

BINE-Fachbuch

# Erdwärme für Bürogebäude nutzen

Die Autoren:

Franziska Bockelmann | Norbert M. Fisch

Herdis Kipry

LESEPROBE

Herausgeber

 **FIZ Karlsruhe**

Leibniz-Institut für  
Informationsinfrastruktur

**Fraunhofer IRB**  **Verlag**

 **BINE**  
Informationsdienst

Der BINE Informationsdienst bietet Kompetenz in neuen Energietechniken. Der intelligente Umgang mit knappen, wertvollen Energiere Ressourcen, insbesondere in Gebäuden und der Gebäudetechnik, sowie die Nutzung erneuerbarer Energien sind die BINE-Kernthemen. Zu diesen Inhalten vereinen wir vielfältiges Know-how aus Forschung, Technik und Anwendung. Eine Übersicht über unser komplettes Produkt- und Dienstleistungsangebot finden Sie unter [www.bine.info](http://www.bine.info). Gerne senden wir Ihnen die Informationen auch zu.

BINE ist ein Informationsdienst von FIZ Karlsruhe und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

Für weitere Fragen stehen Ihnen zur Verfügung:  
Dorothee Gintars (Redaktion)  
BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Büro Bonn  
Kaiserstr. 185 – 197, 53113 Bonn  
Tel. 02 28 / 923 79-0, E-Mail: [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de), [www.bine.info](http://www.bine.info)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.  
ISBN: 978-3-8167-8325-1

ISBN Printausgabe: 978-3-8167-8325-1 | ISBN E-Book: 978-3-8167-8364-0

Herstellung und Layout: Dietmar Zimmermann | Umschlaggestaltung: Martin Kjer  
Satz: Mediendesign Späth, Birenbach | Druck: DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg

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

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, -Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© by FIZ Karlsruhe

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

Hinweis zu den Abbildungen: Soweit nachfolgend keine anderen Quellen genannt werden, stammen die Abbildungen von den Autoren.

---

## Vorwort

Für neue Bürogebäude wird immer häufiger auf die Nutzung oberflächennaher Geothermie gesetzt. Das seit Anfang 2009 geltende Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG), das beim Neubau von Gebäuden die anteilige Verwendung erneuerbarer Energien zur Gebäudebeheizung, Kühlung und Wassererwärmung vorschreibt, hat ihre Anwendung weiter befördert. Während im Wohnungsbau die Nutzung oberflächennaher Geothermie zu Heizzwecken im Vordergrund steht, gewinnt bei Büro- und Verwaltungsgebäuden aufgrund steigender Komfortansprüche die Umsetzung zur Gebäudekühlung an Bedeutung.

Mit dem Ziel, die Performance erdgekoppelter Anlagen hinsichtlich Energieverbrauch, Nutzerkomfort und Betrieb zu überprüfen und zu verbessern, hat das Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS) der TU Braunschweig das Forschungsvorhaben »WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude« durchgeführt. In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projekt standen Gebäude mit Erdwärmesonden, Energiepfählen bzw. Bodenabsorbern zur saisonalen Speicherung für den Heiz- und Kühlbetrieb im Fokus. Ein ähnliches, ebenfalls vom BMWi gefördertes Projekt (TherMo) mit dem Schwerpunkt auf Grundwassersystemen läuft am Institut für Entwerfen und Konstruieren – Abteilung Gebäudetechnik – der Universität Hannover.

Dieses Fachbuch basiert auf den Forschungsergebnissen. Die realisierten Konzepte, erzielten Jahres-Systemarbeitszahlen, Energieerträge und Deckungsanteile sowie die Praxiserfahrungen werden vorgestellt und daraus Empfehlungen für Planung und Betrieb geschlossener Erdwärmesysteme abgeleitet. Die Dokumentation soll dazu beitragen, Planungs-, Umsetzungs- und Betriebsfehler in Folgeprojekten zu minimieren.

Außerdem informiert das Buch Planer und Bauherren über die wesentlichen Aspekte bei der Nutzung oberflächennaher Geothermie – von einem kurzen Systemüberblick über die Dokumentation allgemeiner Konzeptlösungen und wesentliche Planungsgrundlagen bis zu den Ansatzpunkten zur Umsetzung eines Energie- und Betriebsmonitorings.

FIZ Karlsruhe  
BINE Informationsdienst

LESEPROBE



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation</b>	11
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	13
2.1	Geschlossene Erdwärmesysteme	15
2.1.1	Erdwärmesonden	16
2.1.2	Energiepfähle	17
2.1.3	Fundament-/Bodenabsorber	18
2.1.4	Sonstige geschlossene Erdwärmesysteme	19
2.2	Offene Erdwärmesysteme	19
2.3	Wärmepumpe/Kältemaschine	20
2.4	Freier Kühlbetrieb	23
2.5	Geeignete Wärmeübergabesysteme im Gebäude	23
2.5.1	Thermisch aktivierte Bauteile	24
2.5.2	Kapillarrohrmatten	25
2.5.3	Heiz- und Kühlsegel	26
2.5.4	Raumluftechnische Anlagen	26
<b>3</b>	<b>Planung</b>	27
3.1	Normen und Richtlinien	27
3.2	Gesetzliche Grundlagen	28
3.2.1	Wasserhaushaltsgesetz und Wassergesetze der Länder	29
3.2.2	Bundesberggesetz	29
3.2.3	Lagerstättengesetz	30
3.3	Antrag, Genehmigung und Förderung	30
3.4	Bodengutachten	32
3.4.1	Temperaturverlauf im Erdreich – geothermischer Wärmestrom	35
3.4.2	Thermal Response Test	35
3.4.3	Temperaturtiefenprofil	37
3.5	Geometrie Erdwärmesysteme	37
3.6	Planungskennwerte	38
3.7	Planungswerkzeuge und Simulationsprogramme	39
3.8	Konzeptvarianten und Bausteine für die Erdwärmenutzung	41
3.8.1	Kombinationen von Systembausteinen mit Erdwärmenutzung	43
3.8.2	Umsetzungsbeispiel	46
3.9	Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitsberechnung	51
3.9.1	Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067	52
3.9.2	Beispielgebäude	53

<b>4</b>	<b>Energie- und Betriebsmonitoring</b> . . . . .	62
4.1	Ganzheitliche Systemerfassung/-aufnahme . . . . .	63
4.2	Umsetzung eines Energie- und Betriebsmonitorings mittels Gebäudeautomation . . . . .	64
4.3	Messkonzept . . . . .	69
4.3.1	Energiemonitoring . . . . .	69
4.3.2	Betriebsmonitoring . . . . .	74
4.4	Messdatenauswertung . . . . .	75
4.4.1	Bildung von Kenngrößen und -zahlen . . . . .	76
4.4.2	Detaillierte Betriebsanalyse und Optimierung . . . . .	79
4.4.3	Thermischer Komfort . . . . .	82
<b>5</b>	<b>Ergebnisse aus dem Betrieb realisierter Projekte</b> . . . . .	84
5.1	Heiz- und Kühlkonzepte realisierter Beispiele . . . . .	84
5.1.1	Erdwärmesonden – Rickmers Reederei, Hamburg . . . . .	87
5.1.2	Erdwärmesonden – Hauptverwaltung der Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen . . . . .	89
5.1.3	Energiepfähle – EnergieForum, Berlin . . . . .	90
5.1.4	Energiepfähle – VGH Regionaldirektion Lüneburg . . . . .	93
5.1.5	Bodenabsorber – VW-Bibliothek, Berlin . . . . .	94
5.1.6	Grundwasser: Schluck- und Entnahmebrunnen – Headquarters Agfa HealthCare, Bonn . . . . .	96
5.2	Gebäude- und Anlagenperformance im Vergleich . . . . .	99
5.2.1	Jahresenergieerträge und Anlageneffizienz . . . . .	100
5.2.2	Energiekosteneinsparungen und CO <sub>2</sub> -Reduktionen . . . . .	104
5.2.3	Thermischer Komfort . . . . .	109
5.2.4	End- und Primärenergieverbrauch der Gebäude . . . . .	113
<b>6</b>	<b>Betriebserfahrungen und Empfehlungen</b> . . . . .	117
6.1	Dimensionierung von Erdwärmesystemen . . . . .	118
6.2	Allgemeine Betriebserfahrungen und -empfehlungen . . . . .	119
6.2.1	Erdwärmesysteme . . . . .	119
6.2.2	Energieerzeugung . . . . .	120
6.2.3	Übergabesysteme . . . . .	123
6.3	Regelungs- und steuertechnische Einbindung in das Gesamtkonzept . . . . .	125
6.3.1	Primärkreis – Erdwärmesystem . . . . .	125
6.3.2	Sekundärkreis – Betonkernaktivierung . . . . .	126
6.3.3	Regelungstechnische Abstimmung kombinierter Systeme . . . . .	133
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	134

---

<b>8</b>	<b>Anhang</b> .....	136
<b>9</b>	<b>Zitierte und sonstige verwendete Literatur, Abbildungs- verzeichnis</b> .....	143
9.1	Zitierte Literatur .....	143
9.2	Sonstige, verwendete Literatur .....	145
9.3	Abbildungsverzeichnis .....	146
<b>10</b>	<b>Laufende und abgeschlossene Forschungsvorhaben aus der Energieforschung der Bundesregierung</b> .....	147
10.1	Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben .....	147
10.2	Forschungsberichte .....	147
<b>11</b>	<b>Weiterführende Literatur</b> .....	148
11.1	Literatur .....	148
11.2	BINE Informationsdienst .....	151
<b>12</b>	<b>Autoren</b> .....	152

LESEPROBE





---

# 1 Motivation

Über die Energieeffizienz eines Gebäudes bestimmen neben der Gebäudehülle maßgeblich die Art der Energieversorgung und die eingesetzte Anlagentechnik. Oberflächennahe Geothermie kann als regenerative Energiequelle in Zukunft eine wesentliche Rolle beim umweltfreundlichen Heizen und Kühlen moderner Gebäude einnehmen. Sie lässt sich sehr effizient mit Heiz- und Kühlsystemen kombinieren, die nahe dem Temperaturniveau des Erdreichs arbeiten. Dadurch, dass sich die gleiche Technik sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen nutzen lässt, bietet sie sich für die Temperierung von Büro- und Verwaltungsgebäuden besonders an.

Um die Energieeffizienz der Systeme, den thermischen Komfort im Gebäude sowie die dauerhafte Funktionalität zu gewährleisten, gilt es allerdings besonders bei komplexen Systemen und deren kombiniertem Einsatz zum Heizen und Kühlen, einiges zu beachten. Denn die Anlagen zur Nutzung der Erdwärme unterscheiden sich sowohl bei der Planung als auch beim Betrieb von konventioneller Wärme- und Kältetechnik. Vielen Planern, Ausführenden und Betreibern fehlt noch die Erfahrung im Umgang mit dieser verhältnismäßig neuen Technologie. Das kann bei der Planung und Umsetzung zu Problemen und in der Folge zu ineffizienten Betriebsweisen führen.

Aufgrund der geringen Temperaturspreizungen zwischen dem Erdreich und dem Heiz- bzw. Kühlsystem im Gebäude reagieren die Anlagen sehr sensibel auf Fehler und Störungen. Darüber hinaus werden Ausführungs- und Betriebsfehler infolge der Trägheit der Systeme sowie der Redundanz mit weiteren Heiz- und Kühlsystemen meist erst spät erkannt. Ein fehlerhafter Betrieb mindert also nicht nur die aktuelle Effizienz des Systems, sondern kann auch die Leistungsfähigkeit für die Folgejahre beeinträchtigen.

Für einen erfolgreichen und dauerhaften Betrieb der Geothermieanlage muss bei Planung, Ausführung und Betrieb daher ein hoher qualitativer Standard eingehalten werden.

So sollte im Vorfeld der Anlagenplanung eine umfassende Erkundung des Erdreichs erfolgen. Je besser die Bodeneigenschaften und Grundwasserverhältnisse im Vorfeld definiert sind, umso genauer können die Erdwärmesysteme ausgelegt und dimensioniert werden. Dies ist besonders wichtig bei größeren geothermischen Anlagen (> 30 kW) und bei Anlagen, die sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen genutzt werden: Mit der Anlagengröße nehmen die Auswirkungen eines nicht korrekt an hydrogeologische Randbedingungen – wie beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds – angepassten Systems zu. Darüber hinaus kann nur mit genauen Kenntnissen der Untergrundverhältnisse sichergestellt werden, dass die erforderlichen Randbedingungen bei Erdwärmespeichern für den saisonalen Wechsel von Heizen und Kühlen immer wieder erreicht werden.

Generell gilt es die geothermischen Anlagen in ein Gesamtsystem zu integrieren, bei dem Gebäude, die Anlagen zur thermischen Gebäudekonditionierung sowie die Gebäudenutzung optimal aufeinander abgestimmt sind. Dies gilt über die Gebäude- und Anlagenauslegung hinaus auch für den Betrieb und somit den Abgleich aller Regelstrategien. Die Anfälligkeit für Störungen und Fehler der geothermischen Anlagen ist umso geringer, je einfacher das Gesamtsystem gestaltet ist. Eine Abbildung des Gesamtsystems im Rahmen einer thermischen Gebäude- und Anlagensimulation liefert weitere Planungssicherheit. So lassen sich Randbedingungen wie externe und interne Lasten des Gebäudes sowie Leistungsgrenzen der geothermischen Anlage im Vorfeld abschätzen und erste Betriebsstrategien entwickeln.

Neben einer entsprechenden Planung und fehlerfreien Ausführung bestimmt der Gebäude- und Anlagenbetrieb über Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Systeme. Um eine dauerhafte und energieeffiziente Funktion zu gewährleisten, entscheidet eine optimale Abstimmung des Gebäudeenergiebedarfs auf das thermische Angebot im Erdreich darüber, welche thermischen Leistungen sich erzielen lassen. Der Gebäude- und Anlagenbetrieb muss im Unterschied zu konventionellen Heiz- und Kühlsystemen kontinuierlich den schwankenden Randbedingungen, wie Wetter und Gebäudenutzung, angepasst werden. Ein wesentliches Instrument dafür ist die messtechnische Begleitung der Anlagen insbesondere in der ersten Betriebsphase.

LESEPROBE

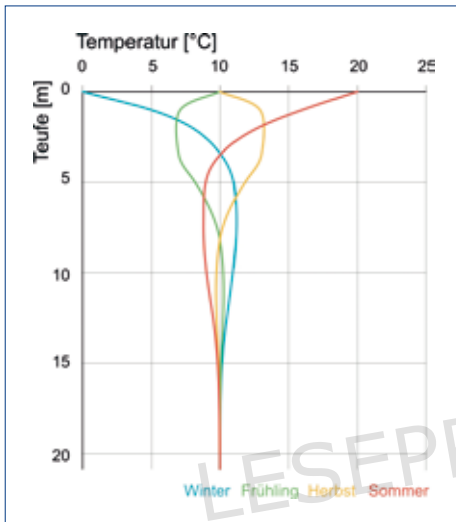
## 2 Grundlagen

Bei der thermischen Nutzung des Untergrunds zum Heizen und Kühlen wird im saisonalen Wechsel Wärme aus dem Untergrund entzogen bzw. in den Untergrund eingetragen. Aktiviert werden hierbei oberflächennahe Erdschichten bis zu einer Tiefe von maximal 400 m – oberflächennahe Geothermie. Das nutzbare Energieangebot und die thermische Regenerationsfähigkeit des erschlossenen Erdreichs werden wesentlich von dessen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität sowie vom Wassergehalt und von der Grundwasserströmung beeinflusst.

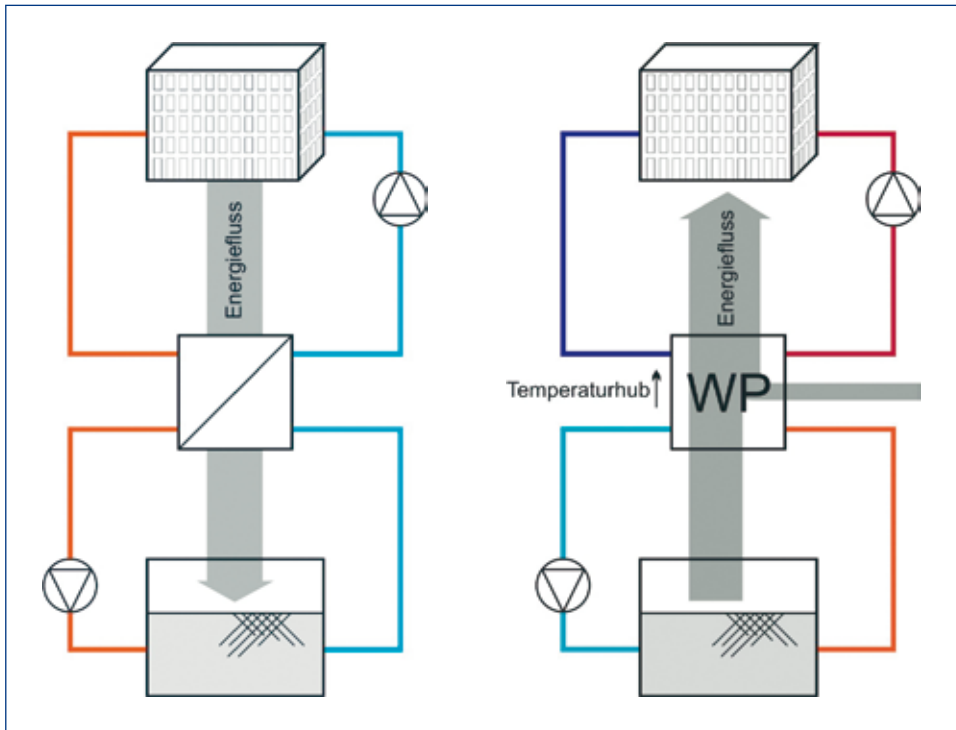
Von Vorteil bei der Nutzung der oberflächennahen Geothermie zum Heizen und Kühlen von Gebäuden ist das im Vergleich zur Außenluft relativ konstante Temperaturniveau des Erdreichs während des ganzen Jahres. In 5 bis 10 m Tiefe entspricht die ungestörte Erdreichtemperatur mit 8 bis 12 °C etwa der Jahresmitteltemperatur des Standorts (Abb. 1).

Das Temperaturniveau des Erdreichs reicht zur Gebäudekühlung im Sommer in der Regel aus. Das im Erdreich abgekühlte Wärmeträgermedium kann im reinen Umwälzbetrieb direkt zur Gebäudekühlung genutzt werden (Abb. 2 links). Man spricht bei dieser effizienten Betriebsweise, bei der mechanische Energie allein für die Umwälzpumpen aufgewendet werden muss, von einem freien Kühlbetrieb. Auch bei hohen Außentemperaturen kann der Wärmeeintrag noch ohne den Einsatz von Kältemaschinen erfolgen.

Zum Heizen ist das Temperaturniveau des Erdreichs allein zu niedrig. Die dem Erdreich entzogene Wärme muss daher mittels einer Wärmepumpe auf das erforderliche Temperaturniveau angehoben werden (Abb. 2 rechts; Funktionsprinzip s. Kap. 2.3).



■ **Abb. 1:**  
Qualitativer Verlauf der ungestörten Erdreichtemperatur in Deutschland



■ **Abb. 2:** Sommer: Wärmeeintrag in den Untergrund zur Gebäudekühlung im freien Kühlbetrieb (links) bzw. Winter: Wärmeentzug aus dem Untergrund zur Gebäudeheizung im Wärmepumpenbetrieb (rechts)

### Systemvarianten

Abhängig von baulichen und hydrogeologischen Randbedingungen sowie der geplanten Betriebsweise werden Wärmeentzug und -eintrag im Untergrund mit offenen Erdwärmesystemen wie Grundwasserbrunnen oder geschlossenen Systemen wie Erdwärmesonden, Energiepfählen oder horizontalen Absorbern realisiert (s. Kap. 2.1 und 2.2).

Die nutzbare Temperaturspanne und die mögliche Temperaturpreizung auf der Quellenseite sind im Vergleich zur konventionellen Wärme- und Kälteerzeugung relativ gering. Die genannten Erdwärmesysteme kommen daher im Wesentlichen zur Grundlastdeckung in Kombination mit Heiz- bzw. Kühlsystemen zum Einsatz, die nahe dem Temperaturniveau des Erdreichs arbeiten (s. Kap. 2.5). Die Vorlauftemperaturen liegen dann im Heizbetrieb zwischen 25 und 30 °C und im Kühlbetrieb zwischen 17 und 20 °C. Zur Abdeckung von Spitzenlasten werden sie meist mit weiteren, unabhängigen Heiz- und Kühlsystemen kombiniert.

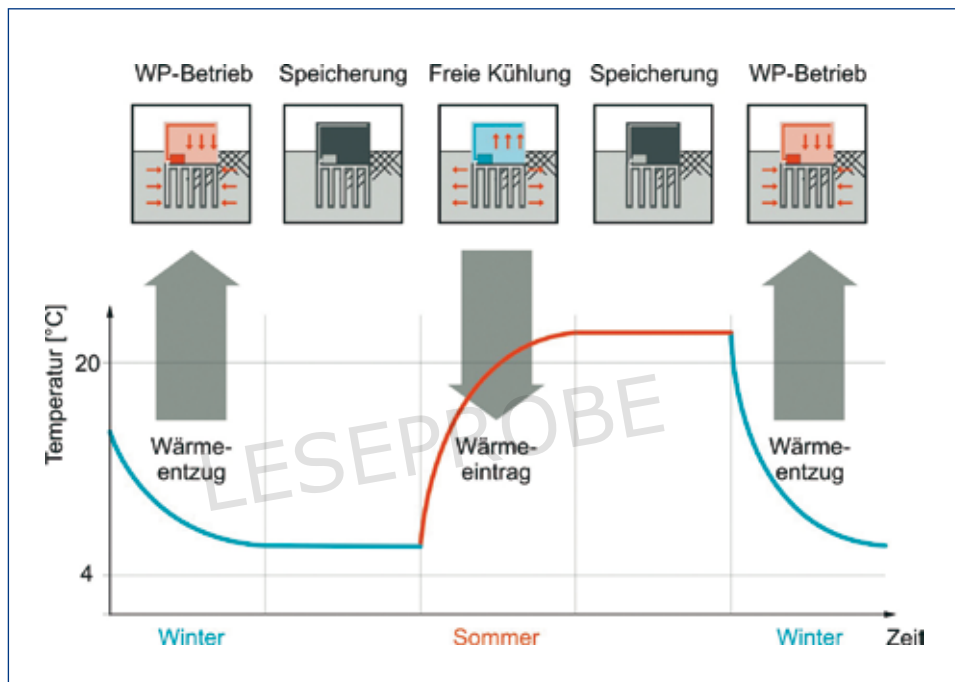
Generell besteht auch die Möglichkeit, Kältemaschinen in das Erdwärmesystem zu integrieren. So kann das Erdreich auch dann noch zur Gebäudekühlung genutzt werden, wenn das natürliche Kältepotenzial zum Ende der Kühltisaison bereits erschöpft sein sollte bzw. der Kältebedarf deutlich größer als das Potenzial der freien Kühlung ist, zum Beispiel bei Integration einer Serverkühlung als Grundlast. Darüber hinaus könnten in begrenztem Maße auch Kühlsysteme mit Systemtemperaturen unterhalb des Temperaturniveaus des Erdreichs mit Erdkälte versorgt werden. Eine mögliche Anwendung wäre beispielsweise die Zuluftkühlung.

Die Kombination von Erdwärmesystemen vor allem mit Heiz- und Kühlsystemen deutlich höherer oder niedrigerer Systemtemperaturen erfordert eine entsprechend sorgfältige Abstimmung der Komponenten untereinander. Dies gilt besonders für Erdwärmespeicher, deren Funktion bei Überwärmung oder Unterkühlung schnell und aufgrund der thermischen Trägheit des Erdreichs möglicherweise auch langfristig gefährdet ist. Um eine dauerhafte Funktionalität sicherzustellen, sind daher unbedingt einige Aspekte hinsichtlich Ausführung und Betrieb zu beachten (s. Kap. 6).

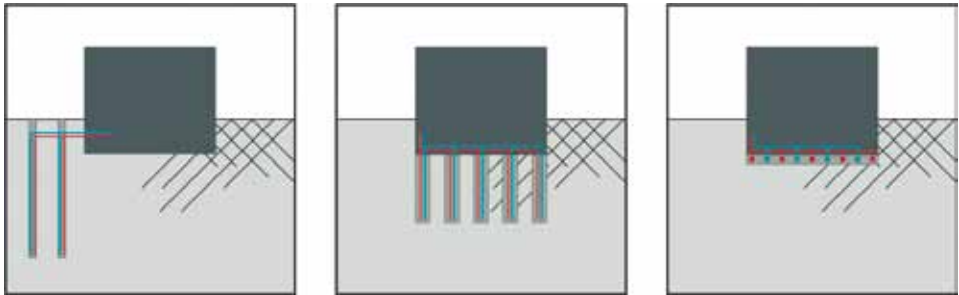
Die richtige hydraulische und regelungstechnische Einbindung der Quelle in das Gesamtsystem gewährleistet die Sicherheit der Technik im Betrieb. Störungen können durch die messtechnische Begleitung des Systems im Betrieb erkannt und analysiert werden.

## 2.1 Geschlossene Erdwärmesysteme

Bei geschlossenen Systemen werden Rohrleitungen im Erdreich verlegt, in denen in einem geschlossenen Kreislauf ein Wärmeträgermedium zirkuliert. Die geschlossenen Systeme sind im Gegensatz zu offenen Systemen nicht zwingend von wasserführenden Schichten abhängig und somit in der Standortwahl flexibler. Das Erdreich fungiert als saisonaler Speicher, der aktiv be- und entladen werden muss. In den so genannten »Erdwärmespeichersystemen« muss die dem Erdreich im Winter zur Gebäudebeheizung entzogene Wärme im Sommer wieder eingespeist bzw. das im Sommer infolge des Wärmeeintrags erwärmte Erdreich über den Winter wieder abgekühlt werden (Abb. 3). Geeignet sind diese Systeme beispielsweise für Büro- und Verwaltungsgebäude, die einen saisonal wechselnden Heiz- und Kühlbedarf aufweisen.



■ **Abb. 3:** Idealisertes Schema der saisonalen Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund am Beispiel einer Energiepfahlanlage



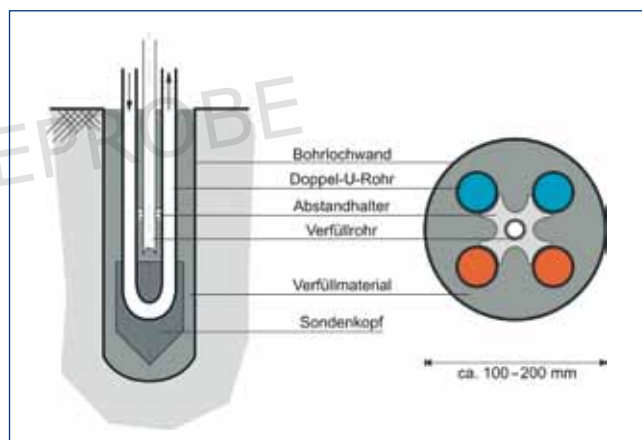
■ **Abb. 4:** Erdwärmesondenanlage (links), Energiepfahlanlage (Mitte), Fundament- bzw. Bodenabsorber (rechts)

Unter besonderen Voraussetzungen können die geschlossenen Erdwärmesysteme auch als Energiequelle für nur eine Betriebsweise – Heiz- oder Kühlbetrieb – und nicht als Speicher genutzt werden. Durch Anordnung der Systeme in wasserführenden Schichten mit entsprechendem Grundwasserfluss lässt sich beispielsweise die natürliche thermische Regeneration bis zur nächsten Heiz- bzw. Kühlsaison sicherstellen. Auf solche reinen Heiz- oder Kühlsysteme wird nachfolgend im Detail nicht weiter eingegangen. Das Augenmerk liegt auf geschlossenen Systemen, die als Erdwärmespeicher ausgelegt sind.

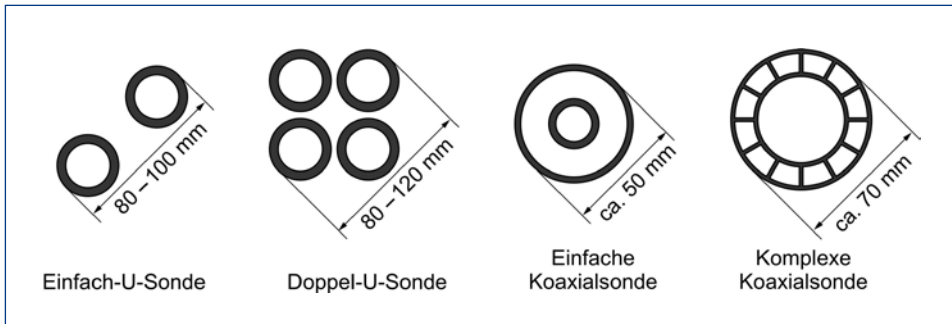
Häufig realisierte Systeme sind Erdwärmesonden, Energiepfähle und Fundament- bzw. Bodenabsorber (Abb. 4). Letztere nutzen Synergieeffekte mit Pfahlgründungen oder Fundament- bzw. Bodenplatten, was im Vergleich zu Erdwärmesonden die Kosten und den Arbeitsaufwand minimiert. Die Größe des Erdspeichers wird dann in den meisten Fällen über die Gründung des Gebäudes bestimmt. In einzelnen Fällen wird die wärmeübertragende Fläche des Systems über das Setzen weiterer Sonden ergänzt und das Potenzial des Erdreichs außerhalb des Gründungsbereichs genutzt.

## 2.1.1 Erdwärmesonden

Erdwärmesonden werden einzeln oder als Feld mittels Bohren, Spülen oder Rammen im unmittelbaren Umfeld oder unterhalb eines Gebäudes in den Untergrund eingebracht. Die vertikalen oder schrägen Bohrungen, in die die Sondenrohre eingelassen werden, haben in der



■ **Abb. 5:** Sondenlängs- und -querschnitt im eingebauten Zustand mit Verfüllung



■ **Abb. 6:** Typische Bauformen von Sondenrohren für Erdwärmesonden

Regel einen Durchmesser zwischen 100 und 200 mm. Zur thermischen Anbindung der Sondenrohre an das Erdreich werden die Bohrlöcher meist mit einer Bentonit-Zementsuspension verfüllt (Abb. 5).

Als Sondenrohre dienen zumeist Kunststoffrohre (Abb. 6). Die einfachste Bauform ist die Einfach-U-Sonde. In einem Schenkel des U-Rohres strömt das Wärmeträgermedium nach unten, im anderen Schenkel wieder nach oben. Zur Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche werden meist Doppel-U-Sonden verwendet. Eine weitere, jedoch seltener eingesetzte Bauform sind Rohr-in-Rohr-Systeme, so genannte Koaxialsonden. Nachteil der koaxialen Bauform ist die starke Kopplung zwischen Vor- und Rücklauf. So wird der Rücklauf durch den Vorlauf je nach Betriebsart wieder erwärmt oder abgekühlt. Die Temperaturspreizung ist bei den Koaxialrohren somit kleiner als bei den U-Rohren. Neuere Bauformen sind Koaxialsonden mit gewelltem Außenrohr. Schon bei geringen Durchflussgeschwindigkeiten wird aufgrund des Wellrohrs eine turbulente Strömung erreicht, was den Wärmeübergang vom Erdreich zum Wärmeträgerfluid verbessert.

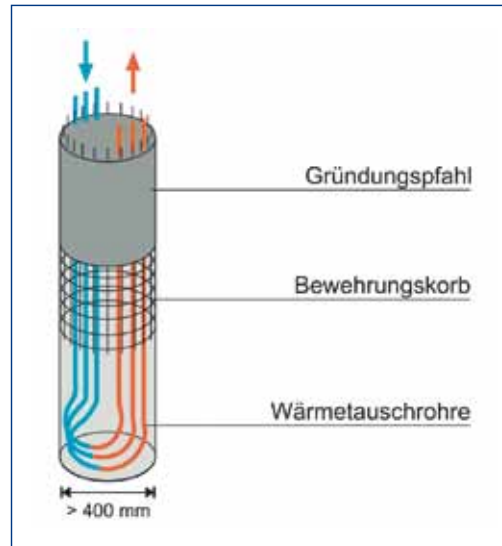
Da Sondenkopf und Verteil- sowie Sammelleitungen relativ nahe unter der Geländeoberfläche liegen, werden Erdwärmesonden in der Regel mit einem Wasser-Frostschutz-Gemisch, einer so genannten Sole, als Wärmeträgerfluid betrieben.

Bohrungen von Erdwärmesonden sind in der Tiefe praktisch keine Grenzen gesetzt. Als wirtschaftlich sinnvoll hat sich eine Abteufung zwischen 50 und 150 m erwiesen. In Deutschland werden Erdwärmesonden meist nur bis zu einer Tiefe von 100 m ausgeführt. Für Bohrungen tiefer als 100 m ist laut Bundesberggesetz (BBergG) eine bergbaurechtliche Genehmigung sowie die Ausführung der Bohrungen durch eine für diese Tiefen durch Sachkundigenachweis und Prüfzeugnis der Bohranlage qualifizierte Bohrfirma erforderlich.

### 2.1.2 Energiepfähle

Energiepfähle sind aus statischer Sicht erforderliche Gründungspfähle, die zusätzlich als Wärmeübertrager im Untergrund genutzt werden. Die wärmeübertragende Fläche der Energiepfähle ist also durch gründungsstatische Gesichtspunkte wie Abmessungen und Anzahl der Pfähle begrenzt. Im Vergleich zu einer Erdwärmesonde ist der Pfahldurchmesser deutlich größer.

Um die Gründungspfähle thermisch zu aktivieren, werden Sondenrohre zur Führung des Wärmeträgermediums in den Pfahlkörper integriert (Abb. 7). Bis auf das Einlegen der Sondenrohre



■ **Abb. 7:**  
Prinzipische Skizze Energiepfahl mit U-förmigen  
Leitungsschleifen

weicht die Herstellung nicht weiter von normalen Gründungspfählen ab. Die Sondenrohre werden meist auf der Innenseite des Pfahlbewehrungskorbs in mehreren, U-, mäander- oder spiralförmigen Wicklungen montiert. Dies geschieht bei Ortbetonpfählen vor Ort auf der Baustelle und bei Fertigrammpfählen werkseitig. Für eine geschlossene Wärmeübertragung zwischen Erdreich und Sondenrohr sorgt der Beton der Gründungspfähle.

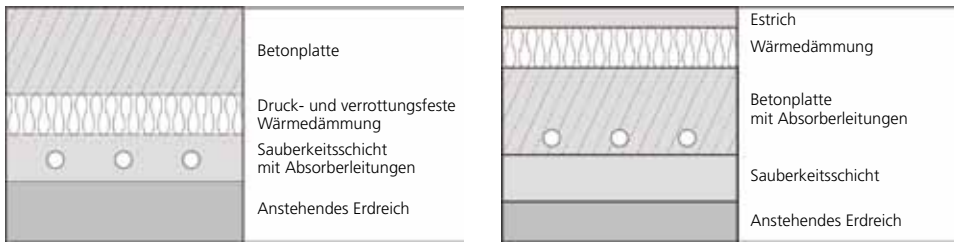
Da keine zusätzlichen Bohr-, Verpress- und Verlegearbeiten anfallen, sind im Vergleich zu Erdwärmesonden Arbeitsaufwand und Kosten geringer. Gegenüber reinen Gründungspfählen liegen die Mehrkosten für die energetische Aktivierung der Pfähle bei etwa 10 bis 15 %. Die wirtschaftliche Mindestlänge von Energiepfählen wird mit 6 m angegeben [1].

Energiepfähle müssen nicht zwingend mit einer Sole als Wärmeträgerfluid betrieben werden, häufig reicht auch reines Wasser aus. Frostgefahr aufgrund der Witterung besteht in der Regel nicht: Das Temperaturniveau unter dem Gebäude ist im Winter durch die Entkopplung von der Außenluft und der Transmissionswärmeverluste des Gebäudes tendenziell höher als das des umgebenden Erdreichs. Man spricht von einer so genannten Wärmeblase. Darüber hinaus liegen die Pfahlköpfe zumeist tiefer im Erdreich als beispielsweise Sondenköpfe. Sicherzustellen ist beim Betrieb der Anlage mit Wasser als Wärmeträger, dass auch die Verteil- und Sammelleitungen in Bereichen angeordnet werden, die nicht frostgefährdet sind. Um auch ein Einfrieren des Wärmeträgers und des Pfahlkörpers sowie des angrenzenden Erdreichs aus dem Betrieb heraus zu vermeiden, wird dieser häufig auf eine minimale Temperatur des Wärmeträgermediums von etwa 4 °C begrenzt.

### 2.1.3 Fundament-/Bodenabsorber

Fundament- und Bodenplatten können thermisch aktiviert werden. Dazu werden in oder unterhalb der Platte horizontale Rohre und Rohrregister verlegt (Abb. 8). Die Montage in der Bodenplatte hat den Vorteil, dass sie statisch unproblematisch ist und dass der Beton zudem einen gleich bleibenden Kontakt zur äußeren Rohrwand sichert. Zur thermischen Entkopplung vom Gebäude ist generell oberhalb des Absorbers eine entsprechende Dämmung anzuordnen.





■ **Abb. 8:** Fundament- bzw. Bodenabsorber mit Leitungsanordnung unter der Bodenplatte (links) bzw. in der Bodenplatte (rechts)

Ein Boden mit hoher Wärmeleitfähigkeit, am besten gesättigtes Erdreich mit einem hohen Grundwasserstand (max. 2 m entfernt von der Bodenplatte) ist Voraussetzung für gute Leistungen. In innerstädtischen Bereichen können im Sommer Erdreich- und Grundwassertemperaturen von 16 bis 18 °C bis in Tiefen von 20 m auftreten. Ein nachhaltiger Betrieb des Bodenabsorbers zu Kühlzwecken im Sommer ist unter solchen Bedingungen nicht möglich.

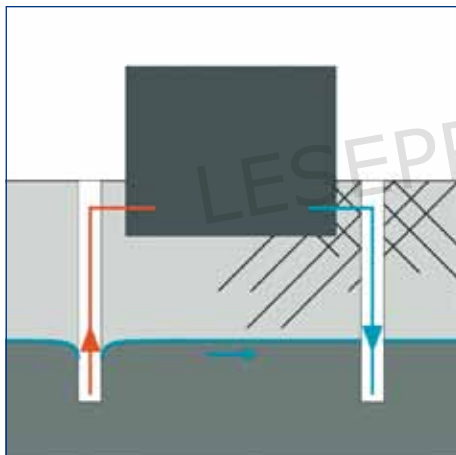
Ähnlich wie bei Energiepfählen kann unter bestimmten Voraussetzungen auch bei Fundament- und Bodenabsorbern Wasser ohne Zusatz eines Frostschutzmittels als Wärmeträger dienen.

### 2.1.4 Sonstige geschlossene Erdwärmesysteme

Weitere auf dem Markt angebotene Systeme und eher im Bereich von Ein- bis Zweifamilienhäusern umgesetzte Formen der thermischen Aktivierung des Erdreichs sind beispielsweise Erdkollektoren und Erdwärmekörbe. Darüber hinaus ist es auch denkbar, andere im Erdreich liegende Bauteile thermisch zu aktivieren, wie zum Beispiel Spundwände. Über eine mögliche thermische Nutzung ist auch hier bereits in einer frühen Phase der Planung zu entscheiden.

## 2.2 Offene Erdwärmesysteme

Offene Erdwärmesysteme nutzen als Wärmeträgermedium Grundwasser, das über Entnahmebrunnen gefördert, thermisch genutzt und über Schluckbrunnen dem Erdreich wieder zugeführt wird (Abb. 9). Im freien Kühlbetrieb wird das Grundwasser über einen Wärmetauscher



■ **Abb. 9:** Grundwasserentnahme- und Schluckbrunnen

geleitet. Im Heizbetrieb wird der Verdampfer der Wärmepumpe über einen zwischengeschalteten Brunnenwärmetauscher versorgt, um Kältemittel im Grundwasser zu vermeiden. Der Grundwasserfluss leitet im Kühlbetrieb die eingetragene Wärme in die Umgebung ab. Beim Wärmeentzug im Heizbetrieb strömt Wärme aus der Umgebung nach. Offene Systeme können daher in der Regel sowohl für den reinen Heiz- bzw. Kühlbetrieb als auch im saisonal wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb genutzt werden. Um einen »thermischen Kurzschluss« zwischen Entnahme- und Schluckbrunnen im Brunnensystem zu vermeiden, müssen die Schluckbrunnen mit entsprechendem Abstand im Grundwasserabstrombereich der Entnahmebrunnen angeordnet werden. Die thermische Leistung offener Systeme hängt im Wesentlichen vom realisierbaren Förderstrom ab.

Ist die Grundwasserfließgeschwindigkeit am Standort gering, kann auch bei offenen Systemen ein gewisser Speichereffekt genutzt werden. Dazu wird die Pumprichtung im saisonalen Wechsel umgedreht. Die im Winter zur Entnahme eingesetzten Brunnen dienen dann im Sommer als Schluckbrunnen – und umgekehrt.

Ein noch weitestgehend zu erforschender Speichereffekt besteht in der verzögerten Verteilung der Wärmefront bei geringen Fließgeschwindigkeiten. Bei gleichbleibender Pumprichtung kann durch die Ausbreitung der Wärmefront die im Sommer eingetragene Wärme im Winter zum Heizen genutzt werden. Im Sommerfall wird dann entsprechend die Wärmesenke verwendet.

Ein wichtiger Aspekt für den Betrieb von Erdwärmesystemen mit Grundwasserentnahme- und Schluckbrunnen ist die Grundwasserqualität. Werden die Vorgaben für die Wasserqualität nicht eingehalten, kann es insbesondere bei einem hohen Eisengehalt des Grundwassers zu Verockerung der Brunnen oder im Fall saurer Bestandteile zu Korrosion der technischen Anlagen kommen.

Ein wesentlicher Vorteil gegenüber geschlossenen Systemen liegt in der vergleichsweise einfachen und bei größeren Anlagen gegenüber Erdsondenfeldern kostengünstigen Umsetzbarkeit. Das Grundwasser wird direkt als Wärmeträger genutzt. Leistungsminderungen durch Wärmeverluste wie beim Wärmeübergang zwischen Untergrund und Wärmeträgermedium im geschlossenen System sind deutlich reduziert. Dem gegenüber steht allerdings ein höherer Pumpenstromverbrauch für Entnahme- und Schluckbrunnen im Vergleich zu den Umwälzpumpen in geschlossenen Systemen.

Generell bedarf der Betrieb von Grundwassersystemen der speziellen Genehmigung, die hinsichtlich der Stabilität des Wasserhaushalts immer seltener vergeben wird. In der Praxis werden deshalb offene Systeme trotz der genannten Vorteile nicht so häufig realisiert wie geschlossene.

## 2.3 Wärmepumpe/Kältemaschine

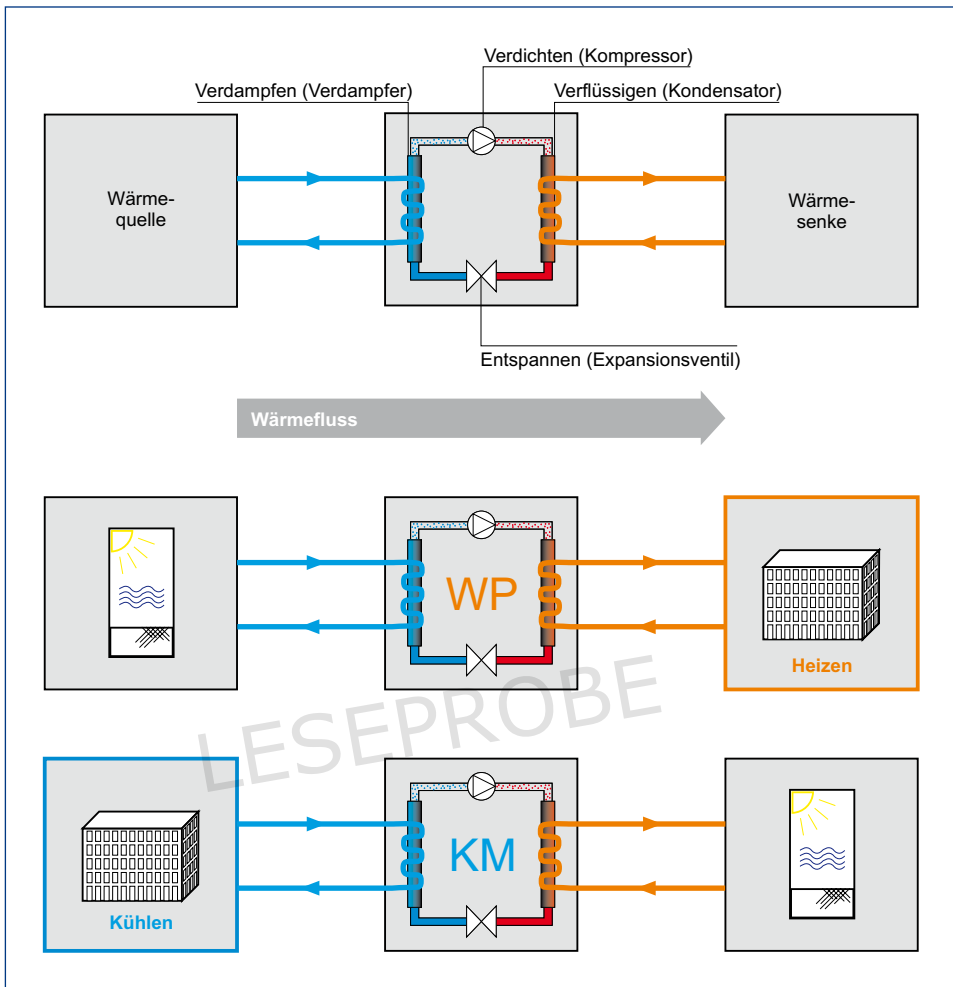
Erdwärmesysteme zum Heizen und Kühlen von Büro- und Verwaltungsgebäuden werden mit Wärmepumpen und zum Teil mit Kältemaschinen kombiniert. Wärmepumpe und Kältemaschine funktionieren nach demselben Prinzip.

### Funktionsprinzip

Handelt es sich um mechanische, also elektrisch angetriebene Maschinen, so bestehen sie vereinfacht aus einem Kältemittelkreislauf mit einem Verdampfer, einem Kondensator, einem Kompressor und einem Expansionsventil. Das flüssige Kältemittel im Verdampfer nimmt Um-

gebungswärme auf, zum Beispiel aus Luft, Wasser oder Erdrreich, und verdampft auf niedrigem Druckniveau. Eine Komprimierung und damit auch Anhebung des Temperaturniveaus des nun gasförmigen Kältemittels erfolgt unter Einsatz elektrischer Energie im Kompressor. Im Kondensator wird das Kältemittel anschließend durch Wärmeabgabe an die kühlere Umgebung, der so genannten Wärmesenke, wieder verflüssigt. Das dem Kondensator nachgeschaltete Expansionsventil reduziert das Druckniveau des Arbeitsmittels. Hierdurch ergibt sich gleichzeitig eine fühlbare Abkühlung des Kältemittels, sodass später im Verdampfer wieder Umgebungswärme aufgenommen werden kann. Abhängig davon, ob die kondensatorseitig abgegebene Wärme zu Heizzwecken oder der verdampferseitige Wärmeentzug zu Kühlzwecken genutzt wird, spricht man von einer Wärmepumpe oder einer Kältemaschine (Abb. 10).

Bezogen auf das Heizen und Kühlen von Gebäuden mit Hilfe von Erdwärmesystemen bedeutet dies: Wird dem Erdrreich durch den Verdampfer Wärme entzogen und diese dem Gebäude vom Kondensator zu Heizzwecken zur Verfügung gestellt, arbeitet die Maschine als Wärmepumpe. Um einen Kältemaschinenbetrieb handelt es sich hingegen, wenn zu Kühlzwecken



■ **Abb. 10:** Funktionsprinzip Wärmepumpe (WP)/Kältemaschine (KM)

der Verdampfer Wärme aus dem Gebäude aufnimmt, die vom Kondensator in das Erdreich eingetragen wird.

Wärmepumpen arbeiten am effizientesten, je kleiner der Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Heizsystem ist. Eine Wärmepumpe, die das Erdreich als Wärmequelle nutzt, ist zu Heizzwecken von Gebäuden daher deutlich effizienter als eine Außenluftwärmepumpe, deren Wärmequelle zum Zeitpunkt des größten Wärmebedarfs das geringste Temperaturniveau aufweist.

### Systemeffizienz

Das Verhältnis von zur Nutzung bereitgestellter Wärme bzw. Kälte zur aufgewendeten elektrischen Antriebsenergie beschreibt die Effizienz der Wärmepumpe bzw. der Kältemaschine. Hersteller geben als Kenngröße die Leistungszahl (COP – Coefficient of Performance) als Verhältnis von abgegebener Heiz- bzw. Kälteleistung zur elektrischen Leistungsaufnahme des Verdichters für einen definierten Betriebspunkt an. Die tatsächliche Effizienz der Maschinen ist allerdings nicht nur vom Gerät an sich, sondern unter anderem auch von der Einbausituation und der Betriebsweise abhängig. Um die Effizienz von Wärmepumpen und Kältemaschinen im realen Betrieb bestimmen zu können, wird die Jahres-Arbeitszahl (SPF – Seasonal Performance Factor) herangezogen. Die Jahres-Arbeitszahl ist definiert als das Verhältnis der in der Jahressumme bereitgestellten thermischen Energie zur elektrisch aufgewendeten Energie. Sie berücksichtigt, dass die Wärmepumpe oder Kältemaschine nicht immer bei voller Leistung und auch nicht immer im optimalen Betriebspunkt läuft, und spiegelt somit die Leistungsfähigkeit im realen Betrieb wieder.

Soll bei Erdwärmesystemen nicht nur die Effizienz der Wärmepumpe oder Kältemaschine bestimmt werden, sondern die des gesamten Erdwärmereizers, so ist auch der elektrische Energieaufwand für die Umwälzpumpe des Erdwärmekreislaufes bzw. bei offenen Systemen der elektrische Energieaufwand für die Brunnenpumpe zu berücksichtigen. In den nachfolgenden Abschnitten wird unter Berücksichtigung der Pumpen aufseiten des Erdwärmereizers von der Jahres-Systemarbeitszahl gesprochen. Nicht berücksichtigt sind in dieser Jahres-Systemarbeitszahl Energieaufwand und thermische Verluste beispielsweise des Verteil- und Übergabesystems aufseiten des Gebäudes.

### Wärmepumpen in der Anwendung

Die Wärmepumpe kann bei geringer Heizlast auf eine Deckung des Gesamt-Wärmebedarfs ausgelegt werden. Um einen häufigen und nicht sehr effizienten Teillastbetrieb zu vermeiden, sollte bei größeren Objekten die Auslegung der Wärmepumpe auf die Grundlast (etwa 40 bis 60 % der Last) beschränkt werden. Die Spitzenlast decken dann in der Regel klassische Wärmeerzeuger wie Heizkessel oder Fernwärme.

Ist im Betrieb der aktuelle Wärmebedarf deutlich kleiner als die vorhandene Heizleistung, werden die geforderten Systemtemperaturen sehr schnell erreicht und die Wärmepumpe geht in engen zeitlichen Abständen immer nur kurzzeitig in Betrieb. Dieses so genannte Takten der Wärmepumpe kann durch Aufteilung auf mehrere Leistungseinheiten in einer Kaskadenschaltung oder über die Integration eines Pufferspeichers reduziert werden.

Während die Temperaturen des Verdampfers von der Quellentemperatur abhängen, sollte die Auslegung der Wärmepumpe auf niedrigem Heiztemperaturniveau erfolgen. 25 bis 40 °C Vorlauftemperatur liefern ideale Einsatzbedingungen, Vorlauftemperaturen über 40 °C sollten vermieden werden, da hierdurch nur reduzierte Arbeitszahlen zu erreichen sind.