab Juni 2013 geschäftsführender Gesellschafter der pro G.E.O Ingenieurgesellschaft mbH, Saarbrücken, Bergbau – Geothermie – Umwelt – Infrastruktur

Die Autoren

Christian Blick, Dr. rer. nat., Dipl.-Math., M. Sc., Studium in Mathematik und Maschinenwesen an der Technischen Universität Kaiserslautern 2006–2011, M.Sc. Studium in Mathematical Engineering, 2009–2010 an der LTH Lund, Schweden, 2011–2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Kaiserslautern der Arbeitsgruppe Geomathematik und im Rahmen dieser Tätigkeit von 2012–2016 Mitarbeiter im BMWi-Verbundprojekt „GEOFÜND“ (Leiter: Prof. Dr. W. Freeden), 2015 Promotion in Mathematik, seit 2016 Angestellter der „Gesellschaft für Consulting, Business und Management mbH (CBM)“, Bexbach, im Rahmen des BMWi-Projekts „SPE“.

Anna Borg, Dipl.-Psych. ist Leiterin des Geschäftsfeldes Unternehmens- und Personalentwicklung bei der Gesellschaft für Business und Management mbH (CBM). Nach dem Studium der Psychologie und Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin und Dozentin an der Universität des Saarlandes wechselte sie 2007 in die Beratung. Bei der CBM baute sie neben ihrer Beratertätigkeit das Geschäftsfeld Unternehmens- und Personalentwicklung auf und aus. Ihre Arbeitsfelder sind die Konzeption und Umsetzung von Projekten zu Organisationsentwicklung, Kommunikation, Sicherheitskultur und Arbeits- und Gesundheitsschutz. Neben der Beratertätigkeit ist sie als Projektleiterin in der Forschung in bundesgeforderten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (BMWi/BMBF) aktiv. So leitete sie 2012 bis 2015 das BMWi Verbundprojekt TIGER (Tiefe Geothermie – Akzeptanz und Kommunikation einer innovativen Technologie).

Klaus Bücherl, Dipl-Geol., arbeitet seit 30 Jahren als Sachverständiger für Boden und Grundwasser. 1989 gründete er die LUBAG Labor für Umweltberatung, Analytik und Geologie GmbH, eines der führenden bayerischen Geobüros. 15 Jahre lang war er geschäftsführender Gesellschafter des Unternehmens, das heute zur Tauw Gruppe gehört. Klaus Bücherl ist in verschiedenen Berufsverbänden bundesweit aktiv: Unter anderem war er von 2007 bis 2015 stellvertretender Vorsitzender des Bundesverbandes Deutscher Geowissenschaftler BDG e.V. Im Ingenieurtechnischen Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. bekleidet er mehr als 10 Jahre lang die Funktion des Obmanns für den Fachausschuss F 2 Probenahme. Seit September 2015 ist er Gründungsvorstand des V18 – Vereinigung der Sachverständigen und Untersuchungsstellen nach § 18 BBodschG

e.V. und als Mediator unterstützt er Personen dabei, bei Konflikten außergerichtlich eine für alle gerechte und faire Lösung zu finden.

Christine Buddenbohm, Dipl.-Geol., 1981–1984 Geologiefacharbeiter mit Abitur, 1984–1989 Studium der Geologie an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 1991–1994 Wissenschaftlich-technische Mitarbeiterin bei der Geothermie Neubrandenburg GmbH, 1995–1996 Baugrundgutachterin beim Ingenieurbüro Hofmann & Partner Neubrandenburg, 1997–1998 Umweltbeauftragte bei GAGFAH BIV GmbH, NL Neubrandenburg, 1998–1999 Existenzgründung, 1999–2009 freiberufliche (selbständige) Tätigkeit als Geologin, Tätigkeitsschwerpunkte: Altlasten, Brunnenbau, Geothermie, Auditierung nach DVGW (A) W 120 der Zertifizierung Bau e.V., 2009–2012 Leiterin des Geschäftsbereich Brunnen- und Rohrleitungsbau bei Zertifizierung Bau GmbH, Berlin, seit 03.05.2012 Geschäftsführende Gesellschafterin der SakostaCCB GmbH, Themenschwerpunkte: Altlasten- und Baugrundgutachten, Planung geothermischer Anlagen, Bohrbegleitung, Auditierung von Bohrunternehmen nach DVGW (A) W 120 i.A. der Zertifizierung Bau GmbH

Frank Burkhardt, B. Eng., aufgewachsen mit und im Familienunternehmen Burkhardt das sich seit ca. 1970 mit Geothermie beschäftigt und 1959 als Bohr- und Brunnenbauunternehmen gegründet wurde. Nach der erfolgreichen Ausbildung zum Brunnenbauer absolvierte er ein Studium zum Bauingenieur, welches er 2011 als B. Eng. erfolgreich abschloss. Parallel stieg er in die Geschäftsführung der Fa. Burkhardt ein. 2013 erhielt er den Innovationspreis des GTV- Bundesverband Geothermie. An der Entwicklung der „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ des Landes Baden- Württemberg war er maßgeblich beteiligt. Seit 2017 leitet er die Firma als geschäftsführender Gesellschafter in 3. Generation. Frank Burkhardt setzt sich für die Qualitätserhöhung und Qualitätssicherung im Bereich der oberflächennahen Geothermie ein und ist in verschiedensten Gremien vertreten.

André Deinhardt, Dr., ist promovierter Staatswissenschaftler und studierter Betriebswirt. Vor seiner Tätigkeit beim Bundesverband Geothermie war er u. a. Leiter der Unternehmensbetreuung bei der Berlin Partner GmbH, der Wirtschaftsförderungsgesellschaft des Landes Berlin. Seit 2013 ist er Geschäftsführer des Bundesverbandes Geothermie e. V.

Gregor Dilger, ist Diplom-Verwaltungswissenschaftler. Studienbegleitend sammelte er bei der Agentur für Erneuerbare Energien Erfahrungen in der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit. Danach war er zwei Jahre für den Bundesverband Wärmepumpe tätig. Seit 2013 ist er Referent für Presse und Politik beim Bundesverband Geothermie e. V.

Lena Eggeling, B. Sc., arbeitete nach ihrem Studium der Angewandten Geowissenschaften am dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bei der EnBW Energie Baden-Württemberg AG als Projektleiterin im Bereich Geothermie. Derzeit promoviert sie an der Universität Göttingen zum Thema Charakterisierung geothermischer Reservoirs mittels Radionuklidanalytik.

Kord Ernstson, Prof. Dr., ist Geophysiker (Dr. rer. nat) und Geologe (Dr. rer. nat. habil.); beratender Geophysiker und Geologe, Freiberufler mit eigenem Büro; Professur an der Universität Würzburg.

Daniel Fischer, Diplom-Geologe (Diplom Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2010), sieben Jahre Berufserfahrung in angewandter Geophysik und Geologie mit besonderem Schwerpunkt bei Erdwärmesonden (Messungen und Weiterentwicklungen von miniaturisierten Bohrloch-Messsonden) und im Bergbau. Internationale Projekterfahrungen in Europa und Amerika.

Walter Frenz, Univ.-Prof., Dr. jur., studierte Rechtswissenschaft an den Universitäten Würzburg, Caen und München. 1987 legte er die Maîtrise en Droit public ab, 1989 das 1. und 1992 das 2. Staatsexamen, 1991 die Promotion. 1992/1993 war er AG-Leiter Staatsrecht an der Universität Bonn, 1994 bis 1996 wissenschaftlicher Assistent an der Universität Münster sowie Professor für deutsches Recht an der Katholischen Universität Nijmegen. Seit 1997 ist er Universitätsprofessor an der RWTH Aachen und dort Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes Berg-, Umwelt- und Europarecht.

Tillman Gauer, Dipl.-Ing., ist seit 2014 Mitarbeiter an den Fachgebieten Immobilienökonomie und Massivbau & Baukonstruktion der TU Kaiserslautern. Während des Studiums des Maschinenbaus mit der Vertiefung Energietechnik an der TU Kaiserslautern hat er Auslandsaufenthalte an der Chalmers Tekniska Högskola in Göteborg (Schweden) und der University of Technology Sydney (Australien) absolviert. In seiner Funktion als Wissenschaftlicher Mitarbeiter betreut Herr Gauer unterschiedliche Vorlesungen aus den Bereichen „Energie & Gebäude“ sowie Immobilienökonomie. In diesem interdisziplinären Umfeld bearbeitet er Forschungsprojekte, die Neubau und Bestandsentwicklung umfassen. Die Forschungsschwerpunkte von Herrn Gauer liegen im Bereich der Speicherung und erneuerbaren Bereitstellung von Energie sowie Energieversorgungskonzepten v.a. in Zusammenhang mit Gebäuden und Gebäudegruppen. Im Fokus stehen dabei die Wärmespeicherung in der Gebäudestruktur sowie die Integration unterschiedlicher Energieträger. Sein besonderes Interesse gilt der systemischen und interdisziplinären Betrachtung von Fragestellungen aus dem Bereich Energie & Umwelt.

Johann Goldbrunner, Prof. Dr., Promotion 1980 Universität Graz (Geologie, Paläontologie), 1988 Habilitation an der Technischen Universität Graz im Fach „Hydrogeologie“, 1976–1993 Wissenschaftlicher Mitarbeiter Forschungsgesellschaft Joanneum, 1981–1991 Vertragsassistent am Institut für Technische Geologie und Mineralogie, Technische Universität Graz, 2001 tit.ao. Univ.-Prof. Technische Universität Graz, 1993 Gründung des Technischen Büros Geoteam, seit 1993 Geschäftsführer, Allgemein Beedeter und Gerichtlich Zertifizierter Sachverständiger für Geologie.

Johannes Gottlieb, Dr., Diplom-Bergbau-Ingenieur (TU Bergakademie Freiberg) und Diplom-Mathematiker, Promotion in mathematischer Physik (Universität Halle). 42 Jahre Berufserfahrungen in Geotechnik, Bergbau, Geophysik in Industrie und Forschung. Seit

1999 selbstständig in der Geothermie, geschäftsführender Gesellschafter der Montanes-Gruppe.

Thomas Grab, Dr.-Ing., nach seinem Umweltengineering-Studium arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für technische Thermodynamik an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Er promovierte 2014 im Bereich Maschinenbau mit dem Titel „Verbesserung der Filmverteilung auf Fallfilmverdampferoberflächen am Beispiel geothermischer Phasenwechselsonden“. Forschungsschwerpunkte liegen im energetischen Monitoring, der Nutzung von Grubenwasser sowie der oberflächennahen Geothermie, der Untersuchung von Wärmetransportvorgängen mit Phasenänderungen in Thermosiphons und Heat Pipes. Seit 2017 ist er Koordinator des Scientific Diving Centers der TU Bergakademie Freiberg.

Ulrich Gross, Prof. Dr.-Ing. habil., Professor für Technische Thermodynamik an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (seit 1992); gewähltes Mitglied im Fachkollegium 404 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (2004–2012); Ordentliches Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften (seit 1999); Mitglied von aca-tech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (seit 2006). Editor-in-Chief des „International Journal of Thermal Sciences“ (seit 2002). Hauptarbeitsgebiete: Thermophysikalische Stoffeigenschaften bei Temperaturen bis zu 1600 °C; Untersuchung von Wärmetransportvorgängen mit Phasenänderungen unter dem Ziel der Prozessoptimierung und Energieeinsparung; oberflächennahe Geothermie.

Clemens Heine, Studium der Mathematik und Philosophie (Diplom) in Heidelberg. Seit 1988 ist er Mitarbeiter des Springer-Verlags und arbeitet seit 2015 als Executive Editor Mathematics and Applied Sciences für die Marke Birkhäuser. Zu seinen Verantwortlichkeiten gehören dabei die Betreuung der Zeitschriften „Pure and Applied Geophysics“, „Swiss Journal of Geosciences“ und das „Swiss Journal of Palaeontology“, GEM International Journal on Geomathematics sowie der Buchreihen „Geosystems Mathematics“ und „Lecture Notes in Geosystems Mathematics and Computing“.

Thomas Heinze, Prof. Dr.-Ing., Dipl.-Phys., 1986 Physik-Diplom mit Auszeichnung an der RWTH Aachen, Hauptforschungsgebiet: Lasermesstechnik für die Brennverfahrensentwicklung von Verbrennungsmotoren. 1990 Promotion mit Auszeichnung über dieselmotorische Gemischbildung an der RWTH Aachen; 1991 Post-Doktorant am Institut Français du Pétrole (IFP) bei Paris; 2005 Berufung an die Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw-saar), Lehrgebiete : Kraft- und Arbeitsmaschinen und Automatisierungstechnik. 12 Jahre Industrietätigkeit in leitenden Positionen bei HJS-Fahrzeugtechnik, Siemens Automobiltechnik und ArvinMeritor, Arbeitsschwerpunkte in der Entwicklung von Abgasreinigungssystemen und Motorsteuerungssystemen.

Reiner Homrighausen, Dr., Dipl.-Geologe, Geschäftsführer der RH Drilling-Technology GmbH ist als Berater von Minen-Gesellschaften, Bohrunternehmen und Behörden im Ausland tätig. Nach seinem Studium in Deutschland, Österreich und den USA war er

als Explorationsgeologe in vielen Ländern Afrikas tätig. Bis 2016 begleitete er leitende Positionen in national und international tätigen Firmen der Bohrindustrie, die auf den Gebieten des Brunnenbaus, des Explorationsbohrens, des Bohrens für die Gewinnung geothermischer Energie und des Bohrens für die Erkundung und Bewertung von unkonventionellen Kohlenwasserstofflagerstätten tätig sind.

Eva-Maria Jakobs, Univ.-Prof. Dr. phil., forscht und lehrt an der RWTH Aachen. Gegenstand ihrer Professur für Textlinguistik und Technikkommunikation sind kommunikative Prozesse und Aufgaben in Technik und Wirtschaft. Ihr Forschungsteam befasst sich mit Fragen der Technikwahrnehmung, -gestaltung und -kommunikation in Anwendungsbereichen wie Erneuerbare Energien, Mobilität, IuK und Industrie 4.0. Sie ist Ko-Direktorin des Instituts für Industriekommunikation und des Human-Computer Interaction Center der RWTH Aachen sowie ordentliches Mitglied der Akademie der Technikwissenschaften (acatech).

David Koppmann, M. Sc., seit dem Abschluss seines Bauingenieurstudiums mit der Vertiefungsrichtung Tunnelbau und Geotechnik an der RWTH Aachen im Jahre 2013 ist er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen tätig. Dort beschäftigt er sich mit dem Forschungsschwerpunkt der Nutzung oberflächennahe Geothermie mittels thermisch aktivierter Bauteile.

Jens-Uwe Kühl, Dipl.-Ing., studierte 2000–2006 Bauingenieurwesen an der Universität Rostock. Von 2006–2010 war er Fachgruppenleiter Oberflächennahe Geothermie und 2010–2015 Geschäftsführer; seit 2015 ist er Inhaber und Geschäftsführer bei H.S.W. Ingenieurbüro Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH.

Sylvia Kürten, Dr., nach dem Studium des Bauingenieurwesens an der RWTH Aachen war sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen tätig. Sie beendete Ihre Tätigkeit an der Hochschule mit ihrer Dissertation „Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen“. Seit 2014 ist sie als Bauingenieurin im Ingenieurbüro Gell & Partner GbR in Aachen tätig.

Björn-Martin Kurzrock, Prof. Dr., ist seit Juni 2013 Professor für Immobilienökonomie an der TU Kaiserslautern, zuvor von April 2008 bis Mai 2013 als Juniorprofessor. Mit dem Fachgebiet gestaltet er den Facility Management (B.Sc. und M.Sc.) im Fachbereich Bauingenieurwesen mit, seit 2015 als Studiengangsleiter. Er forscht insbesondere in den Bereichen Bestandsentwicklung und Digitalisierung im Immobilienmanagement sowie Wissenstransfer und Anreizsysteme in der Bau- und Immobilienwirtschaft. Er lehrt Kurse u. a. in Strategischem FM, Immobilienmanagement, Immobilien-Investmentmanagement, Immobilien-Projektentwicklung, Bestandsentwicklung und Immobilienbewertung. Von 2006 bis 2008 war er bei der IPD Investment Property Databank (heute: MSCI) in Wiesbaden als Head of Research tätig. Stationen davor waren bei internationalen Unternehmen als Financial Analyst und Research Analyst im Bereich Bestandsanalyse und Benchmarking von Immobilien-Portfolios. Er promovierte am Real Estate Management

Institute (REMI) der EBS European Business School (EBS Universität für Wirtschaft und Recht). Das Studium der Betriebswirtschaftslehre absolvierte er an der EBS und der Georgia State University Atlanta (USA). Seit 2008 ist Professor Kurzrock Mitglied im Herausgebergremium der Zeitschrift für Immobilienökonomie (ZIÖ). Er ist seit Mai 2016 Member of the Board der European Real Estate Society (ERES) und dort Repräsentant für die Gesellschaft für immobilienwirtschaftliche Forschung (gif). Von den Studierenden im Fachbereich Bauingenieurwesen der TU Kaiserslautern wurde er mehrfach mit dem Fachschaftspreis für hervorragende Lehre ausgezeichnet.

Clemens Lehr, Dipl.-Geol., studierte Geologie und Paläontologie an der Johann-Wolfgang-Goethe Universität, Frankfurt. Von 1994–1997 war er Gesellschafter und Projektmanager bei Protec GmbH und 1997–2014 Gesellschafter-Geschäftsführer bei Geosysteme GmbH. Seit 1997 leitet er das Geotechnische Umweltbüro Lehr, das sich mit geothermalen Systemen, der Entwicklung geophysikalischer Messgeräte für die Geothermie (GRT-Messgeräte, EGRT Fiberoptical Systems); geophysikalische Messsonden, Energie-Monitoring-Systeme, Entwicklung thermophysikalischer und numerischer Software, Boden-, Wasser- und Bodenluft-Sanierungssysteme sowie Mess- und Monitoring-Technik befasst. Er ist seit 2013 Mitglied des Arbeitskreises AK Geothermie der FH-DGG und FI-DGGT/DGG und Mitautor der Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – EA Geothermie. Seit 2015 hat er einen Lehrauftrag an der Technischen Universität Darmstadt.

Katharina Link, Dr., berät als Inhaberin der Geo-Future GmbH (Frauenfeld) im Bereich Geothermie. Seit 2012 leitet sie u. a. im Auftrag die internationale Arbeitsgruppe „Direct Use of Geothermal Energie“ der IEA Geothermal, welche auch innovative oberflächennahe Geothermiesysteme umfasst. Dr. Katharina Link ist zudem als Mitarbeiterin der Geo-Energie Suisse AG (Zürich) an der Entwicklung von innovativen EGS-Projekten beteiligt. Bereits in ihrer Forschungstätigkeit als Geologin an der Universität Freiburg i. Br. hat sie sich u. a. mit den thermischen und hydraulischen Eigenschaften des Grundgebirges befasst.

Karl-Norbert Lux, Dr. rer. nat. Dipl.-Geophys., 1969–1973 Studium der Angewandten Geophysik, Bergakademie Freiberg, Abschluss als Diplom-Geophysiker; 1978–1980 Zusatzstudium Grundwasser an der TU Dresden; 1985 Promotion an der Bergakademie Freiberg zum Dr. rer. nat. (außerplanmäßige Aspirantur 1981–1985); 1973–1990 VEB bzw. Kombinat GEOPHYSIK, Bohrlochgeophysik in der Rohstofferkundung (Erdöl/Erdgas, Braunkohle, Feste Minerale, Erz), im Grundwasser und in der Ingenieurgeologie; 1990–2000 Prokurist, ab 1993 Geschäftsführer-Gesellschafter der BLM-GmbH; seit Ende 2000 freiberuflicher Geophysiker (Mitinhaber der GFL – Dr. Lux Geophysikalische Fachberatung GbR) mit den Schwerpunkten Planung, Organisation, Durchführung von Messungen im Untergrund; Geophysikalische Bohrlochmessungen sowie Oberflächengeophysik; Auswertung und Interpretation der Messungen, Gutachten und Consulting zur Geophysik einschließlich spezieller geohydraulischer Probleme

Simeon Meier, Dipl.-Ing., Ingenieur, Geschäftsführer bei der enOware GmbH, mehrjährige Erfahrung in der Projektleitung und Entwicklung innovativer online-basierter Messsysteme und elektronischer Lösungskonzepte.

Helga Nutz, Dr. rer. nat., Dipl.-Math. techn., Studium Technomathematik an der Universität Kaiserslautern; 1998 Diplom; 2002 Promotion in Mathematik; 2002–2003 Forschungsreferentin der Universität Kaiserslautern; 2006–2016 Mitarbeiterin der AG Geomathematik (Leiter: Prof. W. Freeden) der TU Kaiserslautern und im Rahmen dieser Tätigkeit von 2012–2016 Koordinatorin im BMWi-Verbundprojekt GEOÜND; seit 2016 Angestellte der „Gesellschaft für Consulting, Business und Management mbH (CBM)“, Bexbach, im Rahmen des BMWi-Projekts „SPE“.

Renate Pechnig, Dr.-Ing., nach der Promotion an der RWTH Aachen (1996) leitete sie für mehrere Jahre die Arbeitsgruppe Bohrlochgeophysik am Institut für Angewandte Geophysik der RWTH Aachen und ist bis heute der Hochschule über ihre Lehrtätigkeit verbunden. Seit 2003 ist sie Geschäftsführerin der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Aachen, und verantwortlich für Projekte im Bereich der oberflächennahen und tiefen Geothermie mit einem Schwerpunkt auf der Erfassung und Modellierung thermischer Prozesse im Untergrund.

Martin Sabel, Dr., Diplom-Geologe, Geschäftsführer des Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 1994–2000 Studium der Geowissenschaften an den Universitäten Kiel, Köln und Bonn, 2000–2003 Promotion zum Thema Paläoklima im Rahmen des interdisziplinären Projekts „Forschungsbohrung Eckfelder Maar“ am Mineralogisch-Petrologischen Institut der Universität Bonn, 2003–2007 Projektleiter am Landesamt für Umwelt-, Naturschutz und Geologie des Landes Mecklenburg-Vorpommern in Stralsund und in den Bereichen Umweltanalytik, -monitoring und Qualitätssicherung, 2007–2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Material und Umwelt, Umwelteinflüsse und Schädigungsmechanismen an der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin, Seit 2012 Referent für Geothermie beim BWP e.V., seit 2014: stellvertretender Geschäftsführer; seit 2017: Geschäftsführer

Marietta Sander, Technische Hochschule Georg Agricola (bis 12/2016 International Geothermal Association, c/o Hochschule Bochum) arbeitete von 2/2011 bis 12/2016 als Executive Director in der International Geothermal Association (IGA). Sie war verantwortlich für die Leitung der Geschäftsstelle in Bochum, sektorspezifische Beratung, die Zusammenarbeit mit internationalen Organisationen, Öffentlichkeitsarbeit als auch Finanz- und Mitgliedsmanagement. Vor ihrer IGA-Tätigkeit war sie in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe als Projektleiterin für das GEOTHERM Sektorvorhaben in Ostafrika zuständig. Zuvor war sie als zertifizierte Projektmanagerin Regenerative Energien und als Diplom-Geographin im Umwelt- und Ressourcenschutz in der internationalen Entwicklungszusammenarbeit in Vietnam, Südafrika, Lesotho und Peru tätig.

Sass, Ingo, Prof. Dr. rer. nat., studierte 1984–1987 an der Universität Hamburg und 1987–1990 an der Universität Karlsruhe (TH), Diplom in Angewandter Geologie: Hydrogeologie; 1991–1994 Dissertation zum Thema „Brunnen und Filter für die Sanierung von Untergrundkontaminationen“. 1990–1991 Projektingenieur bei Pall Schumacher GmbH, Crailsheim, 1994–1998 Technischer Geschäftsführer bei FlowTex GUT GmbH, Ettlingen und 1999–2005 Vorstand bei CDM Consult AG sowie Geschäftsführer Süddeutschland bei CDM Consult GmbH. Seit 2004 ist er beratender Ingenieur der Ingenieurkammer Baden-Württemberg. 2005–2009 Professor (W3) für Ingenieurgeologie und Geothermisches Labor an der TU Darmstadt, seit 08/2009 Berufung auf die Stiftungsprofessur (W3) „Angewandte Geothermie“ an der TU Darmstadt, finanziert vom NaturPUR Institut der HSE AG. Seit 2011 ist er öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Geothermie der Ingenieurkammer Hessen und beratender Ingenieur der Ingenieurkammer Hessen.

Jochen Schneider, Dr., promovierte am Institut für Geowissenschaften der Ruprecht-Karls-Universität in Heidelberg. Als Geschäftsführer eines Freiburger Fördervereins für erneuerbare Energien, war er verantwortlich für die Öffentlichkeitsarbeit zur Geothermie in der Oberrheinregion. 2007 wechselte er zur Hydroisotop GmbH, bevor er 2012 die Hydrosion GmbH gründete, die sich mit Wasseranalytik und -interpretation bei geothermischen Nutzungen beschäftigt.

Alexander Sperr, 1989–1991 Lehre zum Zentralheizungs- und Lüftungsbauer, Firma Josef Schneider, Stimpfach, 1991–1998 Studium der Gebäudetechnik an der Technischen Universität Berlin, 1996–1998 Studienpraktikum und studentischer Mitarbeiter bei Energie-System-Technik GmbH, Ingenieurbüro für Gebäudetechnik, Berlin, 1998–2001 Assistent im Studiengang Gebäudetechnik/Gebäudeklimatik an der Hochschule Biberach, 2002–2006 Lehrauftrag in Strömungstechnik an der Hochschule Biberach, 2001–2005 Dozent im Energiemanager-Lehrgang der IHK Akademie Schwaben für die Fächer Wärmebedarfsberechnung, Heizungstechnik, Solartechnik und Prozesswärme, 2001–2008 Technischer Laborleiter des Labors für Raumluft- und Klimatechnik an der Hochschule Biberach, 2008–2013 Fachgebietsleiter „Hauswärmetechnik, Lüftung und Klimatisierung“ beim BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. und bei der HEA – Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V. in Berlin, seit 2013 Referent Technik und Normung beim Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.

Thomas Storch, Dr.-Ing., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. 2014 promovierte er im Bereich Energietechnik mit dem Titel: „Grundlegende Untersuchungen zum Wirkprinzip von geothermischen Phasenwechselsonden“. Aktuelle Forschungsbeispiele sind das energetische Monitoring, die oberflächennahe Geothermie und Grubenwassernutzung, sowie allgemein die Untersuchung von Wärmetransportvorgängen mit Phasenänderungen in Thermosiphons und Heat Pipes.

Marc-Alexander Tilg, M. Sc., Lagerstätten- und Explorationsgeologe, seit 2015 mit dem Schwerpunkt Geothermie. Projektgeologe bei der Montanes Explorationsgesellschaft mbH.

Simone Walker-Hertkorn, Prof. Dr., ist seit mehr als 17 Jahren auf dem Gebiet der Geothermie tätig. Sie hat sich in dieser Zeit bundesweit einen Ruf als erfahrene Spezialistin für die Nutzung der Erdwärme erworben. Als Mitglied im Richtlinienausschuss der VDI 4640 sowie durch die Mitarbeit in verschiedenen Gremien und Arbeitskreise, zum Beispiel als Experte im Auftrag der DVGW Cert GmbH bei der W 120 Überprüfung, wirkt sie maßgeblich an der Formulierung von Qualitätsstandards in der Geothermie mit. Seit 2008 ist sie Professorin an der Fakultät Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Deggendorf mit dem Schwerpunkt Geothermische Energiesysteme. Der Fachbereich Geothermische Energiesysteme hat seinen Sitz am Wissenschaftszentrum in Straubing, wobei neben der Geothermie auch die Innovative Gebäudetechnik mit Schwerpunkt Wärmepumpe gelehrt wird.

Roland Wyss, Dr., Inhaber der gleichnamigen Beratungsfirma in Frauenfeld (Schweiz), arbeitet als Geologe und Experte in den Fachbereichen: Geothermie, Hydrogeologie und Ingenieurgeologie (u. a. Tunnelbau, Naturgefahren). Nach dem Studium und Assistenzjahren an der Universität Bern war Roland Wyss in verschiedenen Firmen im In- und Ausland tätig. Arbeitsgebiete waren vor allem: Erdöl- und Erdgasexploration, Tunnel- und Stollenbau, Geothermie, Grundwasserabklärungen, Naturgefahren, Baugrunduntersuchungen und Kartierarbeiten. Zudem war er während vier Jahren als Dozent für verschiedene Lehraufträge an der ETH Zürich tätig. Roland Wyss hat in den vergangenen dreißig Jahren Geothermieprojekte in verschiedenen Funktionen betreut. Er war von 2006 bis 2016 Geschäftsführer/Generalsekretär von GEOTHERMIE.CH.

Martina Ziefle, Univ.-Prof. Dr. phil., ist Inhaberin des Lehrstuhls für Communication Science an der RWTH Aachen University. Sie ist eine von vier Gründungsdirektorinnen des 2011 ins Leben gerufenen Human-Computer Interaktion Center. Die Expertise des Lehrstuhls liegt in der empirisch-experimentellen Modellierung der Akzeptanz von Technik sowie der Interaktion und Kommunikation zwischen Mensch und Technik. Die Forschung zur Technikwahrnehmung konzentriert sich auf das Beschreiben, Quantifizieren und Modellieren kognitiver und emotionaler Fähigkeiten der Endkunden, ihre Wahrnehmung und Akzeptanz von Technologie in Abhängigkeit vom Technologietyp und dem Nutzungskontext. Auch werden neue digital unterstützte Kommunikationsformen sowie Interfacegestaltung unter Berücksichtigung individueller, rollen-, geschlechts- und kulturbezogener Bedarfe untersucht. Von besonderer Bedeutung für betriebene Akzeptanzforschung sind gesellschaftlich hochrelevante, aber in ihrer Bewertung stark variierende, und umstrittene Technologien (z. B. Mobilfunktechnologie, Tiefe Geothermie, Informations- und Kommunikationstechnologien, die im häuslichen Umfeld integriert werden), für die Akzeptanzkartographien erstellt werden. Diese auf menschlichen Wahrnehmungsurteilen

basierenden Modelle erlauben verschiedene bei Technologien gleichzeitig wahrgenommene Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen und menschliche Entscheidungen zu simulieren.

Roman Zorn, Dr. rer. nat., Diplom-Geologe. Langjährige Erfahrung in angewandter Forschung in der oberflächennahen und der tiefen Geothermie. Seit 2006 European Institute für Energieforschung (EIFER) in Karlsruhe, Direktor Geo-Labore. Partner der enOware GmbH.

Inhaltsverzeichnis

1	Geothermie – Ein kurzer Abriss	1
	Willi Freeden und Clemens Heine	
1.1	Schalengestalt der Erde	3
1.2	Wärmepotential der Erde	4
1.3	Geschichte der Geothermie	6
1.4	Arten geothermischer Reservoirs und Systeme	7
1.4.1	Klassifikation nach der Temperatur	7
1.4.2	Klassifikation nach der Tiefe	8
1.5	Explorationsmethoden und -Datensysteme	12
1.6	Modellierung von Reservoirmodellen	16
1.7	Nutzung der Erdwärme	17
1.8	Vorteile und Nachteile der Geothermie	18
1.9	Fazit	20
1.10	Ausblick	20
	Literatur	21
2	Bedeutung der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien	23
	Björn-Martin Kurzrock und Tillman Gauer	
2.1	Immobilienbestand in Deutschland	24
2.1.1	Gebäudearten und -kategorien	25
2.1.2	Gebäudetypologien	27
2.1.3	Energieeffizienz von Gebäuden	27
2.2	Energetische Anforderungen, Vorgaben und Anreize	31
2.2.1	Anforderungen und Vorgaben auf Bundes- und Länderebene	31
2.2.2	Förderprogramme auf Bundesebene	31
2.2.3	Ergänzende Instrumente von Bundesländern und Kommunen	32
2.3	Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren	34
2.3.1	Wärmebedarf	34

2.3.2	Wärmerzeugung	35
2.3.3	Wärmeverteilung/Wärmeübertragung	37
2.3.4	Wärmespeicher	38
2.3.5	Vom Gebäude zum Quartier	39
2.3.6	Zwischenfazit: Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren	51
2.4	Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien	52
2.4.1	Stärken	52
2.4.2	Schwächen	54
2.4.3	Chancen	55
2.4.4	Risiken	58
2.4.5	Zwischenfazit: Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien	60
2.5	Zusammenfassung und Ausblick	62
	Literatur	63
3	Geologische und geophysikalische Untersuchungen	65
	Kord Ernstson	
3.1	Einführung	67
3.2	Tiefe und Oberflächennahe Geothermie	69
3.3	Geologie und Hydrogeologie in der Oberflächennahen Geothermie	72
3.3.1	Kartenwerke	73
3.3.2	Das digitale Geländemodell (DGM)	81
3.3.3	Etwas Wärme-Physik: Heizung, Kühlung, Speicherung von Wärme und Kälte	90
3.3.4	Offene Systeme	92
3.3.5	Geschlossene Systeme	94
3.3.6	GRT (Geothermal Response Test), geologische und hydrogeologische Rechenmodelle und geologische Risiken	96
3.3.7	Die Fälle Staufen und Böblingen	98
3.4	Wichtige Prinzipien der geophysikalischen Messverfahren	100
3.4.1	Charakteristische Unterschiede bei den Verfahren	100
3.4.2	Erkundungstiefen	105
3.4.3	Auflösungsvermögen	106
3.4.4	Signal-Rausch-Verhältnis S/R	108
3.4.5	Datenverarbeitung	110
3.4.6	Von der Messung zur (hydro)geologischen Aussage: Mehrdeutigkeit geophysikalischer Messungen	118
3.5	Petrophysikalische Parameter	119
3.5.1	Geoelektrik	120
3.5.2	Seismik	122
3.5.3	Bodenradar (Georadar, GPR, <i>ground penetrating radar</i>)	123
3.5.4	Gravimetrie	123

3.5.5	Geomagnetik	125
3.5.6	Radiometrie	126
3.5.7	Geothermische Parameter	127
3.6	Die Messverfahren	128
3.6.1	Geoelektrik	130
3.6.2	Seismik	149
3.6.3	Bodenradar	164
3.6.4	Gravimetrie	166
3.6.5	Geomagnetik	170
3.6.6	Radiometrie	173
3.6.7	Geothermie	175
3.6.8	Neuentwicklungen	179
3.6.9	Bohrlochgeophysik	180
3.7	Geophysik und der Aquifer	180
3.7.1	Porosität	181
3.7.2	Permeabilität/Transmissivität	181
3.7.3	Kluftporosität und Permeabilität/Transmissivität im Festgestein	184
3.7.4	Grundwasserspiegel	186
3.7.5	Grundwasserfließrichtung und Fließgeschwindigkeit	189
3.7.6	Generelle Grundwasserbewegungen – indirekter Zugang	190
3.8	Geophysik und geologisch-geotechnische Risiken bei der Oberflächennahen Geothermie	191
3.8.1	Tektonik	191
3.8.2	Karst, Verkarstung	194
3.8.3	Salinar: Anhydrit und Gips	196
3.8.4	Hangrutsche	198
3.8.5	Hohlraumortung	199
3.8.6	Altlasten	202
3.9	Geophysik als Dienstleistung	206
3.9.1	Ingenieurgeophysik	206
3.9.2	Unzulänglichkeiten – ein geophysikalisches Beispiel	207
3.9.3	Fehlerquellen und Fehler	209
3.9.4	Ausschreibungen, Berichte und Gutachten	211
3.9.5	Geophysik und Bohrungen	211
3.9.6	Zum Thema Wüschelrute, Erdstrahlen und Verwandtes	213
3.10	Schlussbemerkungen	215
	Literatur	216
4	Innovative Explorationsmethoden in der Gravimetrie und Reflexionsseismik	221
	Christian Blick, Willi Freeden und Helga Nutz	
4.1	Einleitung	222

4.2	Grundlagen der gravimetrischen Exploration	225
4.3	Grundlagen der seismischen Tomographie	226
4.4	Multiskalentechniken mittels Wavelets	228
4.5	Postprocessing im Explorationsgebiet E	232
4.6	Dekorrelation von Signaturen in E	239
4.7	Tiefendetektion geologischer Formationen lokal in E	246
4.8	Lokale Multiskalenverbesserung in der Bohrlochumgebung	249
4.9	Inverses Problem der Ermittlung der Dichte in E aus Potentialdaten des Komplements von E	251
4.10	Zusammenfassung und Ausblick	253
	Literatur	255
5	Mathematische Lösungspotentiale, Strategien und Dilemmata	257
	Willi Freeden und Helga Nutz	
5.1	Einleitung	258
5.2	Grundgleichungen in der Exploration	259
	5.2.1 Gravimetrie	260
	5.2.2 Geomagnetfeldbestimmung	260
	5.2.3 Akustisch basierte seismische Tomographie (Helmholtz-Ansatz)	261
	5.2.4 Akustisch basierte seismische Tomographie (d'Alembert-Ansatz)	262
5.3	Strategien und Dilemmata	264
	5.3.1 Regularisierung und Fehlerspezifikation	267
	5.3.2 Stetige und diskrete Regularisierung	270
	5.3.3 Dilemmata und Methodologien	271
	5.3.4 Grobe Eingruppierung der Regularisierungsmethoden	272
5.4	Zusammenfassung und Ausblick	276
	Literatur	278
6	Auswirkungen der Grundwasserbeschaffenheit auf Bau und Betrieb Oberflächennaher Geothermieranlagen	281
	Lena Eggeling und Jochen Schneider	
6.1	Einleitung	282
6.2	Offene Systeme	283
	6.2.1 Probenahme und Analytik	283
	6.2.2 Einfluss der Wasserqualität auf den Betrieb	284
6.3	Geschlossene Systeme	286
	6.3.1 Analysenkonzepte zur Charakterisierung sulfathaltiger Gesteine	286
	6.3.2 Chemische Zusammensetzung von Wärmeträgerfluiden	289
	6.3.3 Temperaturinduzierte Änderungen der Chemie	290
	Literatur	292

7	Risikomanagement bei Planung, Bau und Betrieb von Geothermieranlagen	295
	Hans Jacobi und Thomas Neu	
7.1	Einführung	296
7.2	Risikomanagement: Definition und Methoden	296
7.3	Identifikation potenzieller Risiken in der Oberflächennahen Geothermie	298
7.4	Bewertung der Risiken	300
7.5	Maßnahmen zur Verringerung der Risiko-Eintrittswahrscheinlichkeit und zur Schadensminimierung	312
7.6	Schlussbetrachtung	321
	Literatur	321
8	Rechtliche und politische Rahmenbedingungen für oberflächennahe Geothermieprojekte	323
	André Deinhardt und Gregor Dilger	
8.1	Rechtliche Bestimmungen	325
8.1.1	Wasserrechtliche Genehmigung	325
8.1.2	Bergrecht	326
8.2	Technische Regelwerke	326
8.2.1	DVGW W120-2	326
8.2.2	VDI 4640	326
8.3	Wärmemarkt als Rahmen	327
8.3.1	Was bewegt den Markt?	328
8.4	Förderung der Geothermie als Erneuerbare Energie	328
8.4.1	Erneuerbare-Energie-Wärmegesetz	329
8.4.2	Marktanreizprogramm (MAP)	329
8.4.3	Marktanreizprogramm (MAP) – KfW-Teil	330
8.4.4	Energieeinsparverordnung (EnEV)	330
8.4.5	Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE)	331
8.4.6	Anreizprogramm Energieeffizienz	331
8.4.7	Erneuerbare-Energien-Richtlinie	332
8.5	Wahrnehmung von Geothermie in der Öffentlichkeit	332
	Literatur	333
9	Oberflächennahe Geothermie und Bergrecht	335
	Walter Frenz	
9.1	Problemaufriss	336
9.2	Relevanz des Bergrechts	337
9.2.1	Nur bei nicht grundstücksbezogener Gewinnung	337
9.2.2	Gewerbliche und wissenschaftliche Aufsuchung	338
9.2.3	Speicherung und Entnahme von Wärmeenergie	339
9.2.4	Grundwasser als Trägermedium	339
9.2.5	Bohrungen	339

9.3	Bergrechtliche Haftung für Schäden aus Geothermiebohrungen	342
9.3.1	Reichweite	342
9.3.2	Bohrbezug	342
9.3.3	Kausalität	344
9.3.4	Sozialadäquanz	345
9.3.5	Schutzzweck	346
9.3.6	Zwischenergebnis	347
9.4	Betriebsplanpflicht	347
9.5	Verbindung zu Fracking	349
9.6	Gesamtfazit	350
	Literatur	350
10	Anforderungen an ein Geothermieprojekt aus der Sicht eines Bauherren	353
	Klaus Bächerl und Simone Walker-Hertkorn	
10.1	Einführung	354
10.2	Auswahl und Beauftragung eines geothermischen Fachplaners	355
10.2.1	Zeitpunkt der Beauftragung	355
10.2.2	Vergabe und Vertragsgestaltung	357
10.3	Projektablauf	359
10.3.1	Grundlagenermittlung, Machbarkeitsprüfung	359
10.3.2	Vorplanung	360
10.3.3	Entwurfsplanung	363
10.3.4	Genehmigungsplanung	364
10.3.5	Ausführungsplanung	364
10.3.6	Vergabe der Leistungen	364
10.3.7	Ausführung	365
10.3.8	Dokumentation	366
10.3.9	Zusammenfassung	367
10.4	Optimale Einsatzgebiete der Oberflächennahen Geothermie	367
	Literatur	369
11	Bohrtechnik für oberflächennahe geothermische Energiequellen	371
	Reiner Homrighausen	
11.1	Oberflächennahe Bohrungen und ihre Definition	373
11.2	Die Projekte gestern, heute und morgen	374
11.3	Die heutige moderne Technik	375
11.3.1	Das Bohrgerät, die Bohranlage	375
11.3.2	Das Bohrzubehör	378
11.3.3	Das Spülungstanksystem	382
11.3.4	Das Verpresssystem/die Kompaktmischanlage	383
11.3.5	Benötigter Platzbedarf	384
11.3.6	Die Logistik während der Bohrarbeiten	386
11.4	Die Bohrverfahren	386
11.4.1	Das Rotary-Druckspülbohrverfahren ohne Hilfsverrohrung	387

11.4.2	Das Rotary-Druckspülbohrverfahren mit gleichzeitiger Verrohrung	390
11.4.3	Das Im-Loch-Hammer-Bohrverfahren mit Luft als Spülungsmedium	392
	Literatur	394
12	Die Anforderungen der Wärmepumpe an die Wärmequelle	395
	Martin Sabel und Alexander Sperr	
12.1	Die Wärmepumpe	396
12.2	Energieeffizient Heizen und Kühlen	398
12.2.1	Energieeffizienz – was ist das?	398
12.2.2	Energieeinsparverordnung (EnEV)	398
12.2.3	Energieeffizienz von Wärmepumpen	400
12.2.4	Kühlen mit Wärmepumpen	404
	Literatur	408
13	Geothermische Phasenwechselsonden als Wärmeentzugssystem	409
	Thomas Storch, Thomas Grab und Ulrich Groß	
13.1	Einleitung	410
13.2	Funktionsweise einer geothermischen Phasenwechselsonde	411
13.2.1	Aufbau und Funktionsweise von Heat Pipes und Thermosiphons	411
13.2.2	Aufbau und Funktionsweise einer Phasenwechselsonde	413
13.2.3	Vor- und Nachteile im Vergleich zu Flüssigkeitszirkulationssonden	414
13.3	Anwendungsbereiche von Thermosiphons bzw. Fallfilmverdampfern	415
13.3.1	Geschichtliche Entwicklung von Thermosiphons in der Oberflächennahen Geothermie	416
13.3.2	Anwendungsbeispiele von Thermosiphons und Fallfilmverdampfern	417
13.4	Auslegungsgrundlagen und physikalische Grundlagen	420
13.4.1	Arbeitsstoffe	420
13.4.2	Leistungsgrenzen und Arbeitsbereich	421
13.4.3	Anfahrverhalten und zyklischer Wärmeentzug	427
13.4.4	Temperaturverteilung entlang der Sonde	430
13.4.5	Füllmenge und statische Dampfdrucksäule	432
13.4.6	Sondeninterne Regeneration	435
13.4.7	Energetische Betrachtung	438
13.4.8	Simulationen zum Einfluss des Benetzungsgrades auf den übertragbaren Wärmestrom	441
13.5	Schlussbemerkung und Ausblick	444
	Literatur	445

14 Ausbau der Bohrung zu geothermischen Quellen	451
Frank Burkhardt	
14.1 Einleitung	452
14.2 Offene Systeme	452
14.2.1 Brunnenanlagen	452
14.3 Geschlossene Systeme	458
14.3.1 Erdwärmesonden Duplex und Koaxial	458
14.3.2 Koaxiale Speichersonden	470
14.3.3 Direktverdampfersonden	473
Literatur	476
15 Thermisch aktivierte Bauteile	477
Sylvia Kürten, David Koppmann und Renate Pechnig	
15.1 Einleitung	478
15.2 Typen thermisch aktivierter Bauteile	479
15.2.1 Energiepfähle	479
15.2.2 Energiewände und Bodenplatten	484
15.2.3 Thermische Aktivierung von Tunnelbauwerken	487
15.2.4 Spezialexsysteme thermisch aktivierter Bauteile	491
15.3 Besondere Randbedingungen bei thermisch aktivierten Bauteilen	494
15.3.1 Randbedingungen für den Anlagenbetrieb	494
15.3.2 Randbedingungen für die Bemessung	495
15.3.3 Urban Heat Island Effect	498
15.3.4 Einfluss des Grundwassers	499
15.4 Auslegung und Bemessung thermisch aktivierter Bauteile	500
15.4.1 Berechnungsansätze für Energiepfähle	501
15.4.2 Berechnungsansätze für flächige thermisch aktivierte Bauteile	504
Literatur	507
16 Nutzung oberflächennaher Erdwärme aus einem erdgedeckten Flüssiggastank mit einer Wärmepumpe, angetrieben durch ein Blockheizkraftwerk	513
Thomas Heinze	
16.1 Einleitung	514
16.2 Aufbau des Demonstrators	515
16.2.1 Komponentenauswahl	515
16.2.2 Inbetriebnahme und Einfahren der Wärmepumpe mit Wasser	516
16.2.3 Erster Testlauf mit Regenwasserzisterne als Erdwärmesonde	516
16.2.4 Zweiter Testlauf mit Luft-Wärmetauscher	517
16.2.5 Sicherheitstechnik	517
16.2.6 Kondensatrückführung in den Gastank	518
16.3 Erste Versuchsläufe mit Flüssiggas aus dem Erdtank	518
16.3.1 Optimierung der Gasentnahme am Erdtank	518
16.4 Ausblick	522

17 Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken	523
Thomas Grab, Thomas Storch und Ulrich Groß	
17.1 Einleitung und geschichtliche Entwicklung	524
17.2 Aufbau und Funktionsweise einer Grubenwasseranlage	525
17.2.1 Nutzungsarten	526
17.2.2 Vor- und Nachteile im Vergleich zu alternativen Heiz- und Kühlkonzepten	530
17.3 Planung, Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage	532
17.3.1 Planung	533
17.3.2 Umsetzung und Betrieb einer Grubenwasseranlage	539
17.3.3 Bergrecht	540
17.3.4 Wasserchemie	542
17.3.5 Öffentlichkeitswirksame Darstellung	547
17.4 Übersicht zur weltweiten geothermischen Grubenwassernutzung	548
17.4.1 Entwicklung und aktueller Stand von Grubenwasseranlagen . . .	548
17.4.2 Ausgewählte Beispiele	561
17.5 Fazit	575
Literatur	576
18 Geophysikalische Bohrlochmessungen in Geothermiebohrungen und -sonden	587
Karl-Norbert Lux	
18.1 Einleitung	588
18.2 Bohrlochmesstechnische Kontrollen – Zielsetzung	589
18.3 Messtechnische Kontrollmöglichkeiten	590
18.3.1 Allgemeines	590
18.3.2 Nachweis der physischen Existenz von Abdichtungen	594
18.3.3 Nachweis der hydraulischen Wirksamkeit von Abdichtungen . .	602
18.4 Optimierung der Kontrollmöglichkeiten	610
Literatur	611
19 Geothermische Messungen für die oberflächennahe Geothermie	613
Jens-Uwe Kühl und Clemens Lehr	
19.1 (Geo-)Thermal Response Test (GRT/TRT)	614
19.1.1 Was ist ein GRT/TRT?	614
19.1.2 Messtechnik/Apparatur	615
19.1.3 Vorbereitung/Voraussetzungen	616
19.1.4 Messdurchführung	617
19.1.5 Auswertung der Messdaten	619
19.1.6 Ergebnisdarstellung/-Verwendung	625
19.2 Spezial-GRT/TRT	626
19.2.1 Enhanced (Geo-)Thermal Response Test (EGRT, ETRT)	626
19.2.2 GRT/TRT für Energiepfähle	628

19.2.3	GRT/TRT für horizontale Erdwärmekollektoren	630
19.3	Temperaturprofilmessungen	631
19.3.1	Allgemeines	631
19.3.2	Messtechnik	631
19.3.3	Verwendung und Interpretation der Ergebnisse	632
	Literatur	634
20	Messmethoden für Monitoring, Qualitätskontrolle und Beweissicherung bei Erdwärmesonden	637
	Johannes Gottlieb, Marc-Alexander Tilg, Daniel Fischer, Roman Zorn und Simeon Meier	
20.1	Einleitung	638
20.2	Schadensvermeidung im Rahmen der geologischen Bewertung und EWS-Planung	639
20.3	Komponenten der Qualitätssicherung während und nach EWS-Installation	641
20.3.1	Erfassung geometrischer Parameter der EWS	641
20.3.2	Qualitätsprüfung der Zementierung	642
20.3.3	Ermittlung von Temperatur und Entzugsleistung	643
20.4	Methoden der Informationsgewinnung	645
20.4.1	Messsonden	645
20.4.2	Messmolche und Messkugeln	648
20.4.3	Langzeitmonitoring und erweiterter Thermal Response Test mit Messkugeln als neue Qualitätssicherungskonzepte	650
	Literatur	651
21	Qualitätssicherung und Zertifizierung	653
	Christine Buddenbohm	
21.1	Einleitung	654
21.2	Mittel der Qualitätssicherung	655
21.3	Qualitätssicherung bei Wärmepumpenherstellern	656
21.3.1	Gütesiegel	656
21.4	Qualitätssicherung bei Bohrunternehmen	659
21.4.1	Grundlagen	659
21.4.2	Zertifizierung von Bohrunternehmen nach W 120	660
21.4.3	Zeichen „Fremdüberwachtes Bohrunternehmen für Erdwärmesonden“	665
21.5	Qualitätssicherung bei Wärmepumpeninstallateuren	667
21.6	Qualitätssicherung bei Architekten und Fachplanern	668
	Literatur	669

22	Risikopotenziale der Oberflächennahen Geothermie	671
	Ingo Sass	
22.1	Die 5-M-Methode	673
22.1.1	Mensch	673
22.1.2	Methode	674
22.1.3	Material	675
22.1.4	Maschinen	676
22.1.5	Medium	676
22.1.6	Fazit	677
22.2	Geologische Risiken	677
22.2.1	Quellfähige und setzungsempfindliche Gesteine	677
22.2.2	Lösliche Gesteine	678
22.2.3	Überkonsolidierte und porenwasserdruckanfällige Gesteine	679
22.2.4	Tektonik	679
22.2.5	Massenbewegungen	680
22.2.6	Erdfall-, Senkungs- und Bergsenkungsgebiete	680
22.2.7	Gasaustritte	680
22.3	Hydrogeologische Risiken	681
22.3.1	Gespanntes und artesisch gespanntes Grundwasser	681
22.3.2	Stockwerke	682
22.3.3	Hydrochemische Gradienten	682
22.3.4	Entgasung	683
22.3.5	Wasserqualität	684
22.4	Umwelttechnische Risiken	684
22.4.1	Altlasten und Altablagerungen	684
22.4.2	Bergbau, Bergbaufolgeschäden	685
22.5	Risiken beim Sondeneinbau	685
22.6	Betriebsrisiken	687
	Literatur	688
23	Kommunikation und Akzeptanz	691
	Anna Borg, Eva-Maria Jakobs und Martina Ziefle	
23.1	Handlungsbedarf	692
23.2	Akzeptanz innovativer/neuer Technologien	695
23.3	Kommunikation	699
23.3.1	Kommunikationsansätze für Geothermie	699
23.3.2	Kommunikationsstrategien für Geothermieprojekte	700
23.3.3	Kommunikationsgrundsätze	702
23.3.4	Kommunikationstools	703
23.3.5	(Digitale) Medien	706
23.3.6	Krisenkommunikation	707
23.4	Fazit	708
	Literatur	709

24	Arbeits- und Gesundheitsschutz	715
	Mathias Bauer	
24.1	Vorbemerkungen zu Arbeits- und Gesundheitsschutz	716
24.2	Gründe/Argumente für Arbeits- und Gesundheitsschutz	719
24.3	Grundlagen der Arbeits- und Sicherheitswissenschaft	720
24.4	Arbeits- und Gesundheitsschutzrecht	723
24.5	Gefährdungen und Belastungen bei Oberflächennaher Geothermie	731
24.6	Arbeits- und Gesundheitsschutzmanagementsystem	735
	Literatur	737
25	Oberflächennahe Geothermie in Österreich	739
	Johann Goldbrunner	
25.1	Einleitung	740
25.2	Rechtliche Grundlagen	741
25.3	Probleme bei der Herstellung von Erdwärmesonden	741
	25.3.1 Geologisch bedingte Ursachen	741
	25.3.2 Technisch bedingte Ursachen	743
25.4	Konflikt mit wasserwirtschaftlichen Interessen	744
25.5	Anzahl der Erdwärmesonden in Österreich	745
	25.5.1 Erdgekoppelte Heizungs-WP nach Leistungssektoren	746
	Literatur	752
26	Oberflächennahe Geothermie in der Schweiz	755
	Katharina Link und Roland Wyss	
26.1	Einleitung	756
26.2	Bevölkerung	757
26.3	Geologie, Auswirkung auf Nutzung	758
26.4	Historische Entwicklung der Oberflächennahen Geothermie	759
26.5	Vollzugshilfen, technische Normen	759
	26.5.1 BAFU-Vollzugshilfe «Wärmenutzung aus Boden und Untergrund»	762
	26.5.2 SIA-Norm 384/6 Erdwärmesonden	762
	26.5.3 SIA-Norm 384/7 Grundwasserwärmenutzung	763
26.6	Qualitätssicherung: Prüf- und Anlaufstellen, Zertifikate, Gütesiegel	764
	26.6.1 Qualitätssicherung in der Schweiz	764
	26.6.2 Schweizer Wärmepumpen-Testzentrum	765
	26.6.3 Wärmepumpendoktor	765
	26.6.4 FWS Fachpartner mit Zertifikat	766
	26.6.5 Wärmepumpen-Gütesiegel	766
	26.6.6 Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen	766
	26.6.7 Wärmepumpen-System-Modul	767
	26.6.8 Workshops Qualitätskontrolle, Informationsaustausch	768
26.7	Rechtsgrundlagen	770

26.8	Fördermaßnahmen	771
26.9	Geothermische Energienutzung	771
26.10	Aktueller Stand der Oberflächennahen Geothermiebranche	774
26.11	Forschung	774
26.12	Nachhaltigkeit im urbanen Bereich	775
26.13	Künftige Entwicklung	776
	Literatur	777
27	Oberflächennahe Geothermienutzung weltweit: regionale Trends und Innovationen	779
	Marietta Sander	
27.1	Einführung	780
27.2	Oberflächennahe geothermische Nutzungsformen weltweit	781
27.3	Markt- und Technologietrends – regionale Schlaglichter	783
27.3.1	Afrika	784
27.3.2	Amerika	784
27.3.3	Südamerika, Zentralamerika und Karibik	787
27.3.4	Europa	789
27.3.5	Asien	791
27.4	Herausforderungen und Lösungen	793
27.5	Schlussbemerkung	794
27.6	Danksagung	794
	Literatur	795
28	Ausblick: Schlüsselemente, Herausforderungen, Chancen und Perspektiven	797
	M. J. Bauer, W. Freeden, H. Jacobi und T. Neu	
28.1	Arten der Nutzung in der oberflächennahen Geothermie	799
28.2	Vorteile oberflächennaher Geothermie	800
28.3	Geothermische Energie als erneuerbare Energiequelle	800
28.4	Herausforderungen an oberflächennahe/tiefe Geothermie	801
28.5	Schlüsselemente bei der Entwicklung der oberflächennahen/tiefen Geothermie	803
	Literatur	804
	Stichwortverzeichnis	807

Willi Freeden und Clemens Heine

Inhaltsverzeichnis

1.1 Schallengestalt der Erde 3

1.2 Wärmepotential der Erde 4

1.3 Geschichte der Geothermie 6

1.4 Arten geothermischer Reservoirs und Systeme 7

 1.4.1 Klassifikation nach der Temperatur 7

 1.4.2 Klassifikation nach der Tiefe 8

1.5 Explorationsmethoden und -Datensysteme 12

1.6 Modellierung von Reservoirmodellen 16

1.7 Nutzung der Erdwärme 17

1.8 Vorteile und Nachteile der Geothermie 18

1.9 Fazit 20

1.10 Ausblick 20

Literatur 21

Zusammenfassung

Geothermie setzt sich entsprechend seiner griechischen Herkunft aus zwei Worten $\gamma\eta$ = Erde und $\Theta\epsilon\rho\mu\acute{o}\varsigma$ = warm zusammen. Geothermie bezeichnet also etymologisch die in der Erde auftretende Wärme.

Ziel dieses Kapitels ist es, einen kurzen Abriss des gegenwärtigen Facettenspektrums der Geothermie zu liefern. Dazu gehört neben der Oberflächennahen auch

Willi Freeden (✉)
Lehr- und Forschungsgebiet „Geomathematik“, TU Kaiserslautern, Paul-Ehrlich-Straße 26,
67663 Kaiserslautern, Deutschland
e-mail: freeden@mathematik.uni-kl.de

Clemens Heine
Neue Schloßstraße 34, 69117 Heidelberg, Deutschland
e-mail: clemens.heine@birkhauser-science.com

die Tiefe Geothermie, deren detaillierte Darstellung sich zwar im „Handbuch Tiefe Geothermie“ (Springer Spektrum, 2014) findet, hier aber dennoch hinsichtlich der Klassifizierung und der unterschiedlichen Energie- und Nutzungsformen Berücksichtigung finden soll.

Im Einzelnen schlüsselt sich das Kapitel wie folgt auf: Unter Zugrundelegung des Schalenmodells der Erde (vgl. [Abschn. 1.1](#)) beschäftigt sich [Abschn. 1.2](#) mit den Standardschätzangaben des Wärmedargebots und -Potenzials der Erde und der omnipräsenten geothermischen Ressourcenbasis. In [Abschn. 1.3](#) finden einige wesentliche Etappen der Geschichte geothermischer Bewusstwerdung und Energienutzung Erwähnung. [Abschn. 1.4](#) liefert die gängigen Klassifikationen tiefer und oberflächennaher Reservoirs sowie geothermischer Systeme hinsichtlich Temperatur und Tiefe. [Abschn. 1.5](#) widmet sich den heute in der Exploration verfügbaren Datentypen aus Gravitation, Geomagnetik, Seismik, Thermoelastizität und Wärmefluss sowie den zugehörigen Explorationsmethoden in Kurzdarstellung. Es schließt sich eine Auflistung der häufigsten bei der Modellierung verwendeten Reservoirmodelle (in [Abschn. 1.6](#)) an. [Abschn. 1.7](#) hat als Gegenstand die Nutzung der Erdwärme in Oberflächennähe – als auch Tiefer Geothermie. Der Beitrag schließt mit der Gegenüberstellung von Vorteilen und Nachteilen der Oberflächennähe als auch der Tiefen Geothermie (in [Abschn. 1.8](#)), einem Fazit in Form von Kernaussagen über die Geothermie (in [Abschn. 1.9](#)) und einem kurzen Ausblick (in [Abschn. 1.10](#)) über den zu erwartenden Anteil von Geothermie am künftigen Energiemix.

Schlüsselwörter

Oberflächennahe und Tiefe Geothermie · Geschichte · Klassifikation · Exploration · Modellierung · Vorteile · Nachteile · Perspektiven

Als Erneuerbare Energien oder regenerative Energien werden Energieträger bezeichnet, die der Menschheit unerschöpflich zur Verfügung stehen oder sich verhältnismäßig schnell erneuern. Damit grenzen sie sich von den fossilen Energieträgern ab. Zu den erneuerbaren Energiequellen zählen Bioenergie, Wasserkraft, Meeresenergie, Sonnen-, Windenergie und eben auch Geothermie (Erdwärme).

Der Bedarf an erneuerbaren Energien wächst täglich – er bestimmt immer mehr die heutige Wirtschaftslage und -entwicklung. Dies wird unter anderem durch das gestiegene Umweltbewusstsein aufgrund des Klimawandels und durch die zunehmende Knappheit der fossilen Rohstoffe verursacht. Geothermie ist im Gesamtspektrum der erneuerbaren Energiequellen eine der vielversprechenden Energielieferanten. Bei der Energiegewinnung mittels geothermischer Anlagen wird die im zugänglichen Teil der Erdkruste gespeicherte Wärme erschlossen. Verwunderlich ist, dass die Nutzung der Erdwärme heutzutage eine im Bewusstsein der Öffentlichkeit weitgehend unbekannte Möglichkeit der Energieerschließung darstellt. Die häufig fehlende Aufmerksamkeit steht dabei in keinerlei Verhältnis zu

den potentiellen Möglichkeiten, die diese regenerative Energieform bietet: Der Wärmehalt der Erde würde unseren heutigen Weltenergiebedarf in der Tat für Millionen von Jahren decken. Mit menschlichen Maßstäben gerechnet sind also die in der Erde gespeicherten Energievorräte genauso unerschöpflich wie die der Sonne (vgl. auch Freedon 2015; Knappek 2016).

1.1 Schallengestalt der Erde

Der Erdkörper ist, idealisiert betrachtet, aus konzentrischen Kugelschalen aufgebaut (Abb. 1.1), die jeweils aus Materialien deutlich unterschiedlicher Dichte bestehen. Die Kugelschale mit der geringsten Dichte liegt am weitesten außen und wird als Erdkruste bezeichnet. Die Kugelschale mit der größten Dichte liegt im Zentrum des Erdkörpers und

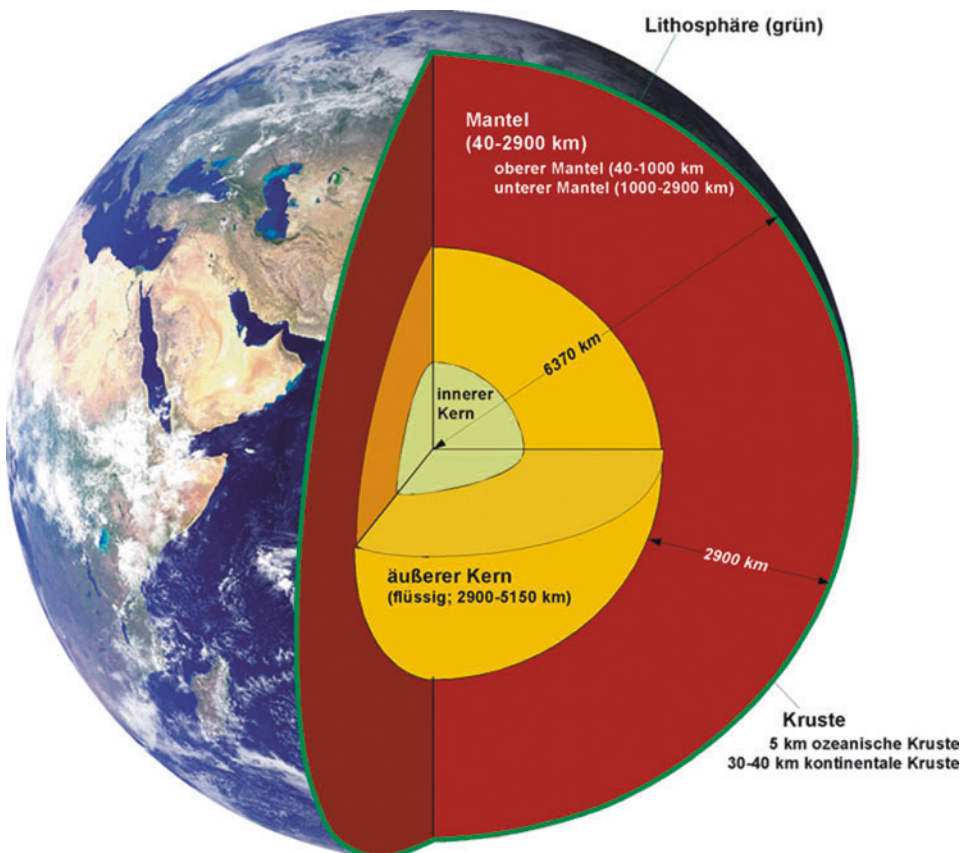


Abb. 1.1 Schalenförmigkeit der Erde inkl. Dicke- und Temperaturangabe

wird Erdkern genannt. Die Dichteschichtung im Erdkörper geht mit einer chemischen Differenzierung einher, d. h. jede Kugelschale hat eine charakteristische chemische Zusammensetzung. Der Kern hat einen Radius von mehr als 3400 km und besteht hauptsächlich aus Eisen und Nickel. Daran schließt sich nach außen der 2900 km mächtige Erdmantel aus Silikaten und -oxiden mit insgesamt hohem Anteil an Eisen und Magnesium an. Die äußere Hülle des Erdkörpers wird von der relativ dünnen (ca. 5–70 km) Kruste gebildet. Diese besteht ebenfalls vorwiegend aus Silikaten und Oxiden, jedoch mit geringerem Eisen- und Magnesiumanteil sowie einem erhöhten Anteil an Aluminium und anderen Elementen.

1.2 Wärmepotential der Erde

Nur ein Prozent unseres Erdkörpers ist weniger heiß als 1000 °C, von diesem einen Prozent ist wiederum nur ein Prozent weniger heiß als 100 °C. Allerdings ist diese Wärme jedoch nicht gleichmäßig in der Erde verteilt. Sie nimmt vom Erdkern zur Erdoberfläche hin stark ab. Die gängigen wissenschaftlichen Annahmen gehen davon aus, dass allein die oberen 10 km des Erdradius (von den insgesamt 6378 km) mit rund 100.000.000 EJ (Exajoule, 1 EJ = 10^{18} J) an Wärmeenergie das theoretische Potenzial zur mehr als 100.000fachen Deckung des gesamten aktuellen Energieverbrauchs der Erde (2010: ~505 EJ) bergen. Die Temperaturangaben (vgl. [Abb. 1.1](#)), aber vor allem die hohen Temperaturen im Erdmantel und Erdkern, unterliegen immer noch großen Schätzfehlern. Da die Erde im Inneren sehr heiß, außen jedoch relativ kühl ist, fließt aus der Erde ein kontinuierlicher Wärmestrom in Richtung Erdoberfläche. Grundsätzlich kann Wärme durch Wärmeleitung, Konvektion und elektromagnetische Strahlung transportiert werden. In der Kruste dominiert die Wärmeleitung, in Mantel und Kern dagegen die Konvektion (vgl. [Abb. 1.2](#)). Während des Aufstieges kühlt das Mantelmaterial ab. Die Mantelkonvektion ist ein im Sinne der Strömungsmechanik chaotischer Prozess und ein Antrieb der Plattentektonik.

Schätzangaben über das Wärmedargebot der Erde finden sich in [Stober 2014](#), wesentlich basierend auf Voruntersuchungen von [Ahrens 1995](#), [Armstead 1983](#), [1987](#) und [Clauser 2006](#), denen wir in unserem kurzen Abriss folgen werden. Der terrestrische Wärmestrom, also die von der Erde pro Quadratmeter abgegebene Leistung (Wärmestromdichte), wird dort mit durchschnittlich $0,065 \text{ W/m}^2$ (65 mW/m^2) angegeben. Neben dem Verlust an Wärme gewinnt die Erde auch wieder Wärme durch die Strahlung der Sonne. Sonnenlicht ist elektromagnetische Strahlung, die im Sonneninnern durch Kernfusion entsteht und in den Weltraum abgestrahlt wird. Im Jahr trifft nach [Stober \(2014\)](#) in Mitteleuropa eine Energiemenge von ca. 1000 kWh/m^2 auf die Erdoberfläche. Die zur Erde kommende Sonnenenergie wird durch Wolken, Luft und Boden zu 30 % wieder in den Weltraum reflektiert. Die restlichen 70 % werden absorbiert: rund 20 % von der Atmosphäre und 50 % vom Erdboden. Letztere werden überwiegend durch Wärmestrahlung und Konvektion wieder an die Lufthülle abgegeben. Ein kleiner Bruchteil der Sonneneinstrahlung wird dazu benutzt, um die Erdoberfläche zu erwärmen, mit einer Eindringtiefe

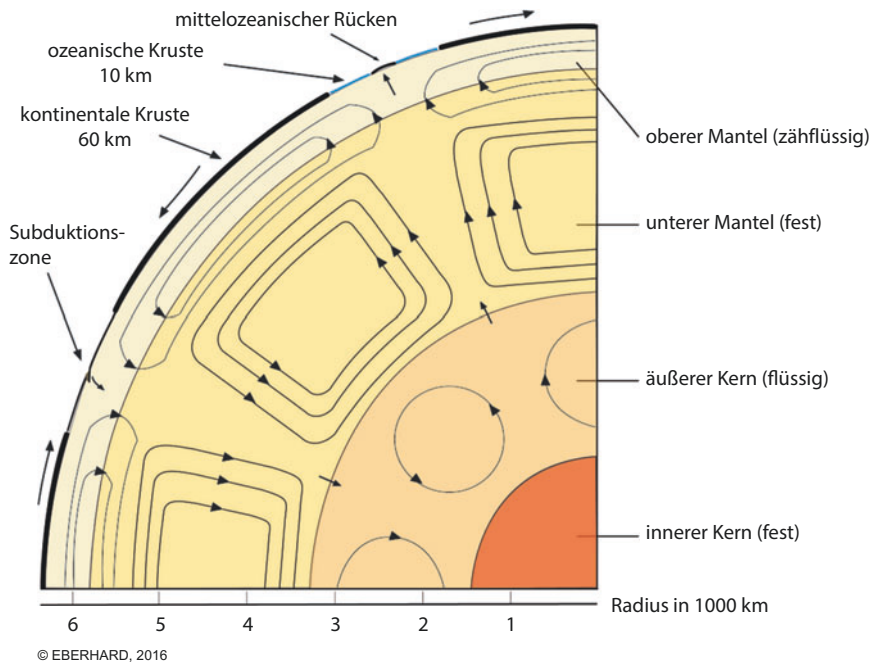


Abb. 1.2 Dynamik der Plattentektonik und Strömung in Kern und Mantel. (Eberhard 2016)

von einigen Dezimetern im Tagesgang und einigen Dekametern im Jahreszyklus. Daher hat die solare Energie auf das thermische Regime der Erde nur einen sehr beschränkten Einfluss.

In der Erdkruste nimmt die Temperatur im Mittel um etwa 3°C pro 100 m Tiefe zu (geothermischer Gradient). Der Wärmestrom aus der Erde, der an der Erdoberfläche gemessen wird, stammt nur zu einem kleinen Teil aus dem Erdmantel oder dem Erdkern (vgl. Abb. 1.1). Über 70 % werden in der relativ dünnen Erdkruste im Wesentlichen durch radioaktiven Zerfall „gebildet“ und nur knapp 30 % dieses Wärmestromes kommen aus dem Erdkern und dem Erdmantel. Der über die gesamte Erdoberfläche integrierte Erdwärmestrom ergibt die riesige thermische Leistung von 40 Mio. MW. Die Erdkruste ist unterschiedlich dick und stofflich sehr unterschiedlich zusammengesetzt. Die kontinentale Erdkruste besteht aus sauren Gesteinen und ist deutlich dicker als die aus basischem Material aufgebaute ozeanische Erdkruste. In sauren Gesteinen ist die Wärmeproduktion deutlich höher als in basischen Gesteinen. Die produzierte Wärmeenergie kann somit innerhalb der Erdkruste sehr stark differieren. Die ständige globale Wärmeproduktion der Erde, angegeben in Energie pro Zeit und Volumen ($\text{J}/(\text{s}\cdot\text{m}^3)$) durch radioaktiven Zerfall, ist in Ahrens (1995) mit $27,5\cdot 10^{12} \text{ W}$ angegeben. Der Wärmestrom wird an der Erdoberfläche als Wärmestromdichte q in $\text{J}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ gemessen. Die Wärmestromdichte setzt sich (Stober 2014, Stober und Bucher 2014) aus einem quasi konstanten

Strom aus dem Erdkern und Erdmantel sowie einem nicht konstanten Wärmestrom aus der Erdkruste zusammen. Die Wärmestromdichte kann sehr unterschiedlich sein; in der Theorie der Erdwärme spricht man auch hier von Anomalien. Große Anomalien treten sowohl auf den Kontinenten als auch unter den Ozeanen auf, insbesondere dort, wo die Wärme nicht nur thermisch durch das Gestein geleitet wird, sondern zusätzlich durch aufsteigende Fluide transportiert wird. Besonders große Anomalien verzeichnet man in Vulkangebieten (Wärmehotspots). Die mittlere Wärmestromdichte aus kontinentaler und ozeanischer Kruste beträgt 65 mW/m^2 bzw. 101 mW/m^2 . Das gewichtete Mittel berechnet sich daraus zu 87 mW/m^2 und dies entspricht einem globalen Wärmeverlust der Erde von $44,2 \cdot 10^{12} \text{ W}$ (Pollack et al. 1993). Demgegenüber steht die ständige Wärmeproduktion der Erde durch radioaktiven Zerfall, durch Reibungswärme u. a. Netto verliert die Erde Wärme in einer Größenordnung von etwa $1,4 \cdot 10^{12} \text{ W}$ (nach Clauser 2006). Der Abkühlungsprozess der Erde ist jedoch sehr langsam, denn Berechnungen ergaben, dass die Temperatur im Erdmantel in den letzten drei Milliarden Jahren sich nicht mehr als um $300\text{--}350^\circ\text{C}$ abgekühlt hat. Der gesamte Wärmeinhalt der Erde beträgt nach Armstead 1983 ca. $12,6 \cdot 10^{24} \text{ MJ}$. Die geothermische Ressourcenbasis der Erde ist demnach riesig und omnipräsent.

1.3 Geschichte der Geothermie

Seit jeher schätzen und nutzen Menschen Erdwärme dort, wo sie über eine Öffnung der Erdoberfläche direkt zugänglich ist. Prähistorische Siedlungen wurden z. B. in Japan um heiße Quellen und Vulkane gefunden. Die vulkanischen Regionen waren Anziehungspunkte, die zum Schwimmen, aber auch zum Heizen oder Kochen dienten. Häufig zitierte Beispiele dafür sind das Weltkulturerbe Pamukkale (Türkei) mit der antiken Stadt Hierapolis, aber auch die erste kommunale Wärmeversorgung durch Geothermie von 1332 im französischen Chaudes-Aigues (Cantal). Nach historischen Aufzeichnungen gab es in dieser Gegend bereits ab 1330 ein Netzwerk, das geothermisches Wasser an einige Häuser verteilte. Etwa zur gleichen Zeit wurden in Italien, in der Nähe von Volterra in der Toskana, kleine Pools von Brackwasser mit heißen Dampfvorkommen von über 100°C für das Extrahieren von z. B. Schwefel verwendet. Im 19. Jahrhundert erlaubten mehr Wissen und mehr Leistung eine bessere Nutzung der Quellen, die schließlich zum ersten industriellen Betrieb in Larderel (Frankreich) führten. Als Visionär erwies sich der Freiburger Bergrat und Mineraloge Carl Bernhard von Cotta (Abb. 1.3) mit der für seine Zeit geradezu revolutionären Bemerkung (vgl. auch Bauer et al. 2014b):

Sollten einst auf der mehr oder weniger bevölkerten Erde die Wälder so stark gelichtet und die Kohlenlager erschöpft sein, so ist es wohl denkbar, dass man die Innenwärme der Erde sich mehr und mehr dienstbar macht, dass man sie durch besondere Vorrichtungen in Schächten oder Bohrlöchern zur Oberfläche leitet und zur Erwärmung der Wohnungen oder selbst zur Heizung von Maschinen verwendet (von Cotta 1858).

Abb. 1.3 Carl Bernhard von Cotta (1808–1879)



Aber erst im 20. Jahrhundert wurde die von der Natur vorgegebene und damit standortgebundene Nutzung der Erdwärme auch bei geologisch nicht bevorzugten Lagen möglich. Die erste moderne Fernwärmeversorgung auf der Basis von Geothermie wurde in Reykjavik (Island) installiert. Netzwerke mit Erdwärme in Frankreich, Italien, Ungarn, Rumänien, Türkei, Georgien, China sind während der 1970er Jahre vornehmlich als Folge der Ölkrise in Angriff genommen worden. In der Umgebung von Paris und in der französischen Hauptstadt selbst werden seit den siebziger Jahren gut 250.000 Wohnungen geothermisch beheizt.

1.4 Arten geothermischer Reservoirs und Systeme

Geothermische Systeme können auf unterschiedliche Weise in Kategorien eingeteilt werden. Im Folgenden wird die Einteilung nach der Temperatur und nach der Tiefe vorgestellt.

1.4.1 Klassifikation nach der Temperatur

Länder mit aktivem Vulkanismus wie z. B. Island profitieren von Wärmereservoirs in geringer Tiefe, die sich durch ihre hohen Temperaturen von mehr als 150 °C auszeichnen. Diese Systeme werden Hochenthalpielagerstätten genannt. In der Tat wird heute die weltweite Stromerzeugung aus Geothermie durch die Nutzung von Hochenthalpielagerstätten

dominiert. Eine Ansammlung von Hochenthalpielagerstätten findet sich auch entlang des pazifischen Feuerrings.

Das Fehlen solcher Hochenthalpie-Reservoirs schließt aber nicht aus, dass eine Region über ein erhebliches geothermisches Potential verfügen kann. Dieses Potential äußert sich in der Form tiefer Reservoirs mit geringer Energie (höchstens 150 °C), sogenannten Niedrigenthalpielagerstätten. Eine ausführliche Kategorisierung geothermischer Reservoirs aufgrund ihrer Temperatur wird in Sanyal et al. 1995 präsentiert.

1.4.2 Klassifikation nach der Tiefe

Bei der Einteilung nach der Tiefe unterscheidet man zwischen Oberflächennaher Geothermie und Tiefer Geothermie (Abb. 1.4, 1.5):

Oberflächennahe Geothermie ist der Gegenstand dieses Handbuchs bestehend aus 26 weiteren Kapiteln und der Schlusswürdigung. Oberflächennahe Geothermie ist charakterisiert durch Bohrungen mit einer maximalen Tiefe von 400 m. Dabei lässt sich festhalten, dass aus geologischer Sicht jedes Grundstück für eine Erdwärmenutzung geeignet ist. Jedoch müssen technische (vgl. z. B. Kap. 10 bis 16 dieses Handbuchs für nähere Details), rechtliche (vgl. Kap. 8, 9), wirtschaftliche (vgl. z. B. Kap. 2, 7, 10 sowie Kap. 19 bis 22) und Arbeits- und Gesundheitsschutz gemäß (vgl. Kap. 24) Aspekte beachtet werden.

Oberflächennahe Geothermie vollzieht sich unter den Zwängen einer niedrigen Temperatur. Dies macht in der Regel den Einsatz einer Wärmepumpe unerlässlich, d. h. die Anhebung der geothermisch erzielbaren Temperaturen von häufig wenig mehr als 10 °C erfolgt über eine Wärmepumpe, die durchweg mit Strom betrieben wird. Wegen der Kostspieligkeit von Strom wird daher im Neubaubereich bereits im Vorfeld auf die Vorteilhaftigkeit der Senkung des Wärmebedarfs, z. B. durch Wärmedämmmaßnahmen geachtet.

Die Nutzung der Erdwärme erfolgt mittels Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, Energiepfählen oder Wärmebrunnenanlagen. Ihre Charakterisierung erfolgt in dieser Einführung nur in grob skizzierender Weise (für eine detaillierte Betrachtung sei auf die Kap. 10 bis 16 verwiesen):

- Erdwärmesonden sind in Bohrungen verbrachte Rohre, in denen eine Wärmeträgerflüssigkeit zirkuliert. Als Wärmeträgerflüssigkeit werden verschiedene Fluide zumeist mit Wasser verwendet.
- Erdwärmekollektoren sind aus Rohren bestehende Wärmeüberträger, deren Verlegung horizontal im Erdreich unterhalb der örtlichen Frostgrenze erfolgt.
- Bei Energiepfählen wird in armierten Betonpfählen ein Rohrnetz eingebracht, in denen eine Wärmeträgerflüssigkeit in einem geschlossenen Kreislauf zur Wärmepumpe zirkuliert.

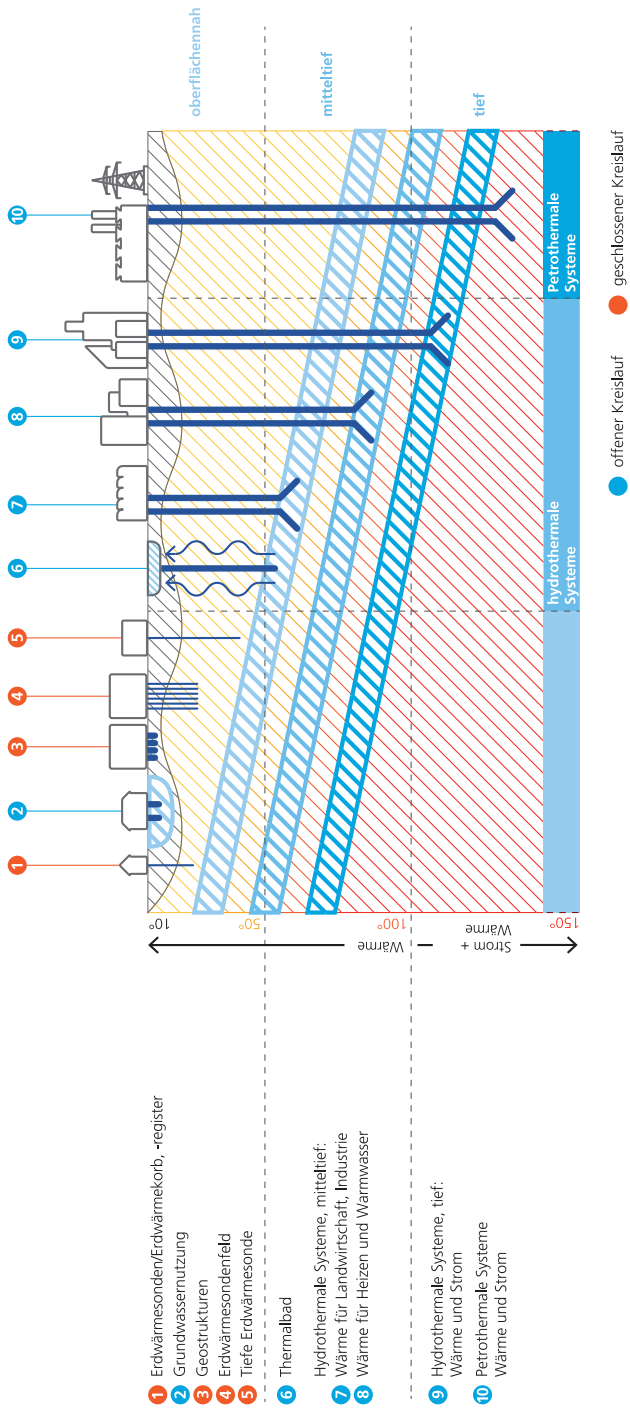




Abb. 1.5 Übersicht über Gebiete, die für eine hydrogeothermische Nutzung möglicherweise geeignet sind. (© LIAG Hannover)

Die gewonnene Energie wird zum Heizen aber auch zum Kühlen von Wohnhäusern und anderen Gebäuden genutzt. Zusammenfassend gilt: Vom geologischen Hintergrund her ist es im Prinzip überall auf der Welt möglich, oberflächennahe Wärmeversorgung zu installieren. Entsprechend groß ist auch die Nachfrage. 2006 wurden in Deutschland ca. 28.000

neue Anlagen installiert, 2007 waren es insgesamt bundesweit ca. 130.000 Anlagen, wobei die Gruppe von erdgekoppelten Wärmepumpen (Haushalte), Bäder/Balneologie und Fernwärme über 80 % der Nutzung ausmachen.

Selbstverständlich ist eine Erdwärmeanlage für jedes Gebäude adäquat zu dimensionieren. Die Dimensionierung hängt von der Wärmeleitfähigkeit und Grundwasserführung des Untergrundes sowie dem benötigten Bedarf an Wärmemenge ab. Oberflächennahe Geothermie, hierbei insbesondere die Nutzungsformen durch Erdwärmesonden hat in den letzten Dekaden signifikant zugenommen. Besondere Bedeutung liegt in der kombinierten Gebäudeheizung und –Kühlung, und weiterhin in der Kombination mit solarthermischen Anlagen. In der Regel arbeiten die Anlagen strombasiert, so dass Effizienz und Wirkungsgrad entscheidende Faktoren darstellen.

Nach Pressemitteilung des Bundesverband Geothermie (BVG) haben die Anpassungen bei der Förderung in Deutschland 2016, d. h. bei geringem Ölpreis Wirkung gezeigt. Es geht aufwärts mit der Oberflächennahen Geothermie, u. z. für die nutzbare Erdwärme ebenso wie in Bezug auf die Marktzahlen. Das zeigen die Förderzahlen des Marktanreizprogramms ebenso wie die Wärmepumpen-Absatzzahlen. Der Anstieg bei der Förderzahl von Erdwärmeheizungen hat auch Auswirkungen auf den Einbau von Wärmepumpen, die in oberflächennahen Geothermieranlagen eingesetzt werden. Ihr Verkauf in 2016 zog um 21,8 % gegenüber dem Vorjahr auf 20.700 Wärmepumpen an. Dies dokumentieren die Wärmepumpen-Absatzzahlen, die vom Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie und dem Bundesverband Wärmepumpe erhoben werden.

Spezifika der Oberflächennahen Geothermie in Österreich, Schweiz und wichtige Aspekte weltweit finden sich in [Kap. 25, 26, 27](#).

Tiefe Geothermie, die spezifisch Gegenstand des 2014 publizierten Springer-Spektrum Handbuchs Bauer et al. (2014a) ist, beginnt per Definition ab einer Tiefe von mehr als 400 m und einer Temperatur von 20 °C. Von Tiefer Geothermie im eigentlichen Sinn wird gewöhnlich aber erst bei Tiefen von über 1000 m und bei Temperaturen über 60 °C gesprochen. Die Übergänge zwischen den einzelnen Systemen sind jedoch fließend und definitorisch nicht näher festgelegt. Im Falle der Tiefen Geothermie, soweit es sich nicht um Sekundärnutzung in Form von vorhandenen Bergbauanlagen, Tunnelsystemen sowie um Tiefensonden handelt, wird eine weitere Unterteilung in *hydrothermale Systeme*, *petrothermale Systeme* und *tiefe Erdwärmesonden* vorgenommen. Die Erschließung tief liegender Erdwärme ist mit Ausnahme tiefer Erdwärmesonden eine direkte Nutzung, d. h. hier wird in großen Tiefen natürlich vorhandenes Thermalwasser oder künstlich eingebrachtes und in der Tiefe aufgeheiztes Wasser an die Erdoberfläche gepumpt und dient sowohl der Stromerzeugung als auch der direkten Beheizung von Gebäuden (meist ohne Wärmepumpen). Die in der Oberflächennahen Geothermie verbreitete Erdwärmenutzung mit einem Wärmeträgermedium im geschlossenen System ist bei Tiefbohrungen für eine Stromerzeugung, zumindest nach heutigem Kenntnisstand, nicht geeignet.

In einem hydrothermalen System wird ein natürlicher Aquifer (wasserführendes Gebiet) zur Wärmeproduktion genutzt. Dieser Aquifer wird typischerweise als poröses Medium modelliert. Im Gegensatz dazu verfügt ein petrothermales System zwar über

heißes, geklüftetes Gestein, aber das notwendige Wärmeträgermedium muss künstlich eingebracht werden. Da die natürlichen Bruchsysteme in diesen Reservoiren oftmals einen wirtschaftlich rentablen Betrieb nicht erlauben, müssen sie künstlich stimuliert werden. Deshalb werden sie „Hot-Dry-Rock-System“ (HDR) oder *Enhanced Geothermal System* (EGS) genannt. In Deutschland (Abb. 1.5) liegt der Fokus bisher auf hydrothermalen Reservoiren und den heutzutage üblichen Reservoirmodellen, die als Ausgangspunkt zur Durchführung der Explorationsverfahren und der Simulation der auftretenden Prozesse anzusehen sind.

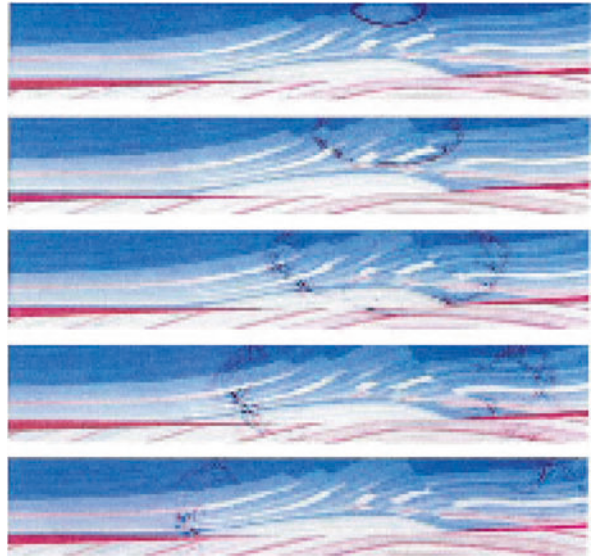
1.5 Explorationsmethoden und -Datensysteme

Zu Beginn eines Geothermievorhabens (siehe Abb. 1.6, Säule 1) steht die Identifizierung und Exploration eines potentiellen Reservoirs. Da erst durch eine Bohrung dessen exakte Ausmaße, Parameter und Beschaffenheit bestimmt werden können, dies aber zu kostspielig ist, sind alternative Erkundungsmethoden unverzichtbar (vgl. Kap. 3 bis 5 für eine Übersicht aus physikalisch-mathematischer Sicht). Die bisher wichtigste, in der Regel zu Beginn eines nahezu jeden tiefen Geothermievorhabens durchgeführte, aber zugleich auch kostspieligste Explorationsmethodik ist die Erkundung auf Basis seismischer Daten in Form von Seismogrammen. Die Daten werden an der Erdoberfläche oder in bereits vorhandenen Bohrlöchern gesammelt. Zur Erstellung eines Untergrundbildes aus den verfügbaren zwei- und dreidimensionalen Datensätzen werden sogenannte Migrations- und Inversionsverfahren eingesetzt. Bei der Migration werden die in den Seismogrammen bzgl. der Zeit aufgezeichneten Amplituden (Wellenfelder) zu ihrer „wahren“ Tiefe verschoben (Abb. 1.7) und damit die Form, die Position und der Reflexionskoeffizient des entsprechenden Reflektors rekonstruiert. Entscheidend für die Qualität und Zuverlässigkeit des



Abb. 1.6 Eingangsparameter bei der geothermischen Exploration

Abb. 1.7 Im Marmousi-Testmodell (vgl. z. B. Versteeg 1994) sich fortpflanzende Welle. (Aus Ilyasov 2011)

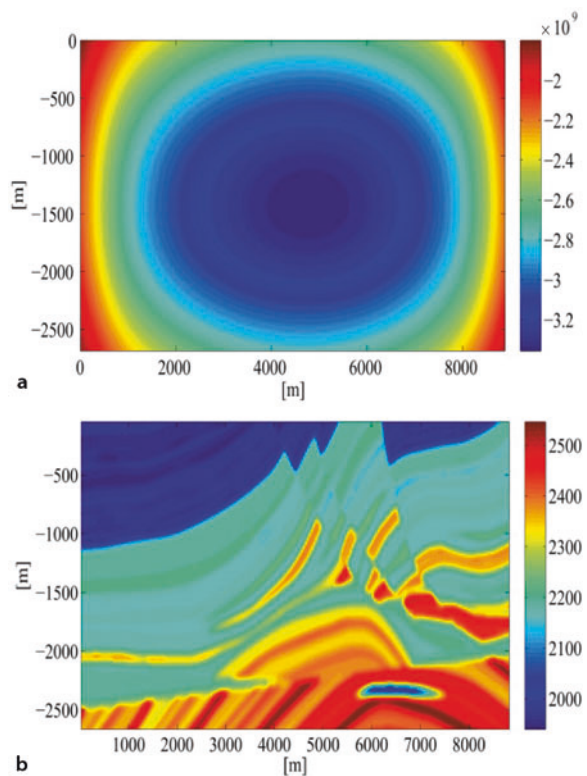


Migrationsergebnisses und der anschließenden geologischen Interpretation ist die Genauigkeit des verwendeten (approximativen) Geschwindigkeitsmodells, das durch die Geschwindigkeitsanalyse z. B. mittels Tomographie oder Inversion bestimmt werden kann. Eine iterative Anwendung eines Migrationsverfahrens kann zur Verfeinerung des Geschwindigkeitsmodells eingesetzt werden. Dabei wird ein stetiges Startmodell schrittweise lokal verbessert.

Gravimetrie, d. h. die Erkundung der Dichteverhältnisse im Erdinneren mittels Schwerkraftmessungen z. B. Federwaagen ist von der Komplexität der Messtechnik her eine kostengünstige Explorationsform, die aber zumindest in der deutschen Geothermie weniger häufig als von ihrer geophysikalischen Bedeutung her gesehen Anwendung findet. Mathematisch ist die dreidimensionale Inversion von Gravitationsfelddaten mit nicht zu unterschätzenden Schwierigkeiten (vgl. Kap. 5 für nähere Einzelheiten) verbunden. Diese beruhen auf dem direkten Zusammenhang von Gravitationspotential und Dichteverteilung der Erde (Abb. 1.8) gemäß dem Newtonschen Gravitationsgesetz. Gravimetrie führt ebenso wie Seismik zu einem im mathematischen Sinne schlecht gestellten inversen Problem. Hier besteht die Aufgabe, aus an der Erdoberfläche oder im Außenraum der Erde erhobenen Input-Daten auf geologische Output-Spezifika in der Erde zu schließen. Solche Probleme stellen auch wegen fehlender Eindeutigkeitsaussagen in der Lösungsmethodik und numerischer Instabilitäten bei der approximativen Umsetzung echte geomathematische Herausforderungen (vgl. Kap. 4 für ein neuartigen Lösungsansatz) dar, die selbstverständlich in der Tiefen Geothermie stärker als in der Oberflächennahen Geothermie entscheidende Kriterien für eine Investmentsicherheit sind.

Prinzipiell sind Verfahren wie Gravimetrie, Geomagnetik, Seismik nicht an eine bestimmte Tiefe gebunden und daher in der Oberflächennahen wie auch Tiefen Geothermie

Abb. 1.8 Marmousi-Gravitationspotential (a) und Dichteverteilung (b). (Nach Blick et al. 2017)



einsetzbar, auch wenn ein Unterschied von mehreren tausend Metern sich als beträchtlich hinsichtlich der Beobachtungs- und Auswertungsqualität erweist. Generell spielt in der bisherigen Explorationspraxis Reflexionsseismik bei zunehmender Tiefe eine ausgeprägte Rolle. Wie bereits betont kamen die weniger aufwendigen und kostengünstigen Methoden der Gravimetrie und Geomagnetik bisher in der Tiefen Geothermie in Deutschland nur sporadisch zum Einsatz, meist nur zur Unterstützung seismischer Auswertung. Hochgenauere Gravimetermessungen lassen jedoch in Verbindung mit neuartigen potentialtheoretischen Ansätzen Gravimetrie zukünftig als eine angemessene Alternative auch in der Tiefen Geothermie erscheinen. Die Vorteilhaftigkeit der Exploration in der Oberflächennahen Geothermie liegt darin begründet, dass neben Gravimetrie und Geomagnetik auch eine wesentlich höhere Anzahl anderer Verfahren wie etwas Geoelektrik, Radar, Radiometrie erfolgversprechend einsetzbar sind (vgl. die Ausführungen in [Kap. 4](#) dieses Handbuchs).

Die grundlegenden Prozesse, die sowohl in hydrothermalen als auch petrothermalen Reservoiren von Interesse sind, sind Wärme-, Fluid-, Stoff- und Tracertransport (siehe 3. Spalte in [Abb. 1.6](#)). Im Gegensatz zu den ersten beiden Vorgängen stellt sich bei den letzten beiden die Frage, wieso sie wichtig sind. Während der Zirkulation des Wärmeträgermediums können Stoffe aus dem Untergrund im Fluid gelöst werden oder auch aus

dem Fluid ausfallen. Dies kann zu einer Reduzierung der Permeabilität des Mediums führen und beeinflusst somit den Fluidfluss – insbesondere in geklüfteten Medien. Mithilfe der Injektion eines Tracers (Markierstoff) in ein Reservoir, den Daten aus Messungen an der Extraktionsbohrung und dem Abgleich der Messdaten mit den Ergebnissen aus Strömungssimulationen werden Fließwege und -geschwindigkeiten untersucht. Im Falle eines petrothermalen Systems ist man aufgrund des vorhandenen Bruchnetzwerks zusätzlich zu den bisher genannten mit folgenden Anforderungen konfrontiert: Explizite Darstellung der Brüche, Änderung des Bruchwinkels bzw. der Bruchausrichtung durch Spannung und Scherung, thermoelastische Effekte, Bestimmung der Beziehung zwischen Bruchausrichtung und Bruchleitfähigkeit, Fluidfluss innerhalb der Brüche, Kopplung von Reservoirmodellen mit Bohrlochmodellen. Diese Aufzählung stellt eindeutig die wechselseitige Beziehung der Simulation der Transportprozesse (3. Spalte in [Abb. 1.6](#)) und des Spannungsfeldes (siehe 4. Spalte in [Abb. 1.6](#)) heraus.

In den letzten Jahren haben kleinere Erdstöße im Umfeld von Geothermieranlagen immer wieder für Diskussionen gesorgt – z. B. in Basel (Dezember 2006 und Januar 2007) und in Landau (August 2009). Dies zeigt, dass neben der Simulation der Transportprozesse auch die Simulation des Spannungsfeldes während der Explorations-, Bau- und Betriebsphase von immenser Bedeutung ist (siehe 4. Spalte in [Abb. 1.6](#)). Die Wechselbeziehung zum Bereich der Transportprozesse ist dadurch gegeben, dass sich die spezifischen Parameter eines Reservoirs durch Injektion eines kalten Wärmeträgermediums verändern. Das Vorgehen in einem tiefen geothermischen Reservoir besteht darin, ein Wärmeträgermedium unter Druck in den Untergrund zu pumpen. Dies führt zu Spannungen im porösen oder geklüfteten Gestein, deren Wechselwirkungen mit dem Druck des Wärmeträgermediums modelliert werden müssen. Dieser Effekt wird Poroelastizität genannt. Es ist das grundlegende Phänomen im Bereich des Spannungsfeldes in einem geothermischen System. Aufgrund poroelastischer Prozesse verändern sich unter anderem die Permeabilität und die Porosität des Reservoirs. Das geschieht insbesondere im Falle von petrothermalen Systemen, da die bereits vorhandenen Brüche geschlossen werden oder wachsen können. Das Wachstum vollzieht sich entlang der Richtung der maximalen Hauptspannung. Dabei ist der Weg, den der Bruch nimmt, durch die Spannung an der Bruchspitze bestimmt. Außer den bisher genannten Einflüssen führen poroelastische Prozesse zu Veränderungen im Geschwindigkeitsregime seismischer Wellen, zu Mikroseismizität, zur Reaktivierung von Verwerfungen und Bruchlinien, zur Störung der Bohrlochstabilität und zu Veränderungen der Fließwege des Wärmeträgermediums. Neben der Poroelastizität besteht die zweite bedeutende Ursache für Gesteinsverschiebungen in thermoelastischen Prozessen. Sie treten wegen der Temperaturdifferenz zwischen dem kalten injizierten Wärmeträgermedium und dem warmen porösen oder geklüfteten Medium auf. Als Folge zieht sich das Gestein zusammen – so wirkt dieser Effekt der Ausdehnung durch poroelastische Prozesse entgegen. Zu beachten ist, dass die thermoelastischen Effekte auch nach Beenden der Injektion noch auftreten können. Da das Langzeitverhalten eines geothermischen Reservoirs von besonderem Interesse ist, kann der Einfluss der Thermoelastizität nicht außer Acht gelassen werden.

1.6 Modellierung von Reservoirmodellen

Zur Modellierung von geklüfteten Systemen (petrothermalen Reservoiren) kann man entweder Kontinuumsansätze oder diskrete Ansätze verwenden (Abb. 1.9). Die Kontinuumsansätze gliedern sich in die *Effective Continuum Method* (ECM), die *Dual-Continuum*- (DC) bzw. *Multiple-Interacting-Continua*- (MINC) Methoden und die *Stochastic-Continuum*-Methoden (SC). Bei der Verwendung von ECM wird das geklüftete Medium durch ein äquivalentes poröses Medium dargestellt, wobei die Bestimmung der benötigten effektiven Kontinuumsparameter schwierig ist. Eine Erweiterung dieses Konzepts stellen DC und MINC dar, wobei eine Einteilung des Reservoirs in zwei oder mehr Kontinua erfolgt. Neben der Bestimmung der Kontinuumsparameter ist die richtige Kopplung der einzelnen Teilgebiete von immenser Bedeutung. Im Gegensatz zu ECM werden bei Anwendung von SC die nötigen Parameter nicht als deterministische sondern als stochastische Variablen modelliert. Konzepte zur Bestimmung der Kontinuumsparameter für die genannten Verfahren stellen die diskreten Reservoirmodelle in Form von *Single-Fracture-Methoden* (SF), *Discrete-Fracture-Network-Methoden* (DFN) und *Fracture-Matrix-Methoden* (FM) dar. Somit sind sie nicht nur zur Simulation der auftretenden Prozesse einsetzbar. Falls der Fluss im petrothermalen Reservoir hauptsächlich in einigen wenigen dominanten Brüchen stattfindet, ist das Verhalten innerhalb dieser bestimmten Brüche äußerst wichtig. Zur Modellierung wird SF eingesetzt, das ursprünglich auf dem Konzept paralleler Platten basiert. Wegen der meist sehr rauen Bruchoberfläche reicht diese vereinfachte Betrachtung nicht aus. Unter den Verfahren zur Modellierung petrothermaler Systeme gehören die DFN zu den präzisesten – sie sind aber

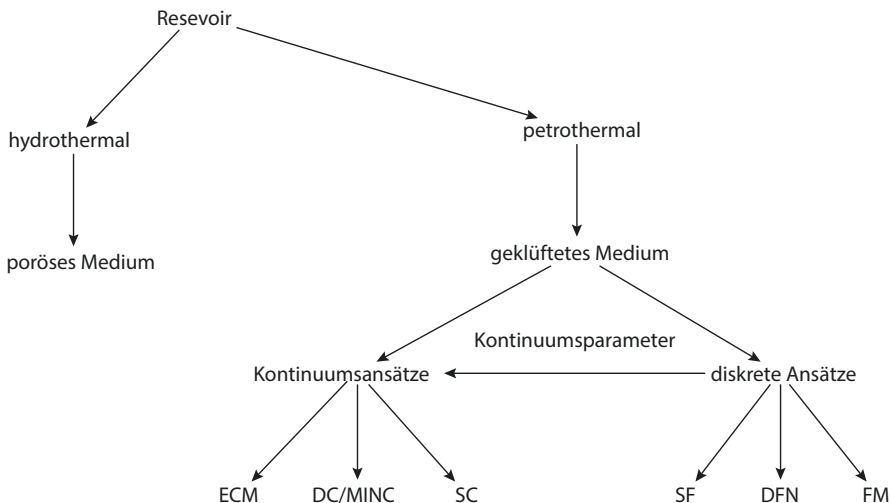


Abb. 1.9 Schema heutzutage verwendeter geothermischer Reservoirmodelle. (Nach Augustin et al. 2015)

sehr schwierig zu implementieren. Dabei stellt die Charakterisierung des Bruchnetzwerkes eine immense Herausforderung dar. Realistische – aber auch sehr komplexe – Methoden sind die FM. Sie ermöglichen es, die Interaktion zwischen den Brüchen und der umgebenden Gesteinsmatrix abzubilden, wenn die reale (vor Ort vorzufindende) Bruchmatrixkonfiguration beispielsweise durch Messungen aus Bohrungen oder durch Resultate der Exploration bekannt ist. Weitere Informationen und Literaturhinweise sind z. B. in Freeden und Nutz [2014](#), [2015](#) zu finden.

1.7 Nutzung der Erdwärme

Bei der Nutzung der Geothermie (vgl. z. B. Fritsche et al. [2010](#); Huenges [2010](#)) unterscheidet man zwischen direkter Nutzung, also der Nutzung der Wärme selbst, und indirekter Nutzung, der Nutzung nach Umwandlung in Strom in einem Kraftwerk. Zur Optimierung der Wirkungsgrade sind auch Kraft-Wärme-Kopplungen (KWK) möglich.

Bei der *hydrothermalen Stromerzeugung* sind Wassertemperaturen von deutlich mehr als 80 °C notwendig. Hydrothermale Heiß- und Trockendampfvorkommen mit Temperaturen über 150 °C können direkt zum Antrieb einer Turbine genutzt werden. Stromgewinnung aus Tiefer Geothermie ist grundlastfähig und steuerbar. In Süddeutschland sind zahlreiche Projekte zur Stromerzeugung aus hydrothermalen Systemen im Gange bzw. im Entstehen. Diese tiefen Grundwasserleiter (Aquifere, Wasserreservoirs) sind hauptsächlich im süddeutschen Molassebecken, im Oberrheingraben, aber auch im Norddeutschen Becken (vgl. [Abb. 1.6](#)) zu finden.

Um *Nutzung aus petrothormaler Wärme* zu gewährleisten, müssen bestimmte geologische Formationen von einem Wärmeträger (Wasser) durchflossen werden, der dem Gestein die Energie entzieht und anschließend an die Oberfläche befördert. Das durch die heißen Gesteine erhitze Wasser kann zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen sowie zur Erzeugung von Strom genutzt werden.

Bei der *Nutzung von oberflächennaher Erdwärme* wird dem Untergrund Wärme entzogen, die aus der natürlichen Wärmeproduktion des Erdinneren stammt. Dies geschieht über die Prozesse der Konvektion (Wärmetransport über das fließende Grundwasser) und Konduktion (Wärmetransport vom Wärmeren zum Kälteren in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins). Beim Kühlen wird Überschusswärme aus dem Haus über Decken- oder Fußbodenheizung ins Erdreich abgeführt und im Untergrund eingespeichert.

Bei den geothermischen Nutzungen unterscheiden wir *offene Systeme* (Brunnenanlagen) und *geschlossene Systeme* (Erdreichkollektoren und Erdwärmesonden).

Offene Systeme nutzen die thermische Energie des Grundwassers, das über einen Förderbrunnen gehoben und zur Wärmepumpe geleitet wird. Dort wird dem Wasser Wärme entzogen und anschließend wird das kühlere Wasser über einen Injektionsbrunnen wieder in den Untergrund eingeleitet. Eine *Wärmepumpe* (vgl. Ochsner [2005](#)) kann natürlich nicht nur zum Heizen, sondern auch zur Warmwasserbereitung und sogar zur Kühlung

verwendet werden. Entsprechend ihrer Funktionsweise entzieht die Wärmepumpe der Umwelt – also z. B. dem Erdboden – die Wärme und gibt sie an das Heizsystem ab.

Bei den geschlossenen Systemen zirkuliert ein Fluid in horizontal oder vertikal verlegten Rohrleitungen und die Wärmepumpe entzieht diesem Transportmedium die Wärme. Mit *Erdwärmesonden* kann ohne wesentliche Zusatzinvestitionen auch besonders effizient gekühlt werden. Die Nutzung von Erdwärme zum Heizen und zur Brauchwasserbereitung ist eine in Europa seit Jahren etablierte Technologie. Dabei wird das natürliche Temperaturniveau des Untergrundes genutzt, um mithilfe einer Wärmepumpe auf das Niveau des Heizsystems angehoben zu werden. Zum Antrieb der Wärmepumpe wird allerdings elektrischer Strom benötigt, der gewöhnlich nur einen Bruchteil der erzeugten Wärmeenergie ausmacht. Erdwärmesonden gehören zu den geschlossenen Systemen und werden über Bohrungen senkrecht in den Untergrund gebracht. In den Sonden zirkuliert ein Wasser-Sole-Gemisch, das dem Boden Wärme entzieht. Die Tiefe der Bohrungen hängt entscheidend von den vorliegenden Gesteinseigenschaften und dem Grundwasserfluss ab.

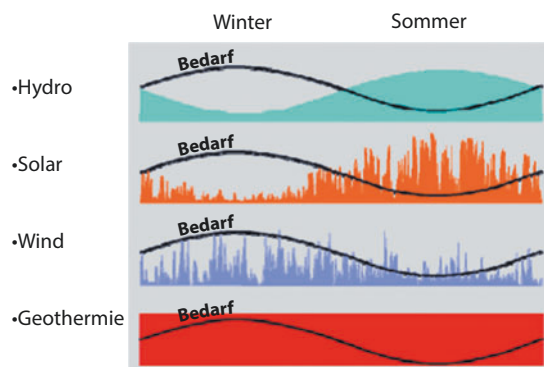
1.8 Vorteile und Nachteile der Geothermie

Die Diskussion von Vor- und Nachteilen der Geothermie ist Gegenstand mannigfacher Studien.

Einer der wichtigsten *Vorteile* der Geothermie gegenüber allen anderen Erneuerbaren Energien ist, dass die Ressource ohne Speicherung ununterbrochen, d. h. unabhängig von der Tages- und Jahreszeit, von klimatischen und wetterbeeinflussten Bedingungen, immer zuverlässig zur Verfügung steht und nach Bedarf und nicht nach Angebot geliefert werden kann (vgl. [Abb. 1.10](#)).

Wie bereits erwähnt, steht nicht zu befürchten, dass diese Energiequelle versiegen wird. Die geothermische Energie ist CO₂-frei, es resultiert keine Verknappung für nachfolgende Generationen und sie ist platzsparend.

Abb. 1.10 Geothermie als Lieferant für konstantes Energieaufkommen



Die Erdwärme (Geothermie) weist im Gegensatz zu den meisten anderen regenerativen Energien einen entscheidenden Vorteil auf: Sie ist grundlastfähig, d. h. Erdwärme steht rund um die Uhr, wetterunabhängig und im gesamten Erdkörper zur Verfügung.

Zusätzlich ist die Energie heimisch, lange Transportwege entfallen, sie ist keinem grenzüberschreitenden Handel unterworfen und kann losgelöst von politischen Krisen immer geliefert werden. Jedoch ist der Bau entsprechender Kraftwerke mit einem erheblichen finanziellen Aufwand und zugleich mit entsprechendem Flächenbedarf verbunden. Dafür sind bei der Erdwärme die technischen Probleme der Nutzbarmachung nur in geringerem Ausmaß vorhanden. Außerdem lohnt sich die Stromerzeugung in der Regel nur in solchen Regionen, in denen geothermische Anomalien, wie bereits oben angesprochen, vorkommen. Es ist vorteilhaft, wenn bereits in geringer Tiefe hohe Temperaturen herrschen, weil bei tieferen Lagen oftmals die Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung eingeschränkt ist. Tiefe Geothermie bedeutet dabei eine gesicherte und stabile Grundversorgung an Strom und Wärme.

Der genannten Vielzahl an Vorteilen stehen auch *Nachteile* gegenüber. Gegenwärtig ist als kritisches Moment zumindest in der Tiefen Geothermie weltweit das Fündigkeitsrisiko zu nennen. Mit den gängigen geophysikalischen Explorationsmethoden kann die geologische Struktur im Erdinnern von der Oberfläche aus nur unzureichend bestimmt werden. Es müssen daher adäquatere Verfahren entwickelt werden und in Kombination Auswertung erfahren.

Hinsichtlich der hydraulischen Stimulation ist es verstärkt erforderlich, die Bruchprozesse zu analysieren und geeignete Berechnungsmethoden und Modelle zu entwickeln. Risikoanalysen helfen, ein umfassendes Bild möglicher Gefahren und Potentiale zu entwerfen. Numerische Simulationen sind ein unabdingbares Hilfsmittel derartiger Analysen.

Das Risiko, bei den kostenaufwendigen Bohrungen nicht fündig zu werden, schreckt noch immer viele Investoren und Banken ab und erweist sich als ein hohes Hindernis für die Finanzierung von Projekten der Tiefen Geothermie. Eine angemessene Risikoverteilung zwischen Finanzpartnern, Anbietern von Versicherungskonzepten und Technologieanbietern könnte hier Abhilfe schaffen.

Oberflächennahe Geothermieprojekte dienen insbesondere der lokalen Versorgung mit Wärme und Kälte. Einsatzmöglichkeiten sind die direkte Nutzung von Raumwärme, Warmwasser oder Kühlung. In der öffentlichen Wahrnehmung sind die Oberflächennahen Geothermieprojekte kaum präsent, obwohl ihnen bezogen auf die Energiewende eine nicht zu unterschätzende Rolle zukommt. Bei Wärmepumpensystemen ist der Energiebedarf für den Antrieb zu berücksichtigen. Wird die Wärmepumpe über rein regenerativ erzeugten Strom betrieben, ist auch Oberflächennahe Geothermie klimaneutral nutzbar. Für die Oberflächennahe Geothermie inkl. Wärmepumpen-Absatzzahlen gibt es einen Aufwärtstrend, u. z. für die nutzbare Erdwärme ebenso wie in Bezug auf die Marktzahlen. Allerdings sind dafür Marktanreizprogramme nötig, die sich besonders in Zeiten eines geringen Ölpreises als tragfähig erweisen.

1.9 Fazit

Unsere Ausführungen führen zu folgenden Kernaussagen (vgl. auch Wefer 2010) über die heutige Geothermie:

- Die Geowissenschaften haben sich in den vergangenen Dekaden ähnlich stark gewandelt wie die Biowissenschaften. Moderne Geowissenschaften sind ihrem Wesen nach Naturwissenschaften. Die Grenzen zwischen den einzelnen Teildisziplinen der Geowissenschaften, insbesondere zur Geothermie, verlieren immer mehr an Bedeutung. Die Mathematisierung aller Wissenschaften nimmt stetig zu. Mathematik wird zur Schlüsseltechnologie, auch im Bereich der Fündigkeitsrisikoreduzierung in der Geothermie.
- Als wichtig und notwendig erachtet werden die nachhaltige Weiterentwicklung und Förderung erkenntnisorientierter Forschung der Geothermie unter den heutigen veränderten Wissenschaftsprinzipien
- Als wichtig und notwendig erachtet werden gezielt eingesetzte Anreizprogramme unter Beachtung der wesentlichen Marktindikatoren und funktionalen Marktstrukturen.
- Geothermie ist mehr noch als Solar- oder Windenergie der stabilste und kalkulierbarste Erneuerbare Energieträger. Erdwärme ist eine ständig verfügbare, heimische, krisensichere und umweltfreundliche Energiequelle, deren wirtschaftliche Nutzbarkeit jedoch von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten abhängt.
- Die großen Zukunftsaussichten der Geothermie werden auch innerhalb der Geowissenschaften bisher nicht ausreichend kommuniziert. In Wirtschaft, Politik und Öffentlichkeit wird die besondere Bedeutung der Geothermie für die Gesellschaft zu wenig wahrgenommen.
- Was die soziopolitische Akzeptanz insbesondere in Deutschland angeht, so ist es für die zukünftige Entwicklung der Geothermie dringend geboten, in erforderlicher Sachlichkeit und angemessenem Zusammenspiel von externem wie auch internem Interessenmanagement Hemmnisse und Behinderungen eines Geothermieprojektes abzubauen und eine Situation vergleichbar wie in einigen Ländern des europäischen Auslands, etwa in Frankreich zu schaffen.

1.10 Ausblick

Zwar sind die deutschen Kohlelagerstätten keineswegs erschöpft, aber von Cotta's Schlussfolgerung aus dem Jahre 1858 ist nach mehr als 159 Jahren aktueller denn je: Die angestrebte Energiewende kann nur mit einem robusten Anteil an Geothermie am zukünftigen Energiemix gelingen.

Insbesondere die dauerhafte Verfügbarkeit verschafft der Energiegewinnung durch Erdwärme einen vorderen Platz in der Branche der regenerativen Energien. Dafür spricht

zudem die Möglichkeit optimaler Energieausnutzung bei der Geothermie. Das wird durch die Kraft-Wärme-Kopplung erreicht, bei der die Abwärme der Stromerzeugung zusätzlich zur Beheizung von privaten Haushalten oder anderen Gebäuden verwendet wird.

Grundsätzlich kann die oberflächennahe Geothermie fast überall eingesetzt werden. Tiefe Geothermie für die großformatige Wärmenutzung in Fernwärmesystemen ist ebenfalls an vielen Orten in Deutschland nutzbar. Die Stromerzeugung wird zurzeit in Deutschland nur an hydrothermalen Standorten umgesetzt. Durch die weitere Entwicklung und Erforschung der EGS-Technologie wird zukünftig auch an petrothermalen Standorten in Deutschland die Gewinnung von Strom und Wärme möglich.

Energie aus Oberflächennaher Geothermie ist grundsätzlich geeignet, einen wesentlichen Beitrag zur angestrebten Energiewende zu leisten. Es gibt ein großes Potential für den weiteren Ausbau. Geothermiebranche und Politik sind allerdings auch in der Oberflächen Geothermie gefordert, in der Öffentlichkeit ein nachhaltiges Bewusstsein für innovative Technologien und den Vorteil und Nutzen oberflächennaher Erdwärme zu schaffen.

Literatur

- Ahrens, T. J.: *Global Earth Physics – A Handbook of Physical Constants*. Am. Geophys. Union, Washington (1995)
- Armstead, H. C. H.: *Geothermal Energy*. E. & F. N. Spon, London (1983)
- Armstead, H. C. H., Tester, J.W.: *Heat Mining*. E. & F. N. Spon, London (1987)
- Augustin, M., Blick, C., Eberle, S., Freeden, W., Gerhards, C., Ilyasov, M., Kahnt, R., Klug, M., Möhringer, S., Neu, T., Nutz, H., Michel née Ostermann, I., Punzi, A.: Modeling deep geothermal reservoirs: Recent advances and future perspectives. In: Freeden, W., Sonar, T., Nashed, M. Z. (Hrsg.) *Handbook of Geomathematics*, 2. Aufl., S. 1547–1629. Springer, Heidelberg (2015)
- Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.): *Handbuch Tiefe Geothermie*. Springer, Heidelberg (2014a)
- Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T.: *Energiewirtschaft 2014 (Fakten und Chancen der Tiefen Geothermie)*. Springer Spektrum, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden (2014b)
- Blick, C., Freeden, W., Nutz, H.: Feature extraction of geological signatures by multiscale gravimetry. *Int J. Geomath.* **8**, 57–83 (2017)
- Clauser, C.: Geothermal energy. In: Heinloth K. (Hrsg.) *Landolt-Börnstein, Physikalische Tabellen, Group VIII: Advanced Materials and Technologies*. Bd 3. Energy Technologies, Subvol. C. Renewable Energies. Springer, Heidelberg (2006)
- Freeden, W.: Geomathematics. Its role, its aim, and its potential. In: Freeden, W., Nashed, M. Z., Sonar, T. (Hrsg.) *Handbook of Geomathematics*, Bd. 1, S. 3–78. Springer, New York (2015)
- Freeden, W., Nutz, H. *Mathematische Methoden*. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) *Handbuch Tiefe Geothermie*, S. 125–221. Springer, Berlin (2014)
- Freeden, W., Nutz, H.: Mathematik als Schlüsseltechnologie zum Verständnis des Systems „Tiefe Geothermie“. *Jahresbericht der Deutschen Mathematikervereinigung (DMV)*, **117**, 45–84 (2015)
- Freeden, W., Nashed, M. Z., Sonar, T. (Hrsg.): *Handbook of Geomathematics*, Bd. 1–3, 2. Aufl. Springer, New York (2015)

- Fritsche, J.-G., Kracht, M., Knevels, J., Pursche, T.: Nutzung tiefer Geothermie in Hessen, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden (2010)
- Huenges, E. (Hrsg.): *Geothermal Energy Systems: Exploration, Development, and Utilization*, 486. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Berlin (2010)
- Ilyasov, M.: A tree algorithm for Helmholtz potential wavelets on non-smooth surfaces: Theoretical background and application to seismic data postprocessing. Ph.D. thesis, TU Kaiserslautern, Geomathematics Group (2011)
- Knappek, E.: Die unerschöpfliche Energiequelle unter unseren Füßen, *Geothermische Energie*, **84**, 2–3 (2016)
- Ochsner, K.: *Wärmepumpen in der Heizungstechnik. Praxishandbuch für Installateure und Planer*, 3. neubearbeitete Auflage, S. 211. C.F. Müller Verlag, Heidelberg (2005)
- Pollack, H. N., Hurter, S. J., Johnson J. R.: Heat flow from earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev Geophys.* **31**, 267–280 (1993)
- Sanyal, S. K., Butler, S. J., Swenson, D., Hardeman, B.: Review of the state-of-the-art of numerical simulation of enhanced geothermal systems. In: *Proceedings, World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan* (2000)
- Stober, I.: Thermisches Regime der Erde. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.) *Handbuch Tiefe Geothermie*, Springer Spektrum, Berlin (2014)
- Stober, I., Bucher, K.: *Geothermie*, 2. Aufl. Springer Spektrum, Berlin (2014)
- Versteeg, R.: The Marmousi Experience: Velocity model determination on a synthetic complex dataset. *Lead. Edge.* **13**, 927–936 (1994)
- von Cotta, C. B.: *Deutschlands Boden, sein geologischer Bau und dessen Einwirken auf das Leben des Menschen*, Bd. 1–2, Brockhaus, Leipzig (1858)
- Wefer, G.: *Dynamische Erde. Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften*, Strategieschrift, Geokommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek (2010)

Björn-Martin Kurzrock und Tillman Gauer

Inhaltsverzeichnis

2.1 Immobilienbestand in Deutschland 24

2.1.1 Gebäudearten und -kategorien 25

2.1.2 Gebäudetypologien 27

2.1.3 Energieeffizienz von Gebäuden 27

2.2 Energetische Anforderungen, Vorgaben und Anreize 31

2.2.1 Anforderungen und Vorgaben auf Bundes- und Länderebene 31

2.2.2 Förderprogramme auf Bundesebene 31

2.2.3 Ergänzende Instrumente von Bundesländern und Kommunen 32

2.3 Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren 34

2.3.1 Wärmebedarf 34

2.3.2 Wärmerzeugung 35

2.3.3 Wärmeverteilung/Wärmeübertragung 37

2.3.4 Wärmespeicher 38

2.3.5 Vom Gebäude zum Quartier 39

2.3.6 Zwischenfazit: Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren 51

2.4 Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien 52

2.4.1 Stärken 52

2.4.2 Schwächen 54

2.4.3 Chancen 55

2.4.4 Risiken 58

2.4.5 Zwischenfazit: Potenziale der Oberflächennahen Geothermie für Immobilien 60

2.5 Zusammenfassung und Ausblick 62

Literatur 63

Björn-Martin Kurzrock (✉) · Tillman Gauer
Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet
Immobilienökonomie, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern, Deutschland
e-mail: bjorn.kurzrock@bauing.uni-kl.de; tillman.gauer@bauing.uni-kl.de

Zusammenfassung

Oberflächennahe Geothermie bietet interessante Potenziale zur Wärmeversorgung von Immobilien mit Erneuerbarer Energie und kann einen wichtigen Beitrag zur Energiewende in Deutschland leisten. Die Potenziale und technischen Möglichkeiten, insbesondere beim Einsatz in Wohngebäuden und Wohnquartieren, werden in diesem Beitrag beleuchtet. Zunächst wird der Immobilienbestand in Deutschland hinsichtlich Gebäudearten, -kategorien, Gebäudetypologien und energetischen Merkmalen dargestellt. Danach folgt die Beschreibung energetischer Anforderungen, Vorgaben und Anreize sowie der Maßnahmenbereiche zur Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren. Anhand eines Fallbeispiels werden mehrere Energieversorgungskonzepte für ein konkretes Wohnquartier mit Vor- und Nachteilen dargestellt. Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken beim Einsatz Oberflächennaher Geothermie für Immobilien werden ausführlich dargestellt und entsprechende Strategien abgeleitet.

Schlüsselwörter

Oberflächennahe Geothermie · Immobilien · Wohngebäude · Wohnquartiere · Wärmeversorgung

2.1 Immobilienbestand in Deutschland

Über Jahrhunderte ist in Deutschland ein Immobilienbestand mit bemerkenswert großer Vielfalt in Architektur, Konstruktion und Materialien entstanden. In Deutschland existieren ca. 19,9 Mio. Gebäude (BDI 2014).

Gebäudebezogener Endenergieverbrauch

Der gebäudebezogene Endenergieverbrauch für Heizen und Kühlen beträgt in Deutschland ca. 1195 TWh pro Jahr (2015), dies entspricht rd. 50 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland (BMW 2016a). 92,8 % hiervon entfallen auf die Wärmeversorgung, davon wiederum rd. 2/3 auf die 18,2 Mio. Wohngebäude. Der Anteil der Wohngebäude am gesamten gebäudebezogenen Endenergieverbrauch liegt bei ca. 65 %. Der Endenergieverbrauch im Gebäudebestand beträgt im Mittel 169 kWh/m²a (2013). Neubauten, die nach 2009 errichtet wurden, kommen durchschnittlich mit einem Endenergieverbrauch von <50 kWh/m²a aus (BMW 2014). Für Bürogebäude gilt im Bestand ein Referenzwert zur Wärmeversorgung von 110 bzw. 135 kWh/m²a (BMW & BMUB 2015; weitere Vergleichswerte in BMVBS 2009).

Energiewende

Die Optimierung des gebäudebezogenen Energieverbrauchs ist ein wichtiger Baustein der Energiewende in Deutschland. Wesentlich hierbei ist die energetische Modernisierung von Bestandsgebäuden. In Deutschland wurden zwischen 2010 und 2015 jährlich zwischen 140.000 und 220.000 Wohneinheiten (WE) neu errichtet, bei einem Bestand von ca. 41 Mio. WE (Statistisches Bundesamt 2016, Tab. 2.1).

Tab. 2.1 Wohnungsbestand in Deutschland. (Nach Statistisches Bundesamt 2016)

	Einheit	2011*	2012*	2013*	2014	2015
WE (Wohn- und Nichtwohngebäude)	1000	40.630	40.806	40.995	41.221	41.446
Wohnfläche insgesamt	Mio. m ²	3700	3721	3744	3769	3795
Strukturdaten zum Wohnungsbestand						
WE je 1000 Einwohner	Anzahl	506	507	508	508	504
Wohnfläche je WE	m ²	91,1	91,2	91,3	91,4	91,6
Wohnfläche je Einwohner	m ²	46,1	46,2	46,3	46,5	46,2

* Fortschreibung basierend auf den endgültigen Ergebnissen der Gebäude- und Wohnungszählung 2011, einschließlich Wohnheime

2.1.1 Gebäudearten und -kategorien

Gebäude werden gemäß [Kap. 1](#) der *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden* (Energieeinsparverordnung, EnEV) in Deutschland in Wohngebäude und Nichtwohngebäude unterschieden. Die EnEV gilt, bis auf bestimmte Ausnahmen, für alle Gebäude, soweit sie unter Einsatz von Energie beheizt oder gekühlt werden.

Gebäudebestand

Der Gebäudebestand in Deutschland umfasst 18,2 Mio. Wohngebäude (91,5 %) und 1,7 Mio. Nichtwohngebäude (8,5 %) (BDI 2014). Die öffentliche Hand ist hierzulande Eigentümerin von ca. 12 % aller Liegenschaften. Ein großer Anteil hiervon entfällt auf Nichtwohngebäude mit hohem absoluten Energieverbrauch und beträchtlichen Einsparpotenzialen. Daher gilt es, die in der EU-Energieeffizienzrichtlinie geforderte Sanierungsquote von 3 % pro Jahr gerade auf öffentliche Liegenschaften anzuwenden. Bund, Länder und Kommunen haben dies in Regierungserklärungen und Klimaschutzkonzepten einhellig zum Ziel erklärt. In einem Leitfaden des BMUB und dem *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen* (BNB) sind Kriterien für Nachhaltiges Bauen definiert (BMUB 2016).

Wohngebäude

Wohngebäude sind solche Immobilien, „die nach ihrer Zweckbestimmung überwiegend dem Wohnen dienen, einschließlich Wohn-, Alten- und Pflegeheimen sowie ähnlichen Einrichtungen.“ (EnEV, [Kap. 1](#)). Mehrfamilienhäuser repräsentieren mit ca. 3 Mio. Gebäuden zwar nur 18 % des deutschen Gebäudebestands, allerdings 41 % der Wohnfläche und 54 % der WE. Mit einem Anteil von über 92 % dominieren auch bei Mehrfamilienhäusern kleinere Gebäude mit drei bis vier Vollgeschossen und maximal 12 WE (IWU 2015, S. 19).

Die meisten der rd. 41 Mio. WE in Deutschland sind im Eigentum von Privatpersonen (32,3 Mio. WE, 80 %). Zweitgrößter Bestandshalter sind öffentliche und nicht-öffentliche

Unternehmen (5,8 Mio. WE, 14 %) bzw. Genossenschaften (2,2 Mio. WE, 5 %) und sonstige Organisationen (0,3 Mio. WE, 1 %).

Tab. 2.1 fasst den **Wohnungsbestand** in Deutschland basierend auf Fortschreibungen der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 zusammen. Wohnungsanzahl und Wohnfläche sind, absolut und bezogen auf die Einwohnerzahl, in Deutschland seit einigen Jahren kontinuierlich angestiegen.

Die **Wärmeversorgung** erfolgt derzeit in Deutschland bei rd. 50 % aller WE durch Gasheizungen. Der Anteil an Wärmepumpen liegt bisher bei unter 3 %. Über 80 % der WE werden mit Gas, Heizöl oder Fernwärme versorgt. (2014, [Abb. 2.1](#)).

Nichtwohngebäude

Zu Nichtwohngebäuden zählen Anstaltsgebäude, Büro- und Verwaltungsgebäude, landwirtschaftliche und nichtlandwirtschaftliche Betriebsgebäude sowie sonstige Nichtwohngebäude wie Universitäts- und Hochschulgebäude, Gebäude von Sportanlagen, Theater, Kirchen und Kulturhallen. Wird mindestens die Hälfte der Gesamtnutzfläche für Wohnzwecke genutzt, so gilt ein Gebäude als Wohngebäude. Bzgl. der rd. 1,7 Mio. Nichtwohngebäude in Deutschland gibt es immer noch deutliche Informationslücken hinsichtlich

Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2014

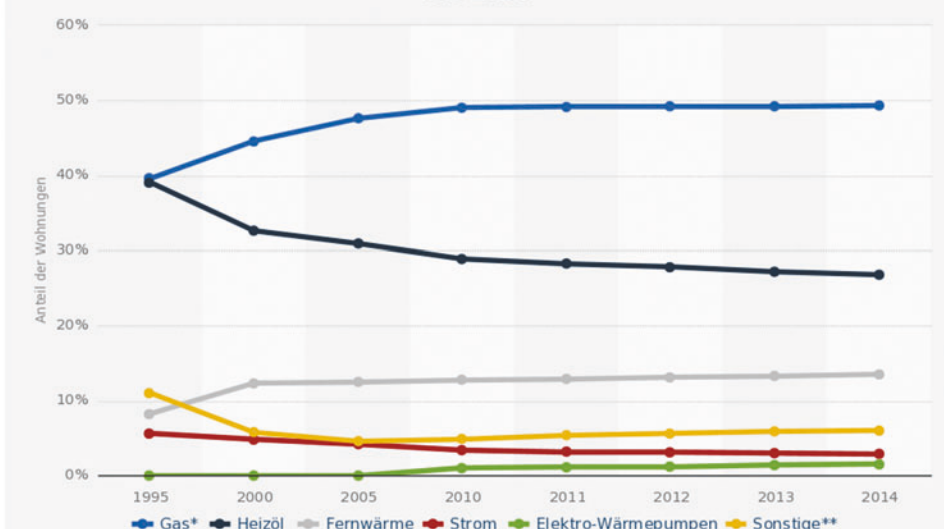


Abb. 2.1 Wärmeversorgung des Wohnungsbestands in Deutschland;* inkl. Bioerdgas und Flüssiggas;** Festbrennstoffe (Holz, Holzpellets, sonstige Biomasse, Koks, Kohle, sonstige Heizenergie). (Nach BDEW 2016)

* Einschließlich Bioerdgas und Flüssiggas. ** Hierzu zählen Festbrennstoffe (Holz, Holzpellets, sonstige Biomasse, Koks/Kohle und sonstige Heizenergie). Über 100 % hinausgehende bzw. fehlende Prozentwerte zu 100 % sind vermutlich rundungsbedingt.

der Verteilung von Typen, Nutzfläche und qualitativer Merkmale wie der energetischen Qualität im Gebäudebestand (BMVBS 2013, S. 14). Erste Schätzungen finden sich in BMVBS (2011, 2013).

Flächenverbrauch

Wesentlicher Faktor in der Energiewende ist der Flächenverbrauch in Gebäuden, insbesondere wenn Energieverbräuche pro Einwohner oder Arbeitsplatz ausgewiesen werden sollen. In den letzten Jahrzehnten ist der Pro-Kopf-Bedarf an Wohnfläche in Deutschland beständig auf über 45 m² angestiegen (Tab. 2.1), u. a. durch die Zunahme an Singlehaushalten. In Nichtwohngebäuden hat der Flächenbedarf pro Büroarbeitsplatz durch neue Arbeitsplatzkonzepte eher abgenommen und liegt heute bei ca. 20 m².

2.1.2 Gebäudetypologien

Abgesehen von der Gebäudeart lassen sich Gebäude in Gebäudekategorien unterteilen, die im Bereich der Nichtwohngebäude, auch aufgrund vielfältiger Nutzungsprofile, jedoch keiner allgemein anerkannten Systematik folgen (BMVBS 2013, S. 20).

Der Begriff Gebäudetypologie steht nach Definition des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) für eine systematische Beschreibung der Kriterien zur Klassifizierung von Gebäuden. Die Haustypenmatrix des IWU (2015) teilt den deutschen Wohngebäudebestand in zwölf Baualtersklassen und fünf Größenklassen ein (Tab. 2.2). Anhand dieser Einteilung soll eine Grundlage zur Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen durch Wärmeschutzmaßnahmen für den bundesdeutschen Gebäudebestand geschaffen werden.

Die Hauptannahme bei der Bildung von Baualtersklassen ist, dass Gebäude gleichen Baujahrs Ähnlichkeit hinsichtlich Konstruktion, Materialien und Energieverbrauch aufweisen. Die Baualtersklassen orientieren sich an historischen Einschnitten, Zeitpunkten statistischer Erhebungen, wesentlichen baukonstruktiven Innovationen und Änderungen der wärmetechnisch relevanten Bauvorschriften (z. B. WSchV, EnEV).

Am Beispiel von Einfamilienhäusern (EFH) sind in Tab. 2.3 typische Bauweisen, Erscheinungsbilder und energierelevante Merkmale für neun Baualtersklassen dargestellt.

Die Einordnung in Baualtersklassen ist in Deutschland nicht genormt. So erfolgt z. B. nach BVMBS (2013) eine Einteilung beheizter Nichtwohngebäude in 11 Gebäudekategorien und vier Baualtersklassen.

2.1.3 Energieeffizienz von Gebäuden

Die Energieeffizienz eines Gebäudes ist von vielen Einflussfaktoren abhängig. Ein wesentlicher Faktor ist die Gebäudegeometrie mit dem Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis). Das Baualter prägt das Verhältnis von Fenster- und Außenwandflächen und neben anderen Einflussfaktoren wie dem statischen Konstruktionsprinzip und

Tab. 2.2 Gebäudetypologie nach IWU. (IWU 2015, S. 9)

Baualtersklasse			EFH	RH	MFH	GMH	HH	
			Basis-Typen					
A	...	1859	EFH_A 		MFH_A 			
B		1860 ... 1918	EFH_B 	RH_B 	MFH_B 	GMH_B 		
C		1919 ... 1948	EFH_C 	RH_C 	MFH_C 	GMH_C 		
D		1949 ... 1957	EFH_D 	RH_D 	MFH_D 	GMH_D 		
E		1958 ... 1968	EFH_E 	RH_E 	MFH_E 	GMH_E 	HH_E 	
F		1969 ... 1978	EFH_F 	RH_F 	MFH_F 	GMH_F 	HH_F 	
G		1979 ... 1983	EFH_G 	RH_G 	MFH_G 			
H		1984 ... 1994	EFH_H 	RH_H 	MFH_H 			
I		1995 ... 2001	EFH_I 	RH_I 	MFH_I 			
J		2002 ... 2009	EFH_J 	RH_J 	MFH_J 			
K		2010 ... 2015	EFH_K 	RH_K 	MFH_K 			
L		2016 ...	EFH_L 	RH_L 	MFH_L 			
Sonderfälle	F/F	1969 ... 1978	Fertig- haus	EFH_FF 				
	NBL_D	1946 ... 1960	Neue Bundesländer industrieller Wohnungsbau			NBL_MFH_D 		
	NBL_E	1961 ... 1969				NBL_MFH_E 		
	NBL_F	1970 ... 1980					NBL_GMH_F 	NBL_HH_F 
	NBL_G	1981 ... 1985					NBL_GMH_G 	NBL_HH_G 
	NBL_H	1986 ... 1990					NBL_GMH_H 	
								

Tab. 2.3 Baualtersklassen (exemplarisch) nach IWU. (IWU 2015, S. 13)

EFH_B		1860 ... 1918	Typisch 1- oder 2-geschossig, mit Satteldach; Dachgeschoss oftmals ausgebaut; Holzbalkendecken; häufig Mauerwerk aus Vollziegeln oder regionalen Natursteinen, teilweise zweischalig; bisweilen erhaltenswerte bzw. denkmalgeschützte Fassade; Kellerdecke als Kappengewölbe oder Kappendecke, im ländlichen Raum auch als Holzbalkendecke
EFH_D		1949 ... 1957	Typisch 1- oder 2-geschossig, mit Satteldach, Dachgeschoss oftmals ausgebaut; Sparrenzwischenraum bisweilen ausgemauert, Holzbalken- oder Massivdecken; ein- oder zweischaliges Mauerwerk aus Vollziegeln, Trümmer-Hohlblocksteinen o.ä., in Norddeutschland Klinkerschale; Kellerdecke massiv (Stahlbeton o.ä.)
EFH_F		1969 ... 1978	Typisch 1- bis 2-geschossig mit Sattel- oder Flachdach; Betondecken; Mauerwerk aus verputzten Gitterziegeln, Kalksandlochsteinen o. ä., bisweilen Tafelbauweise mit Leichtbau- oder Beton-Sandwich-Elementen („Fertighaus“); in Norddeutschland meist Klinker-Vorsatzschale
EFH_J		2002 ... 2009	Typisch 1- bis 2-geschossig mit Satteldach; Betondecken; Mauerwerk monolithisch (porosierte Ziegel, Porenbeton, o. ä. mit Leichtmörtel) oder massiv (z. B. Kalksandstein) mit Wärmedämmverbundsystem; in Norddeutschland meist Klinker-Vorsatzschale; bisweilen Holz-Leichtbau

regionalen Präferenzen die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile. Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) ist ein Maß für den Wärmedurchgang durch einen festen Körper aufgrund eines Temperaturunterschieds zwischen zwei angrenzenden Fluiden, wie z.B. Wasser oder Luft. Bei einer ebenen Wand gibt er den Wärmestrom (Wärme pro Zeit) pro Fläche und Temperaturunterschied in $W/(m^2 \cdot K)$ an. Der U-Wert ist abhängig von Wärmeübergangskoeffizienten sowie Wärmeleitfähigkeit und Geometrie des festen Körpers. Gebäudebezogene Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz betreffen im Wesentlichen zwei Bereiche:

- Ertüchtigung der thermischen Gebäudehülle (TGH),
- Ertüchtigung der technischen Gebäudeausrüstung (TGA).

Die thermische Gebäudehülle (TGH) umfasst Bauteile und Flächen, die beheizte Bereiche von unbeheizten trennen (Abb. 2.2). Zur TGH gehören begrenzende Bauteile zwischen beheizten Räumen und Außenluft (Außenwände, Fenster, Türen, Dachflächen) sowie begrenzende Bauteile zwischen beheizten und unbeheizten Räumen (oberste Geschossdecke, Kellerdecke, Treppenhauswände, Türen usw.). Die Optimierung der

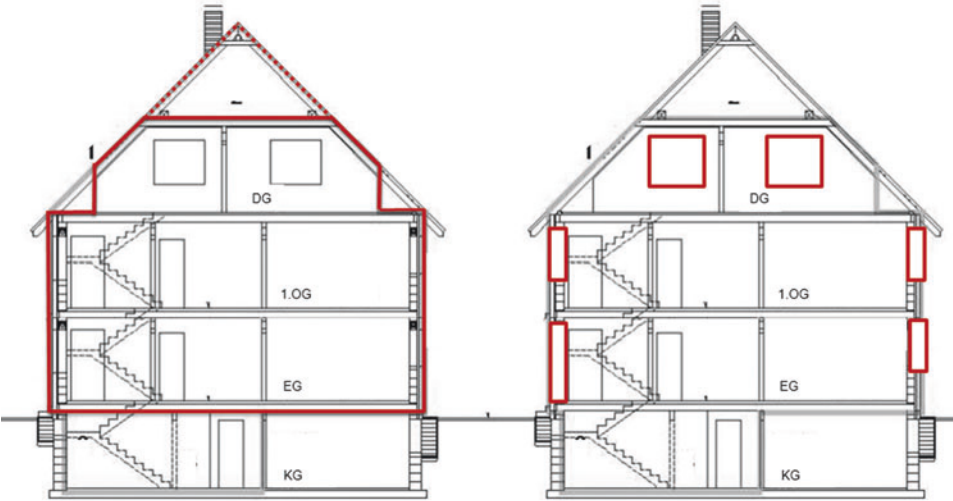


Abb. 2.2 Thermische Gebäudehülle. (© TU Kaiserslautern, Fachbereich Bauingenieurwesen)

technischen Gebäudeausrüstung (TGA) umfasst im Bestand vor allem Wärmeversorgungsanlagen. Lüftungsanlagen sind vor allem bei hochgedämmten Gebäuden bedeutsam. Grundsätzlich kommt im Bereich der TGA nur ein Austausch in Betracht, entweder einzelner Anlagenteile oder ganzer Anlagen.

Tab. 2.4 zeigt für mehrere Bauteile die Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten seit 1976 (vor Einführung WSchV) bis 1995. Die größten thermischen Schwachstellen an Gebäuden sind i. d. R. die Fenster. Allerdings können durch Fensterflächen umgekehrt auch hohe solare Gewinne durch Wärmeeintrag erzielt werden. Heutige Fenster weisen außerdem inzwischen deutlich niedrigere U-Werte auf als Außenwände älterer Gebäude.

Von Bedeutung für das A/V-Verhältnis ist auch die Nachbarbebauung mit ggf. angrenzenden Gebäuden. Einen großen Einfluss auf die Energieeffizienz von Gebäuden nimmt außerdem die Art und Qualität der Wärmeversorgung (Abschn. 2.3).

Tab. 2.4 Typische U-Werte pro Bauteil nach Baualtersklassen. (Quelle: BMVBS 2013, S. 34–35)

	U-Wert [W/m²K]			
Baualtersklasse	Außenwand	Fenster	Oberer Abschluss	Unterer Abschluss
Bis 1976	1,5	2,9	1	1,2
1977 bis 1983	1,2	2,9	0,5	0,85
1984 bis 1994	0,85	1,9	0,3	0,4
Ab 1995	0,35	1,3	0,3	0,3

2.2 Energetische Anforderungen, Vorgaben und Anreize

Energetische Anforderungen und Vorgaben an Neubauten und Bestandsgebäude sind seit der Einführung der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2002 in Deutschland beständig gestiegen ([Abschn. 2.1.3](#)). Gleichzeitig haben Bund, Länder und Kommunen im Zuge der Energiewende umfangreiche Förderprogramme mit finanziellen Anreizen für energetische Sanierungen und Modernisierungen von Gebäuden und Anlagen zur Wärmeversorgung geschaffen.

2.2.1 Anforderungen und Vorgaben auf Bundes- und Länderebene

Energieeinsparverordnung (EnEV)

Energetische Mindest- und Standardanforderungen sind in Deutschland durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) vorgegeben, die 2002 die Wärmeschutzverordnung (WSchV) von 1978 abgelöst hat. Die EnEV gilt grundsätzlich für alle beheizten und gekühlten Gebäude und Gebäudeteile von Neubauten sowie bei Ausbau, Modernisierung, Umbau oder Erweiterung von Bestandsgebäuden. Mindestanforderungen betreffen vor allem Heizungs-, Kühl- und Raumlufttechnik sowie Warmwasserversorgung. Die EnEV 2014 sieht weitreichende Informationspflichten über energetische Kennwerte (Endenergie) in Energieausweisen mit Effizienzklassen von A+ bis H vor. Durch die EnEV 2016 werden die derzeitigen energetischen Anforderungen an Neubauten und Bestandsgebäude ein weiteres Mal erhöht.

Anforderungen der Bundesländer

Einzelne Bundesländer machen von der Möglichkeit Gebrauch, striktere Regelungen zu erlassen, die über die Anforderungen der EnEV hinausgehen. Baden-Württemberg hat beispielsweise das EWärmeG erlassen. Dieses lässt im Vergleich zur EnEV auch Alternativmaßnahmen zu. So kann der benötigte Anteil an Erneuerbaren Energien auf mehrere Arten erreicht (Solarthermie, Photovoltaik, Geothermie...) oder durch eine verbesserte Wärmedämmung kompensiert werden.

2.2.2 Förderprogramme auf Bundesebene

Maßnahmen für die energetische Optimierung von Gebäuden werden in Deutschland auf vielfältige Weise gefördert. Im Folgenden werden mit dem Marktanreizprogramm (MAP) und Förderprogrammen der KfW-Förderbank die beiden wesentlichen Fördermöglichkeiten im Bereich der Wärmeversorgung von Gebäuden vorgestellt. Daneben existieren Steueranreize, auf die in diesem Zusammenhang nicht näher eingegangen wird.

Marktanreizprogramm (MAP)

- Seit 2009 sind Bauherren verpflichtet, bei Neubauten mit über 50 m² Nutzfläche mindestens 50 % der Wärme aus Erneuerbaren Energien zu beziehen (EEWärmeG).

- Förderung von Anlagen zur Nutzung Erneuerbarer Energien im Wärmemarkt sowie zur Energiegewinnung aus Geothermie, Solarthermie und Biomasse für Privatpersonen, Freiberufler, Unternehmen (bezogen auf Geothermie: Erdsonden/Kollektoren, Wärmepumpen, abhängig vom COP; [Abschn. 2.3.2](#)).
- Förderung beim Neubau von Heizwerken, Tiefengeothermieranlagen oder Nahwärmenetzen zur Verteilung erneuerbar erzeugter Wärme, z.B. Quartierlösungen von Kommunen.
- Investitionszuschüsse können je nach Größe der Anlagen im Einzelfall bis zu 7450 Euro betragen.

Förderprogramme der KfW-Förderbank (BMWi [2017a,b](#), KfW [2016](#))

- Förderung durch zinsgünstige Darlehen und Tilgungszuschüsse für Privatpersonen, Freiberufler, Unternehmen, Kommunen.
- Kleine und mittlere Unternehmen erhalten in dem auf Unternehmen zugeschnittenen und von der KfW betreuten Teil des MAP einen KMU-Bonus von zusätzlichen 10 % des Förderbetrags.
- Förderung von kleinen Einzelmaßnahmen bis hin zu großen Anlagen wie Biomasse-Heizkraftwerken oder Wärmenetzen.
- Investitionszuschüsse können je nach Größe der Anlagen im Einzelfall bis zu 30.000 Euro/Wohneinheit betragen.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) betreibt unter www.erneuerbare-energien.de (BMWi [2017c](#)) eine Informationsseite über Förderprogramme des Bundes. Informationen geben außerdem kommunale Energieagenturen, die in Deutschland flächendeckend kostenlose Beratung anbieten.

2.2.3 Ergänzende Instrumente von Bundesländern und Kommunen

Energiekonzepte

Zur Anpassung an umweltpolitische Zielvorgaben hat sich die Aufstellung von Energiekonzepten als Instrument der kommunalen Entwicklungsplanung etabliert. Durch Energiekonzepte werden eine bestmögliche Mischung von Energiebedarfsenkung und rationeller Energieversorgung und eine Verbesserung des lokalen Klimas angestrebt. Hierzu sollen möglichst örtliche Energieangebotspotenziale und Erneuerbare Energien, wie z.B. Oberflächennahe Geothermie, genutzt werden. Auf Grundlage räumlicher Bestandsaufnahmen, lokaler Energiepotenziale sowie Energiebedarfsprognosen werden unterschiedliche Konzeptvarianten für Kommunen entwickelt, bewertet und abschließend Umsetzungsstrategien festgesetzt.

Kommunale Energiekonzepte zählen zu den informellen (räumlichen) Planungsinstrumenten und stellen eine Form der Selbstverpflichtung von Kommunen dar. Werden

Energiekonzepte durch den Stadt- bzw. Gemeinderat beschlossen, entfalten sie die Wirkung einer sonstigen städtebaulichen Verordnung nach § 1 Absatz 6, Nr. 11 BauGB. Die Ergebnisse müssen folglich als Abwägungsbelang im Rahmen der Bauleitplanung berücksichtigt werden. Als informelles Planungsinstrument ist für die erfolgreiche Realisierung von Energiekonzepten insbesondere die Akzeptanz von Bürgern, ansässigen Unternehmen und Energieversorgungsunternehmen (EVU) erforderlich. Dies impliziert eine frühzeitige Beteiligung aller Stakeholder. Weiterhin kann die Kommune über die Gestaltung von Konzessionsverträgen, öffentlicher Energieberatung oder finanziellen Förderprogrammen Anreize für die Umsetzung von Energiekonzepten setzen. Eine Abbildung der gesamten Förderlandschaft (Landesförder- oder Städtebauprogramme) wäre je nach Bundesland unterschiedlich und im Rahmen dieses Beitrags zu umfangreich.

Anschluss- und Benutzungszwang für KWK oder EE-Wärmenetze

§ 16 EEWärmeG ermächtigt die Kommunen in Kombination mit der geltenden Gemeindeordnung (z. B. § 26 Gemeindeordnung Rheinland-Pfalz), aus Gründen des Klima- und Ressourcenschutzes einen Anschluss- und Benutzungszwang für KWK- oder Erneuerbare-Energien-Wärmenetze vorzuschreiben (vgl. Wustlich 2008, S. 119). Allerdings besteht diese Möglichkeit nur für Neubauten. Weiterhin ist ein räumliches Wirkungsgebiet von der Kommune festzusetzen.

Städtebauliche Verordnungen

§ 9 Abs. 1 Nr. 23 b BauGB erlaubt es Gemeinden, aus städtebaulichen Gründen Mindestvorgaben zur Nutzung von Erneuerbaren Energien festzusetzen, bzw. nach § 9 Abs. 1 Nr. 23 a BauGB die Nutzung bestimmter Stoffe (im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) auszuschließen. Faktisch kann so die Benutzung bestimmter Formen der Wärmeerzeugung (z. B. mittels Wärmepumpen) erzwungen werden.

Bestandsgebäude

Während für Neubauten u. a. durch die EnEV, das EEWärmeG oder Festsetzungen in der Bauleitplanung energetische Standards zur Gebäudeoptimierung vorangetrieben werden, bleibt die energetische Optimierung von Bestandsgebäuden aus rechtlicher Sicht eine Schwachstelle. Dies ist insbesondere auf den (rechtlichen) Bestandsschutz zurückzuführen. Im Rahmen der Anpassung von Bestandsgebäuden an geltende energetische Standards bleiben folglich individuelle Anreize das zentrale Steuerungsinstrument ([Abschn. 2.2.2](#)).

Alle Bundesländer und z. T. auch Kommunen fördern ebenfalls Einzelmaßnahmen, z. B. über Landesförderprogramme, Instrumente der Städtebauförderung oder kommunale EVU. Auf Landesebene wird die Förderung vor allem in Form zinsgünstiger Darlehen ausgeschüttet. Diese sind regelmäßig an Einkommensgrenzen von Haushalten gebunden.

Eine detaillierte Übersicht zu Förderprogrammen findet sich in Kap. 8. Darin wird auch die Finanzierung von Anlagen für Oberflächennahe Geothermie näher beleuchtet.

2.3 Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren

Mittels Geothermie, bei Oberflächennaher Geothermie in Verbindung mit einer Wärmepumpe, lässt sich je nach Nutzung bei fast jedem Gebäude der Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf decken. Allerdings beeinflussen, wie auch bei anderen Formen der Wärmeversorgung, unterschiedliche Faktoren die ökologische und ökonomische Bewertung von Geothermieprojekten. Hierzu werden in diesem Kapitel sowohl die relevanten Parameter zur Auslegung von Geothermieprojekten als auch alternative Konzepte und grundlegende Planungsansätze zur Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren vorgestellt.

2.3.1 Wärmebedarf

Wärme und Trinkwarmwasser

Der Wärmebedarf eines Gebäudes setzt sich aus dem Bedarf für Heizwärme und dem für Trinkwarmwasser zusammen. Im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser wird dieser typischerweise über einen einzigen Energieträger sichergestellt. Während der Trinkwarmwasserbedarf hauptsächlich mit der Anzahl der Personen zusammenhängt, korreliert der Heizwärmebedarf vor allem mit den bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes. Die Bewohner bzw. Nutzer haben einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Heizwärmebedarf (Felsmann & Schmidt 2013). Dieser Einfluss steigt allerdings deutlich mit zunehmendem energetischem Standard des Gebäudes (Abschn. 2.1.3). Dies liegt darin begründet, dass Transmissionswärmeverluste sinken und so der Anteil von konstanten Lüftungswärmeverlusten steigt.

Gebäudetypologien

Bestandsgebäude werden üblicherweise nach Gebäudegröße und Baualter gruppiert (Abschn. 2.1.2). Dadurch können große Gebäudebestände hinsichtlich ihrer energetischen Qualität mit geringem Aufwand bewertet werden: Einem Bestandsgebäude kann auf Grundlage weniger Informationen (Baualter, Nutzfläche) ein (statistischer) Wärmeverbrauch zugeordnet werden. Die Gebäudetypologie kann nur den Ursprungszustand des Gebäudes berücksichtigen bzw. getätigte Sanierungen abschätzen. Der tatsächliche Heizwärmebedarf richtet sich nach Zeitpunkt, Umfang und konkreten Maßnahmen zur energetischen Sanierung bzw. Modernisierung.

Heizwärmebedarf/Heizlast

Der Heizwärmebedarf stellt, zusammen mit der maximalen Heizlast, die ausschlaggebende Größe bei der Wahl eines Heizsystems dar. Die maximale Heizlast ist die thermische Leistung, welche durch das Heizungssystem bei Auslegungsbedingungen (nach Norm, insbesondere DIN 4108-3) bereitgestellt werden können muss. Bei älteren Auslegungen findet sich oft eine deutliche Überdimensionierung der Heizungsanlage im Vergleich zur technisch benötigten maximalen Heizlast. Diese resultiert aus der abgelösten Norm (DIN EN 12831) und einem Sicherheitszuschlag, der Behaglichkeit auch bei besonders

ungünstigen Witterungsbedingungen sicherstellen soll. Ein Sicherheitszuschlag wird heute nur noch in geringem Umfang gebraucht, da die Systeme mit einer höheren Genauigkeit bilanziert werden können.

2.3.2 Wärmerzeugung

Energieträger

Um den Heizwärmebedarf bereitzustellen, werden unterschiedliche Wärmeerzeuger eingesetzt. Diese können u.a. nach Art des Energieträgers gruppiert werden und reichen von fossilen Energieträgern (Erdgas, Erdöl, Kohle...) über Strom (elektrische Direktheizung oder elektrische Wärmepumpe) und Fernwärme (fossil oder erneuerbar) bis zu reinen Erneuerbaren Energien (Umweltwärme inkl. Wärmepumpe, Biomasse...) (Tab. 2.5). Die Verteilung der einzelnen Energieträger im Gebäudebestand ist im Einzelfall abhängig von Verfügbarkeit, Preis (je kWh), sozialer Akzeptanz und Förderung (Abschn. 2.2).

Die Energieträger lassen sich weiter nach ihrem Umwelteinfluss und dem Platzbedarf differenziert bewerten (Tab. 2.6).

Niedertemperatur- und Brennwertsysteme

Die Wärmeerzeugung kann außerdem nach Art des Wärmeerzeugers kategorisiert werden. Hier haben sich Brennwertsysteme als heutiger Standard durchgesetzt. Brennwertsysteme

Tab. 2.5 Typische verfügbare Energieträger (Wärme)

Fossil	Erneuerbar
Erdgas/Flüssiggas	Holz (feste Biomasse)
Erdöl/Heizöl	Biogas (flüssig oder gasförmig)
	Umgebungswärme (Solarthermie, Luft/Wasser-Wärmepumpen, Tiefe Geothermie ...)
	Fernwärme*
	Biomasse Direktnutzung (Erzeugung vor Ort)

*Fernwärme wird als Alternative zu EE gewertet, da diese oftmals durch KWK bereitgestellt wird und dadurch ebenfalls Ressourcen schont

Tab. 2.6 Kennwerte zur Bewertung der Umweltverträglichkeit der Energieträger

	Erdgas	Heizöl	Biomasse	Fernwärme	Umweltwärme
Primärenergiefaktor*	1,1	1,1	0,2/0,5**	0,7	0
CO ₂ -Faktor** [g/kWh]	247	319	23	248	0
Erhöhter Platzbedarf (Vergleich IST-Zustand)	Nein	Ja	Ja, außer Bio-Erdgas	Nein	Bedingt

*Gem. GEMIS-Modell; IINAS (2015)

**Der Primärenergiefaktor >0 resultiert aus Emissionen durch Transport und Verarbeitung. Der Brennstoff an sich hat einen Primärenergiefaktor von 0, da der Rohstoff nachwächst

weisen gegenüber Niedertemperatursystemen einen deutlich höheren Wirkungsgrad aus. Ihr Anteil an der Wärmeerzeugung in Wohngebäuden beträgt heute in Deutschland über 90 % (BDH/ZIV 2015).

Wärmepumpensysteme (WPS)

Wärmepumpensysteme (WPS) zur Nutzung von Umweltwärme (erd- oder luftgebunden) stellen im Neubaubereich den heutigen Stand der Technik dar, wo sie aufgrund der geringen benötigten (Vorlauf-)Temperaturen (bei Flächenheizungen: ca. 30–40 °C; zum Vergleich: 55–75 °C bei konventionellen Heizkörpern) moderner Heizsysteme besonders effizient sind. Ihr Anteil bei neu errichteten Wohngebäuden lag in Deutschland 2015 bei ca. 21 % (BDEW 2016). Die extrahierte Umweltwärme wird durch Wärmepumpen auf die zur Beheizung notwendigen (Vorlauf-)Temperaturen erhöht. Erdgebundene Wärmeaufnahme erfolgt über Erdpfähle (Sonden), Kollektoren oder Mischformen wie Körbe oder Grabenkollektoren. Kollektoren werden oberflächennah in das Erdreich eingebracht (horizontal). Erdsonden können vertikal bis zu 100 m (bei Tiefer Geothermie auch mehr) in den Boden reichen und dadurch größere Temperaturdifferenzen ausnutzen. Luftgebundene Wärmepumpen entnehmen Wärme durch ein Gebläse aus der Umgebungsluft.

WPS weisen bei geringen Temperaturhuben (benötigte Vorlauftemperatur abzgl. Temperatur des Quellmediums) einen guten Wirkungsgrad auf. Der Wirkungsgrad des Systems, gemessen über die Jahresarbeitszahl (JAZ), ist insbesondere abhängig von der Leistungszahl (üblich: *coefficient of performance* (COP)) der Wärmepumpe. Eine höhere JAZ führt zu einem geringeren Strombedarf und somit zu geringeren spezifischen Heizkosten (€/m²a). Steigt die benötigte Vorlauftemperatur, z. B. aufgrund von hohem Wärmebedarf oder für Trinkwarmwasser, sinkt die JAZ des Systems. Dies führt ggf. zu höheren Bereitstellungskosten für diese Medien. Folglich sind WPS stärker von Außentemperaturen und Dämmung abhängig als andere Energieversorgungsvarianten (Abschn. 2.3.3).

Kombination von Energieträgern

Insbesondere bei einem größeren Wärmebedarf können Energieträger auch kombiniert eingesetzt werden. So können jeweilige Vorteile genutzt und Nachteile ausgeglichen werden. Ein verbreitetes Beispiel ist die Kombination von Erdgas mit Solarthermie. Solarthermie verursacht weder Kosten für Energieträger noch (direkte) Emissionen. Der wesentliche Nachteil der Solarthermie, nicht immer ausreichend viel und bei ausreichender Temperatur Energie bereitstellen zu können, kann durch erdgasbasierte Wärmeerzeuger (z. B. Erdgas-Brennwertanlage) ausgeglichen werden.

Bei kleinem Wärmebedarf schlagen aus ökonomischer Sicht vor allem die Installationskosten für die Wärmeerzeugung zu Buche. Diese amortisieren sich nur über eine ausreichende Menge an Betriebsstunden. Je mehr Energieträger bzw. Anlagentypen in einem System genutzt werden, desto kürzer ist deren jeweilige Betriebsdauer.

Die Auslegung des Heizsystems bzw. des Energieträgers richtet sich also neben rechtlichen (z. B. EnEV) und technischen (Heizwärmebedarf und Verfügbarkeit) auch maßgeblich nach ökonomischen Anforderungen.

2.3.3 Wärmeverteilung/Wärmeübertragung

Wärmeverteilung, Vorlauf und Rücklauf

An die Wärmeerzeugung schließt sich die Wärmeverteilung und die Wärmeübertragung an das beheizte Volumen an. Die Wärmeverteilung erfolgt i. d. R. über ein Warmwassersystem (Ausnahme: Luftheizungen). Dieses transportiert die Wärme als fühlbare Wärme, also durch Erhöhung der Temperatur. Der Volumenstrom zum Wärmeüberträger wird als Vorlauf bezeichnet. Die Wärme wird im Gebäude mittels Heizkörper oder Flächenheizung als Wärmeüberträger abgegeben. Das heruntergekühlte Wasser fließt als Rücklauf wieder zurück zum Wärmeerzeuger.

Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung erfolgt vereinfacht gemäß folgender Grundgleichung:

Grundgleichung der Wärmeübertragung (vereinfachte Form, eindimensional) (GGdWÜ)

$$P = \dot{Q} = \frac{1}{R} \cdot A \cdot (T_W - T_K) \quad (\text{GGdWÜ})$$

mit:

$P = \dot{Q}$: Abgegebene (Heiz-)Leistung

R : Thermischer Widerstand (hier Wärmeübergangskoeffizient $1/\alpha$)

A : Wärmeübertragende Fläche

T : Oberflächentemperatur (warm, kalt)

Energetische Optimierung von Heizsystemen

Für die energetische Optimierung von Heizsystemen ergeben sich aus der GGdWÜ mehrere Parameter:

- Die Vorlauftemperatur beeinflusst die Wärmeübertragung (vgl. GGdWÜ). Höhere Temperaturen führen zu einem zu höheren Verlusten (v. a. bei Fern- und Nahwärmesystemen), reduzieren aber die benötigte (Heiz-)Fläche, um die Leistung an den Raum zu übertragen. Des Weiteren erzeugen höhere Temperaturen einen höheren konvektiven Anteil an der Wärmeübertragung, der im Gegensatz zur Wärmestrahlung als unangenehm empfunden wird. Höhere Strahlungsenergie bzw. Strahlungsanteile führen zu einer geringeren benötigten Raumtemperatur, da sich die für die Behaglichkeit relevante „gefühlte Temperatur“ aus Raumtemperatur und absorbierte Strahlung zusammensetzt. Nach diesem Prinzip werden z. B. Lagerhallen beheizt, in denen bei Raumlufttemperaturen von 15 °C Behaglichkeit durch Strahlungswärme (sog. Dunkelstrahler) erzeugt wird.
- Die geringere Wärmeübertragung durch niedrigere Vorlauftemperaturen kann durch eine größere wärmeübertragende bzw. strömungstechnisch günstiger gestaltete Fläche ausgeglichen werden (vgl. GGdWÜ).

- Sinkt der Heizwärmebedarf bzw. die maximale Heizlast eines Gebäudes, kann auch der Wärmeüberträger entsprechend geringer dimensioniert werden. Dies kann, bei gegebener Geometrie des Wärmeüberträgers, entweder über eine Reduktion der Vorlauftemperatur oder durch Verkleinerung der wärmeübertragenden Fläche erfolgen. Ersteres ist aus Gründen der Effizienz und Behaglichkeit zu bevorzugen.
- Die Vorlauftemperatur hat auch Einfluss auf den Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers, vor allem bei Brennwertanlagen und Erneuerbaren Energien. Bei Brennwertgeräten hängt der Wirkungsgrad der Brennwertfunktion von der Rücklauftemperatur ab. Je geringer diese ist, desto mehr Wärme kann aus dem Abgas entzogen werden. Erneuerbare Energien liegen i. d. R. bei geringeren Temperaturen vor als Wärme aus konventionellen Energieträgern. Somit profitieren diese besonders von geringen Vorlauftemperaturen. Dies bedeutet im Falle von (Erd-)Wärmepumpen, dass diese die Umgebungswärme auf ein geringeres Temperaturniveau (an)heben müssen und somit weniger elektrischen Strom benötigen, um die benötigte Wärmemenge bereitzustellen.

Zusammengefasst ergeben sich diese Relationen:

- Geringerer Heizwärmebedarf und geringere Heizlast sowie größere Wärmeübertragungsflächen (im Optimalfall Flächenheizungen wie Fußboden-, Wand- oder Deckenheizungen) ermöglichen geringere Vorlauftemperaturen.
- Die geringeren Vorlauftemperaturen führen zu besseren Wirkungsgraden der Brenner bzw. einem höheren Anteil an Erneuerbaren Energien des Heizsystems und somit zu einer höheren Ausnutzung der bereitgestellten Endenergie (sowohl bei Umgebungswärme als auch bei fossilen Energieträgern).

Behaglichkeit und sonstige Faktoren

Beim Einsatz von Flächenheizungen steigt die Behaglichkeit (DIN EN ISO 7730) der Nutzer, und der Flächenverbrauch ist gegenüber Heizkörpern geringer. Allerdings sind größere Änderungen der Raumlufttemperatur (z. B. in ausgekühlten Gebäuden) mit Flächenheizungen nicht so schnell möglich wie mit Heizkörpern, was besondere Anforderungen an die Heizungssteuerung stellen kann. Hinzu kommen ggf. hohe Investitionskosten für Umrüstungen im Bestand ([Abschn. 2.3.5](#)).

2.3.4 Wärmespeicher

Speicher werden allgemein zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage eingesetzt. In Heizsystemen wird hierdurch die Differenz zwischen bereitgestellter Wärme(leistung) und der benötigten Heizlast ausgeglichen. So kann der Heizwärmeerzeuger kleiner dimensioniert werden, was neben einem Kostenvorteil i. d. R. auch einen höheren Wirkungsgrad mit sich bringt. Dieser gründet sich darin, dass der Wärmeerzeuger öfter in seinem Auslegungspunkt arbeitet und weniger im Teillastbereich.

Wärmespeicher können u. a. nach dem physikalischen Effekt, der für die Wärmespeicherung verantwortlich ist, oder dem genutzten Speichermedium kategorisiert werden. Bei

der Speicherung von Wärme wird fast ausschließlich Wasser genutzt, das durch Temperaturänderung Wärme speichert. Im Bereich von Einfamilienhäusern kommen, je nach Energiekonzept, Speicher mit bis zu 2000 l Wasser zum Einsatz (sog. Pufferspeicher).

In Kombination mit einer Wärmepumpe (und Geothermie) ist auch eine Nutzung dieser Speicher zur Regelung des elektrischen Netzes denkbar. Hierzu müsste bekannt sein, ob das zu entlastende System mehr oder weniger Energie abgeben/übertragen sollte (Netzstabilität). Die vom Heizsystem dann aufgenommene Energie kann den Heizwärmebedarf der nächsten Zeitschritte decken und so einen Strombezug der Wärmepumpe für maximal einige Tage unterbinden.

2.3.5 Vom Gebäude zum Quartier

Dezentrale vs. zentrale Energieversorgung

Nicht nur bei größeren Gebäuden (MFH, Büro/Gewerbe/Handel etc.) sondern prinzipiell auch bei Ein- und Zweifamilienhäusern können blockweise oder quartierszentrale Konzepte zur Wärmeerzeugung vorteilhaft gegenüber gebäudebezogenen Einzellösungen sein. Voraussetzung hierfür ist ein Nahwärmenetz, das ggf. von EVU bezuschusst bzw. betrieben werden kann. Zentrale Lösungen ermöglichen Skaleneffekte bei Investition, Instandhaltung (insb. Prüfung, Wartung, Instandsetzung, DIN 31051) und Betrieb gegenüber dezentralen Systemen. Investitionen amortisieren sich ggf. schneller durch mehr Betriebsstunden ([Abschn. 2.3.2](#)), zudem führen zentrale Lösungen i. d. R. zu niedrigeren Kosten für Planung und Installation gegenüber zahlreichen kleinteiligen Einzellösungen. Ein kontinuierlicher Betrieb des Wärmeerzeugers mit weniger Starts (Brenner oder Wärmepumpe) führt bei gleichem Heizwärmebedarf zu geringeren Energieverbräuchen. Der Betrieb kann durch EVU bzw. spezialisierte Dienstleister effizient durchgeführt werden. Je nach Ausgestaltung können dadurch operative Risiken für Eigentümer bzw. Bestandshalter minimiert werden.

2.3.5.1 Fallbeispiel: Grundlagen

Im Folgenden werden Energieversorgungskonzepte aus dem Quartierskonzept Bahnheim dargestellt, das 2014/2015 von den Fachgebieten Immobilienökonomie, Baukonstruktion und Fertigteilbau sowie Hauskybernetik der TU Kaiserslautern erstellt wurde. Das Bahnheim ist ein Quartier in Kaiserslautern mit 369 Wohnungen in 77 Gebäuden (22.236 m² WF) aus den 1920er Jahren. In den 1950er Jahren wurden zerstörte Gebäude wieder aufgebaut. Das Quartier befindet sich im Eigentum der Baugenossenschaft Bahnheim e. G. (Bestandshalter). Durch den Status als Denkmalschutzzone dürfen Außenfassaden im Quartier nicht verändert werden. Energetische Modernisierungsmaßnahmen im Quartierskonzept konzentrieren sich daher vor allem auf die Energieversorgung.

Auf gebäudebezogene Einmalkosten in dem spezifischen Gebäudebestand der Bahnheim e.G. wird bei der wirtschaftlichen Bewertung der Energieversorgungskonzepte in diesem Beitrag nicht eingegangen.

Tab. 2.7 Mögliche Kriterien und Restriktionen zur Eingrenzung der möglichen Energieträger

Energieträger		Restriktionen	
(Oberflächennahe) Geothermie	Flächenkollektoren	Hohe laufende Kosten bei geringem Sanierungsstand	Großflächige Erdarbeiten (ca. 45.000 m ² unbebaute Fläche)
	Erdsonden		
Luft-Wasser-Wärmepumpe			
Tiefe Geothermie bzw. Wasser-Wasser-Wärmepumpe		Hohe Investitionskosten & Auffundungsrisiko	
Feste/gasförmige Biomasse		Dauerhafter Lagerort (unterirdisch möglich), regelmäßige Anlieferung	

Energieversorgungskonzepte (EV)

Durch Kombination einzelner oder mehrerer Technologien wurden im Quartierskonzept sieben Energieversorgungskonzepte (EV) abgeleitet. Dabei werden insbesondere blockweise Beheizungsformen und quartierszentrale Konzepte betrachtet. Die Versorgung mit elektrischem Strom wird als Zusatznutzen einzelner Konzepte mit betrachtet.

Eingrenzung der Energieträger

Tab. 2.7 zeigt die einzelnen Energieträger und Restriktionen für den Bestandshalter. Ein möglichst hoher Anteil Erneuerbarer Energien ist generell anzustreben. Vor allem Erneuerbare Energien benötigen allerdings i. d. R. relativ viel Platz bzw. Eingriffe in die direkte Umgebung des Quartiers.

Gebäudebezogene Maßnahmen

Grundsätzlich kann eine effiziente bzw. umweltfreundliche Energieversorgung bauliche Maßnahmen (v. a. Dämmungen) nie ersetzen. Nur so können die Endenergieverbräuche und Nebenkosten der Gebäude nachhaltig reduziert werden. Anlagen zur Bereitstellung (und eventuellen Bevorratung) von EE können dadurch möglichst klein und kostengünstig dimensioniert werden. Vor allem diese Reduktion der Nebenkosten kann an Bewohner der Gebäude weitergegeben werden und sorgt zusätzlich für ein attraktives Wohnangebot.

Energiepreise, Steuern, Abgaben

Je höher der Anteil solcher EE, die vor Ort erzeugt werden, desto sicherer kann der künftige Preis vorausgesagt werden, da der Anteil an schwer kalkulier- bzw. prognostizierbaren Kosten sinkt. In der Zukunft erhobene oder sich ändernde Steuern und andere Abgaben können kaum vorhergesagt werden.

2.3.5.2 Fallbeispiel: Erste Konkretisierung der Energieträger und Maßnahmen

Einzelmaßnahmen lassen sich zu Energieversorgungskonzepten (EV) kombinieren, die Vorteile kombinieren und Nachteile möglichst ausgleichen. Um EV einander

gegenüberstellen zu können, werden der Primärenergiebedarf (nach EnEV14) und CO₂-Emissionen (nach GEMIS) für jedes EV angegeben. Als Referenz wird die Fortsetzung der bestehenden Strategie – mit kontinuierlicher Erneuerung der bestehenden Gasetagenheizungen (EV0) – betrachtet. Darauf folgen mögliche Alternativen mit sinkender Zahl an Feuerstellen. In diesen Alternativen versorgen weniger Heizungen die gesamte Siedlung. Hierfür ist ein entsprechendes Leitungsnetz erforderlich (**Nahwärmenetz**).

Die Umwelteinflüsse beziehen sich immer auf den nichtsanierten Bestand mit einem Verbrauch von 3,7 Mio. kWh/a Erdgas (2013).

Die Bewertung der EV geschieht über die nicht verursachten Emissionen (CO₂-Äq.) und die benötigte Primärenergie. Neben den Daten aus GEMIS (hier vor allem Erdgas: 247 g CO₂-Äq./kWh) wurden die Primärenergiefaktoren nach EnEV14 genutzt.

EV0: Kontinuierliche Erneuerung der bestehenden Gasetagenheizungen (GEH)

Variante EV0 (Tab. 2.8, Abb. 2.3) bildet den IST-Zustand ab, bei dem die bestehenden Gasetagenheizungen nach Bedarf erneuert werden.

Bauliche Maßnahmen: Austausch Gasetagenheizungen.

Tab. 2.8 Maßnahmenblatt EV0

Technische Spezifikation des System		Eine Gasetagenheizung pro Wohneinheit	
Grund der Verbesserung		Steigender mittlerer Wirkungsgrad durch Austausch des Kessels und somit Nutzung von Brennwerttechnik	
Umwelteinfluss			
4,1	Mio. kWh Primärenergie/a	950	t CO ₂ -eq./a
Vorteile:		Nachteile:	
		• Viele Zündungen (→ viele Emissionen, v. a. durch unverbrannten Brennstoff)	

Abb. 2.3 EV0 Kontinuierliche Erneuerung der bestehenden Gasetagenheizungen. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)



2.3.5.3 Blockweise Beheizung

Bei blockweiser Beheizung wird die Wärmeerzeugung für mehrere Gebäude zusammengefasst. Dies kann über Blockzentralheizungen (z. B. Oberflächennahe Geothermie bzw. Luft-Wasser-Wärmepumpe) erfolgen. Eine weitergehende Aggregation wird danach mit quartierszentralen Konzepten betrachtet.

EV1: Blockzentralheizungen

Durch blockweise Beheizung, also einem Heizkessel „pro vier Außenwände“, reduziert sich in Variante EV1 die Anzahl der Anlagen (Abb. 2.4, Tab. 2.9). Ein Teil der Emissionen wird durch unvollständig verbrannten Brennstoff bei Beginn der Verbrennung verursacht, was als Reduktion des Wirkungsgrads interpretiert werden kann. Eine zentrale Beheizung reduziert außerdem insgesamt den Wartungsaufwand im Quartier.

Blockzentralheizungen gehören vor allem in neuen Mehrfamilienhäusern zum heutigen Stand der Technik. Durch ein Verteilsystem wird die Wärme in die einzelnen Wohnungen verteilt. Für die Nutzer entsteht durch den Entfall der Anlage in der Wohnung zusätzlicher

Abb. 2.4 EV1
Blockzentralheizungen. (© TU
Kaiserslautern, Fachgebiet
Hauskybernetik)



Tab. 2.9 Maßnahmenblatt EV1

Technische Spezifikation des Systems		Ein Heizkessel pro (Gebäude-)Block	
Grund der Verbesserung		Steigender mittlerer Wirkungsgrad durch Austausch, weniger Starts des Heizungssystems	
Umwelteinfluss			
4	Mio. kWh Primärenergie/a	927	t CO ₂ -eq./a
Vorteile:		Nachteile:	
• Weniger Zündungen und weniger Kosten • Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein		• Steht im unbeheizten Keller (Leitungsverluste)	

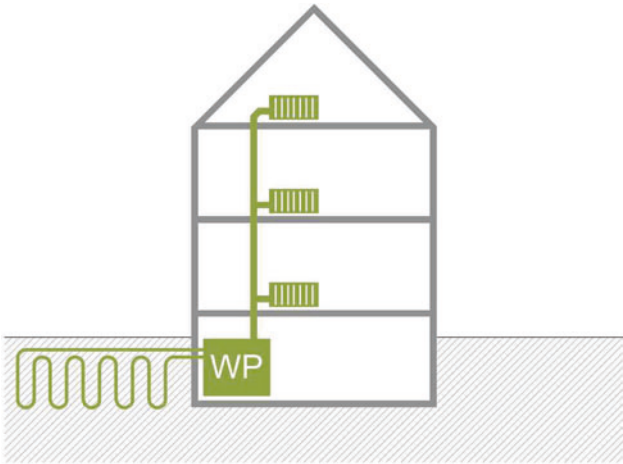
Platz. Zudem sinkt durch einen kontinuierlicheren Prozess die Anzahl der Brennerstarts, was zu leicht sinkenden Emissionen (ca. 5 %) und Verbräuchen führt.

Bauliche Maßnahmen (Gebäude): Rückbau der Gasleitungen (inkl. Zähler) im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, „Heizungsraum“ im Keller, evtl. Wärmemengenzähler pro WE.

EV2a+b: Oberflächennahe Geothermie bzw. Luft-Wasser-Wärmepumpe

Wärmepumpen (Abb. 2.5, Tab. 2.10) zur Nutzung von Umweltwärme (erd- oder luftgebunden) stellen im Neubaubereich den heutigen Stand der Technik dar. Die zur Beheizung

Abb. 2.5 EV2a+b
Oberflächennahe Geothermie
bzw. Luft-Wasser-
Wärmepumpe. (© TU
Kaiserslautern, Fachgebiet
Hauskybernetik)



Tab. 2.10 Maßnahmenblatt EV2

Technische Spezifikation des Systems		Oberflächennahe Geothermie	
Grund der Verbesserung		Umweltwärme	
Umwelteinfluss			
2,1	Mio. kWh Primärenergie/a	666*	t CO ₂ -eq./a
Vorteile:		Nachteile:	
• Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein		• Betriebskosten/Stromverbrauch abhängig von Umgebungstemperatur und Dämmniveau • Hoher (Flächen-)Aufwand bei Installation von Flächenkollektoren** • Konventionelle Heizkörper als Wärmeüberträger ungünstig*** • Für Niedrig-Energie-Haus (Neubau) optimiert	

*Bei 569 g/kWh_{el} und JAZ von 3,5. (BMU2 2015)

**Erdreichabtragung für spiralförmige Verlegung von Rohren ca. 1,5 m unter Erdoberfläche

***Konventionelle Heizkörper bieten im Gegensatz zu Flächenheizung (z. B. Fußbodenheizung) eine relativ geringe Oberfläche, sodass benötigte Vorlauftemperatur und Heizkosten steigen

notwendigen (Vorlauf-)Temperaturen, die durch Wärmepumpen aus Umweltwärme erzeugt werden, hängen von unterschiedlichen Faktoren ab ([Abschn. 2.3.2](#)). Sie sind am niedrigsten bei Einsatz von Flächenheizungen statt konventioneller Heizkörper.

Bauliche Maßnahmen: Rückbau der Gasleitungen im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, „Heizungsraum“ im Keller, (evtl. Wärmemengenzähler pro WE), Installation von Wärmepumpe und Kollektoren/Erdsonden.

Anmerkung: Elektrische Wärmepumpen, wenn sie wie i. d. R. über das öffentliche Netz versorgt werden, profitieren von den sinkenden Emissionswerten des Stroms aus dem öffentlichen Netz. Mit steigendem Anteil an EE, wie in mehreren Zielvorgaben auf Landes-Bundes- und EU-Ebene festgelegt, sinken die (spezifischen) Emissionen von Strom aus dem öffentlichen Netz weiter.

2.3.5.4 Quartierszentrale Konzepte

Quartierszentrale Konzepte sollten grundsätzlich **nicht vom Gebäudeeigentümer bzw. Bestandshalter** (z. B. Wohnungsunternehmen) selbst betrieben werden, sondern durch EVU bzw. spezialisierte Dienstleister (z. B. **Contractor**). So können nicht nur operative Risiken reduziert bzw. übertragen werden, sondern auch der Mehraufwand für die (technische) Betreuung solcher Anlagen und ggf. resultierende gewerbliche Tätigkeit.

EV3a: Erdgas BHKW + Nahwärmenetz

Blockheizkraftwerke (BHKW) produzieren Wärme und Strom (Kraft-Wärme-Kopplung). Mit steigender Größe nimmt der Wirkungsgrad zu, sodass produzierte Wärme sinnvoll über Nahwärmenetze verteilt wird ([Abb. 2.6](#), [Tab. 2.11](#)). Dies bietet zudem die Möglichkeit einer schrittweisen Erneuerung bestehender Anlagen. Die Wärme wird mittels Übergabestationen an Wohnungen übergeben. Aus Nutzersicht ist dies äquivalent zu „klassischer“ Fernwärme. An ein Nahwärmenetz können auch weitere Abnehmer angeschlossen werden. Der Anlagenbetreiber rechnet direkt mit den Bewohnern ab, die anstatt einer Gasrechnung eine Rechnung über die bezogene Wärme erhalten.

Bauliche Maßnahmen: Rückbau der Gasleitungen im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, Heizzentrale im Quartier (garagengroß), Wärmenetz zwischen Gebäuden und Heizzentrale, Wärmemengenzähler pro WE.

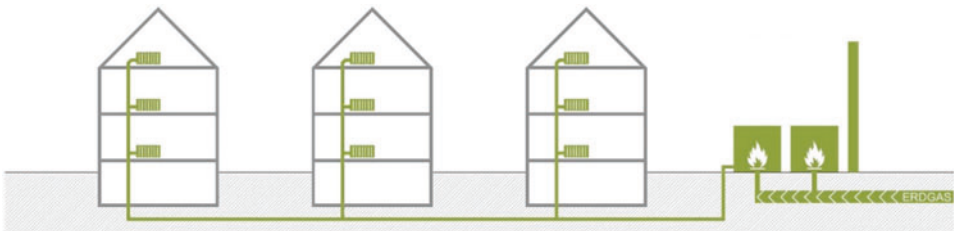


Abb. 2.6 EV3a Erdgas BHKW + Nahwärmenetz. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

Tab. 2.11 Maßnahmenblatt EV3a

Technische Spezifikation des Systems		Zentrales Blockheizkraftwerk mit Spitzenlastkessel	
Grund der Verbesserung		Gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme	
Umwelteinfluss			
4	Mio. kWh Primärenergie/a	632*	t CO ₂ -eq./a
Vorteile:		Nachteile:	
• Kann bilanziell auch mit (gasförmiger) Biomasse („Bio-Erdgas“) befeuert werden • Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein • Ein zentraler Kamin		• Wärmeverlust durch Verteilung, ggf. reduzierbar durch Verlegung durch Gebäude	

*794 t CO₂-eq./a durch Verbrennung von Erdgas, sowie 162,3 t CO₂-eq./a Gutschrift für gleichzeitige Substitution von elektrischem Strom aus dem Netz

Anmerkung: Ein Nahwärmenetz mit BHKW ist aus technischer Sicht quasi identisch mit ggf. vorhandener Fernwärme. Deshalb sollte aus technischer Sicht diese Maßnahme nur umgesetzt werden, wenn sich große Einsparungen **finanziell** und/oder bei den **Emissionen** ergeben.

EV3b: Biomasse BHKW + Nahwärmenetz

EV3b (Abb. 2.7, Tab. 2.12) entspricht konzeptionell EV3a, nur dass durch den Einsatz von Biomasse die CO₂-Emissionen (bilanziell) gesenkt werden.

Bauliche Maßnahmen: Rückbau der Gasleitungen im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, Heizzentrale im Quartier (garagengroß), Wärmenetz zwischen Gebäuden und Heizzentrale, Wärmemengenzähler pro WE.

Anmerkung: Es gelten die gleichen Anmerkungen wie für EV3a.

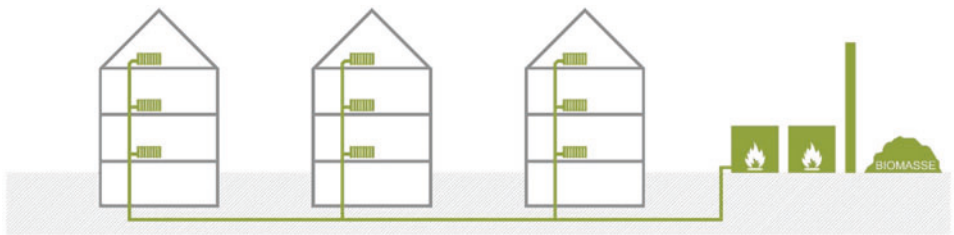


Abb. 2.7 EV3b Biomasse BHKW + Nahwärmenetz. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

Tab. 2.12 Maßnahmenblatt EV3b

Technische Spezifikation des Systems		Zentrales Blockheizkraftwerk mit Spitzenlastkessel	
Grund der Verbesserung		Gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme	
Umwelteinfluss			
0*	Mio. kWh Primärenergie/a	<0**	t CO ₂ -eq./a
Vorteile:		Nachteile:	
• Kann bilanziell auch nur teilweise Biomasse befeuert werden • Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein • Ein zentraler Kamin		• Wärmeverlust durch Verteilung, reduzierbar durch Verlegung durch Gebäude • Vorratsraum bei fester Biomasse nötig	

*Bei Nutzung von 100 % Biogas
**Siehe EV3a, Kappung bei 0 t CO₂-eq./a.

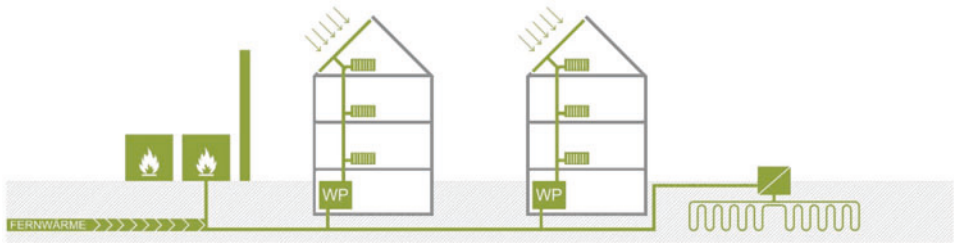


Abb. 2.8 EV4 Kaltes Nahwärmenetz + Geothermie + Solarthermie + BHKW + PV + FW. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

EV4: Kaltes Nahwärmenetz + Geothermie + Solarthermie + BHKW + Photovoltaik + Fernwärme

Ein kaltes Nahwärmenetz (Abb. 2.8, Tab. 2.13) erlaubt die Einspeisung verschiedener Energiequellen, wie z. B. Geothermie, Rücklauf-Fernwärme, Abwärme aus Industrie oder Solarthermie. Die Wärme wird dann bei vergleichsweise geringen Temperaturen in einem Nahwärmenetz gespeichert. Mittels Wärmepumpe wird diese in Gebäuden aus dem Netz entnommen und auf das benötigte Energieniveau „gepumpt“. PV-Module liefern (bilanziell) den für die Wärmepumpen benötigten Strom. Für den Fall, dass nicht genug Wärme im Nahwärmenetz zur Verfügung steht, ist dieses mit dem Fernwärmenetz verbunden. Es gilt ansonsten das Gleiche wie für Nahwärmenetze in EV3a.

Bauliche Maßnahmen: Rückbau der Gasleitungen im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, Heizzentrale im Quartier (garagengroß) inkl. Erdarbeiten für Geothermie, Heizungsraum (Wärmepumpe pro Gebäude), Solarthermie etc. (je nach Variante), Wärmenetz zwischen Gebäuden und Heizzentrale, Wärmemengenzähler pro WE.

Tab. 2.13 Maßnahmenblatt EV4

Technische Spezifikation des Systems		Dezentrales (Niedertemperatur-)Nahwärmenetz, Anhebung mittels WP je Gebäude; Fernwärme als Redundanz der Einspeisung bzw. Spitzenlast	
Grund der Verbesserung		Nutzung von Umweltwärme	
Umwelteinfluss*			
~ 0	Mio. kWh Primärenergie/a	0	t CO ₂ -eq./a
Vorteile:		Nachteile:	
• BHKW kann bilanziell auch mit (gasförmiger) Biomasse befeuert werden • Wärmespeicherung (saisonal) möglich • Nutzung mehrerer Erneuerbarer Energien, wie Abwasser etc. • Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein • Ein zentraler Kamin		• Konventionelle Heizkörper als Wärmeüberträger ungünstig** • Flächenbedarf für Geothermie-Flächen- und Solarkollektoren	

*Wenn die Produktion von elektrischem Strom aus PV und Biomasse-BHKW mindestens den Bedarf der Wärmepumpen deckt und keine Einspeisung aus Fernwärme nötig ist.
**Konventionelle Heizkörper bieten im Gegensatz zu Flächenheizung (z. B. Fußbodenheizung) eine relativ geringe Oberfläche, sodass benötigte Vorlauftemperatur und Heizkosten steigen.

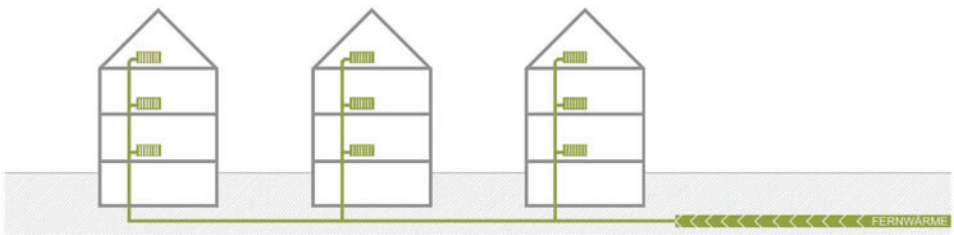


Abb. 2.9 EV5 Fernwärme. (© TU Kaiserslautern, Fachgebiet Hauskybernetik)

EV5: Fernwärme

Die „klassische“ Fernwärme (Abb. 2.9, Tab. 2.14) funktioniert ähnlich wie die oben beschriebenen Varianten. Die Wärme wird zentral erzeugt (z. B. durch Heizkraftwerk, Tiefe Geothermie) und zum Verbraucher transportiert. Die benötigte Installation in der Wohnung ist deutlich kleiner als eine Gasetagenheizung und schafft so zusätzlichen Platz in Wohnungen. Die Abrechnung der genutzten Wärme erfolgt direkt mit dem Versorger.

Konstruktiv und wirtschaftlich ist eine prinzipiell mögliche Verlegung der FW-Leitungen durch Keller nicht sinnvoll. Den zu erwartenden Wärmegewinnen im Keller stehen hohe Kosten (v. a. für Verankerung) und vor allem der große Platzbedarf der Leitungen (2 Leitungen á ~300 mm Durchmesser; DN100 + 2·100 mm Dämmung) entgegen.

Tab. 2.14 Maßnahmenblatt EV6

Technische Spezifikation des Systems		Ein Anschluss pro Block	
Grund der Verbesserung		Gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme	
Umwelteinfluss*			
2,59	Mio. kWh Primärenergie/a	1091,5**	t CO ₂ -eq./a
Vorteile:		Nachteile:	
• Abwicklung komplett durch EVU • Platzgewinn in Wohnung durch Entfall der Einzelthermen, ggf. Rückbau Schornstein • Kein Kamin		• Abhängig vom EVU, sowohl preislich als auch in Bezug auf Umwelteinfluss	

*Primärenergiefaktor lt. EVU seit 2015: 0,7
**Mittelwert für D (295g/kWh); gem. GEMIS-Modell; IINAS (2015)

Abhängig von Preisen sollte ein Optimum aus möglichst wenigen Hausanschlüssen und möglichst kurzen Rohrleitungen in Gebäuden zu finden sein, da vor allem Anlagenteile im Gebäude störanfällig sind.

Bauliche Maßnahmen: Rückbau der Gasleitungen im Gebäude, Verlegung der Heizungsrohre an gleicher Stelle, Wärmenetz zwischen Gebäuden und Fernwärmetrasse, Wärmemengenzähler pro WE.

Anmerkung: Durch Nutzung von Abwärme, z. B. aus Industrie oder Müllverwertung, sowie die Einbindung von EE, z. B. Tiefer Geothermie, sinken CO₂-Emissionen und Primärenergiebedarf von Fernwärme.

2.3.5.5 Eingrenzung der energetischen Effekte aus Energieversorgungskonzepten

Tab. 2.15 vergleicht die möglichen Einsparungen (Primärenergie, Emissionen) durch die einzelnen Varianten der Energieversorgung. Gebäudebezogene Sanierungsmaßnahmen sind dabei nicht berücksichtigt. Zusätzlich ist eine Variante 5b mit Fernwärme aus Tiefer Geothermie dargestellt.

Tab. 2.15 Ökologische Bewertung EV0 bis EV5

Variante		Einsparung p.a.	
		Primärenergie [Mio. kWh]	Emissionen [t CO ₂ -eq.]
1	Gebäudeheizzentrale	0,1	23
2	Oberflächennahe Geothermie bzw. Luft-Wasser-Wärmepumpe	2,0	284
3a	BHKW	0,1	327
3b	Biomasse-BHKW	4,1	950
4	Kalte Nahwärme	4,1	950
5a	Fernwärme	1,5	-141,5
5b	Fernwärme aus Tiefer Geothermie	4,1	950

EV0 könnte über die kontinuierliche Erneuerung bestehender Anlagen aufgrund technischen Fortschritts Energieeinsparungen erzielen, die aber nicht ins Gewicht fallen (Brennwerttechnik ist in Deutschland bei Gasetagenheizungen seit Mitte der 90er Jahre üblich). EV2, EV3b und EV4 und EV5b erzielen aufgrund des Einsatzes von Erneuerbarer Energie die größtmöglichen Einsparungen an Primärenergie und CO₂-äquivalenten Emissionen (DIN 18599). EV1 (Gebäudeheizzentrale) und EV3a (BHKW mit fossilen Brennstoffen) bringen nur geringfügige Primärenergieeinsparungen in Höhe von ca. 2,5 %.

Tab. 2.16 zeigt die erwarteten Investitionskosten der EV sowie die erwarteten Lebenszykluskosten (LZK) aus Eigentümer- und Nutzersicht. Die in Tab. 2.16 dargestellten LZK basieren auf einem Zeitraum von 20 Jahren und beziehen Erstinvestitionen sowie den Barwert der Betriebskosten, der laufenden Instandhaltungskosten und der Ersatzinvestitionen ein. Fördermittel von KfW und BAFA (Abschn. 2.2.2; Stand: Juni 2015) sind berücksichtigt. Je nach Gebäudemerkmalen fallen beträchtliche Kosten für die Installation von Flächenheizungen und den Rückbau obsoleter Heizkörper an, die die Wirtschaftlichkeit der EV erheblich beeinflussen können. Dies muss in jedem Einzelfall bewertet werden. Da diese Kosten spezifisch für das Bahnheim-Quartier sind, sind sie in Tab. 2.16 nicht ausgewiesen. Die Darstellung basiert auf der Annahme, dass gebäudeseitige Voraussetzungen wie Flächenheizungen gegeben sind und nur die Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung für die EV1 bis 5 hergestellt werden muss.

In EV0 wird von der Erneuerung aller Gasetagenheizungen am Anfang des Betrachtungszeitraums ausgegangen. Die Verbrauchskosten aus Nutzersicht sind bei EV0, abgesehen von EV4 und EV5, mit Abstand am höchsten. EV1 ist aus Eigentümersicht, abgesehen von EV3b und EV5, die kostengünstigste Variante. Allerdings liegen die Lebenszykluskosten für die Nutzer ca. 13 % (35 %) über denen der KWK-Variante EV3a (EV3b). Die Errichtung des Nahwärmenetzes und der Hausanschlüsse schlagen mit etwa 630.000 EUR zu Buche und werden in EV3a, EV3b und EV4 vom Bestandshalter getragen.

Tab. 2.16 Ökonomische Bewertung EV0 bis EV6 (Stand: Juni 2015)

EV	LD [a]	Invest (brutto) [1000 €]	LZK Eigentümer [1000 €]	LZK Nutzer [1000 €]	
				P, I, W	Verbrauch
0	20	1201	1201	330	3109
1	20	1109	1109	120	2406
2	15	2173	2992	28	2126
3a	20	1481	1481	149	2198
3b	20	1481	750	149	1780
4	20	2173	2344	88	3402
5	100	318	318	0	3796
Basis: 369 WE, 22.236 m ² WF			LZK: Lebenszykluskosten = Investitionskosten und Nutzungskosten (Betrieb, Instandhaltung, Ersatz), 20 Jahre, Barwert (gew. Kapitalkosten, i = 4,0 %) LD: Lebensdauer P: Prüfung, I: Inspektion, W: Wartung		

Die LZK von EV2 sind aufgrund der kürzeren Lebensdauer der Wärmepumpen, die im Betrachtungszeitraum von 20 Jahren bereits einmal erneuert werden müssen, am höchsten: Der Barwert der Erneuerungsinvestition beträgt 819.000 Euro (2,992 Mio. Euro – 2,173 Mio. Euro). Auch die Erstinvestitionen von EV2, vor allem aufgrund der Erdsonden, sind mit Abstand am höchsten. Aus Nutzersicht sind die LZK bei dieser Variante deutlich günstiger als in EV0 und EV5. EV3b erzielt Einsparungen bei den Betriebskosten aufgrund der derzeit höheren Einspeisevergütung für Strom aus biomassebetriebenen BHKWs und ist dadurch aus Nutzersicht die günstige Variante. Die technisch aufwendigste Lösung EV 4 erweist sich als unwirtschaftlich. Die LZK für Nutzer und Eigentümer liegen aufgrund der hohen Investitions- und Nutzungskosten, insbesondere der hohen Anzahl an Einzelanlagen und des selbst betriebenen Nahwärmenetzes, inklusive erzielter Einspeisevergütungen nach heutigem Stand ca. 11 % über der zweit teuersten Variante (EV5). EV5 (Fernwärme) finanziert sich weitgehend aus den Verbrauchskosten. Daher resultieren für die Nutzer bei dieser Variante die höchsten Lebenszykluskosten. Die Kosten für die Errichtung des Nahwärmenetzes und der Hausanschlüsse in EV5 werden üblicherweise vom EVU übernommen.

2.3.5.6 Wärmespeicher

In EV0 bis EV5 wurden keine Wärmespeicher berücksichtigt. Diese könnten sowohl dezentral zur schnelleren Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs eingesetzt werden oder zentral. Zentrale Wärmespeicher können, wie in [Abschn. 2.3.4](#) beschrieben, das vorgeschaltete System optimieren. Beim Einsatz eines BHKW könnte Strom nach Bedarf erzeugt und die dabei anfallende Wärme eingespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt verbraucht werden. Analoges gilt für eine Wärmepumpe, bei der netzdienlich Wärme erzeugt wird und diese nach Bedarf aus dem Speicher abgerufen werden kann.

Vor allem Speicher in Zusammenhang mit größeren BHKW-Anlagen stellen eine interessante Möglichkeit zur Steuerung des elektrischen Netzes dar, da mit geringem Aufwand viel Regelleistung bereitgestellt werden kann. Ähnliches gilt für Wärmepumpen (und somit Geothermie) wenn ein standardisiertes Signal zur Steuerung der Wärmepumpen zur Verfügung steht.

Wasserspeicher oder auch Puffer(-speicher) kosten, je nach Größe und Anzahl der Anschlüsse, zwischen 200 und 600 Euro pro WE.

2.3.5.7 Bewertung energetische Bilanzierung und Wirtschaftlichkeit (Einzelgebäude/Blöcke)

Für das Quartier wurden unterschiedliche EV dargestellt. Diese unterscheiden sich vor allem nach Umfang und Aufteilung der benötigten Investitionen, Grad der Autarkie und Umweltbewertung (CO₂). Da alle Konzepte EV0 bis EV5 prinzipiell umsetzbar sind, sollten diese im Einzelfall bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit geprüft

werden. Daneben sind weitere Faktoren zu prüfen, wie z. B. Investitionsbereitschaft oder Kooperationen, etwa mit der Stadt oder Kommune, EVU oder Bauträgern und Bestandshaltern oder Gewerbetreibenden von benachbarten Liegenschaften.

Wärmespeicher stellen eine einfache Möglichkeit dar, um Bedarfs- und Angebotsspitzen in Heizsystemen zu nivellieren. Je nach Ziel können bereits kleine Speicher die benötigte Leistung der Wärmeerzeuger verringern und somit Investitionskosten reduzieren. Zudem bieten sie die Möglichkeit, Einfluss auf vorgeschaltete Netze (Stromnetz) zu nehmen und diese zu stabilisieren.

Die Wirtschaftlichkeit hängt maßgeblich von der Höhe der Erstinvestitionen und der Lebensdauer der Bauteile ab. Die Verbrauchskosten, die von den Nutzern getragen werden, variieren je nach EV ebenfalls deutlich. Die Beibehaltung des Status quo (EV0) ist, sofern die gebäudeseitigen Voraussetzungen für die anderen EV gegeben sind, unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten weder für den Bestandhalter noch für die Nutzer vorteilhaft.

2.3.6 Zwischenfazit: Optimierung der Wärmeversorgung in Gebäuden und Quartieren

Während bei einzelnen Gebäuden die Anzahl der verfügbaren Heizsysteme, nicht zuletzt aufgrund der Investitionskosten, vergleichsweise gering ist, profitieren Gebäudegruppen von den unterschiedlichen verfügbaren Heizsystemen. Durch das Zusammenfassen mehrerer kleinerer Bedarfe zu einem kombinierten Bedarf lassen sich gleich mehrere Erneuerbare Energien einbinden. Die gleichzeitige Kombination mehrerer Energieträger ist allerdings mit größerer Anzahl an Einzelanlagen (mit dann jeweils relativ geringer Anzahl an Betriebsstunden) zunehmend unwirtschaftlich.

Im Gegenzug können durch eine sinnvolle Kombination von System deren Vor- und Nachteile gegenseitig ausgeglichen werden. Ein räumlicher Zusammenhang der Verbraucher ist vor allem aufgrund transportbedingter Energieverluste unabdingbar.

Können die Bedarfe nicht zusammengefasst werden, ist eine virtuelle Zusammenfassung möglich. Dies ist über die Vernetzung zwischen den (elektrischen) Wärmepumpen und dem Stromnetz möglich (insbesondere mit Wärmepumpe-Speicher-Systemen). Die koordinierte bzw. an die Angebots-Bedarfs-Situation im Stromnetz angepasste Fahrweise der Wärmepumpen bzw. Wärmepumpe-Speicher-Systeme erlauben eine gezielte Entlastung des elektrischen Netzes. Die Wärmepumpen stellen dann (negative) Regelleistung für das Netz bereit.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass Wärmepumpen aufgrund der (rechnerisch) kürzeren Lebensdauer von üblicherweise 15 Jahren gegenüber anderen EV benachteiligt sind. Faktisch könnte die Lebensdauer durchaus länger sein. Allerdings liegen hierüber – im Gegensatz zu anderen Systemen – noch keine empirischen Daten vor, da WPS in Deutschland erst vor ca. zehn Jahren im Markt eingeführt wurden (vgl. [Abb. 2.1](#)).