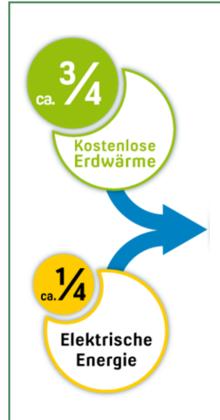
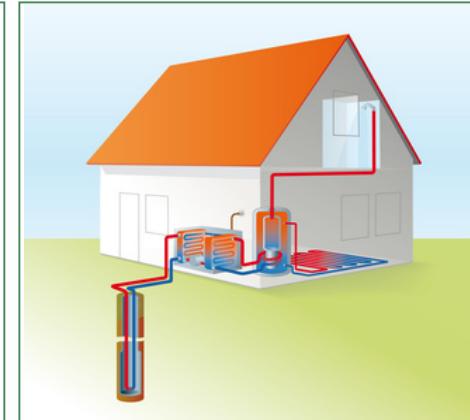
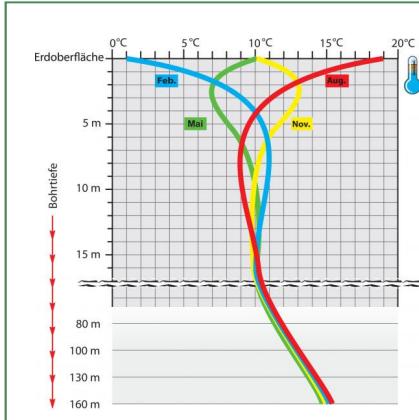
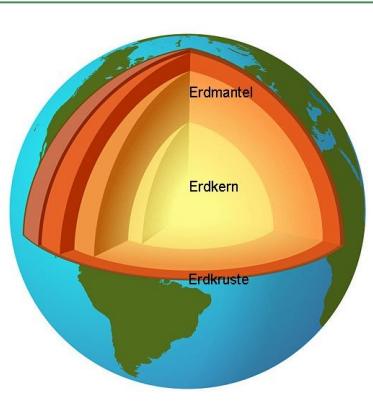


MASTERARBEIT



OBERFLÄCHENNAHE GEOTHERMIESYSTEME – SCHWERPUNKT AUF DIE NUTZUNG VON ERDWÄRMESONDEN FÜR DEN HÄUSLICHEN GEBRAUCH

Philipp Oswald, BSc

Vorgelegt am
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft
Projektentwicklung und Projektmanagement

Betreuer
Univ.-Prof. Mag.rer.soc.oec. DDipl.-Ing. Dr.techn. Mauerhofer Gottfried
Dr.phil. Univ.-Doz. Johann Emmerich Goldbrunner
Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz

Graz am 08. Jänner 2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am
(Unterschrift)

STATUARY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,
date
(signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Mag.rer.soc.oec. DDipl.-Ing. Dr.techn. Mauerhofer Gottfried, Herrn Dr.phil. Univ.-Doz. Goldbrunner Johann Emmerich und Herrn Oberrat Dipl.-Ing. Leibniz Otto.

Besonderer Dank gebührt vor allem meiner Familie, die mich über die gesamte Ausbildungszeit hindurch in allen Belangen unterstützte und mir dieses Studium überhaupt ermöglichte. Danken möchte ich auch meiner Freundin für ihren Rückhalt sowie ihre Hilfe.

Graz, am 08. Jänner 2015

(Unterschrift des Studenten)

Kurzfassung

Die Nutzung der Oberflächennahen Geothermie stellt eine bedeutende Möglichkeit zum Heizen und Kühlen von Gebäuden dar. Speziell im Hinblick auf den Verbrauch von Rohstoffen und deren Nachhaltigkeit weist diese Art der Energiegewinnung ein großes Potenzial zur Verdrängung konventioneller Energieträger für die Bereitstellung von Wärme auf.

Diese Arbeit gibt zunächst einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten der Nutzung oberflächennaher geothermischer Energie, wobei der Schwerpunkt auf den Bereich der Erdwärmesonden gelegt wurde.

Im Weiteren wird auf die technische Ausführung von Tiefensonden eingegangen und die wichtigsten Grundlagen von der Errichtung bis hin zur Inbetriebnahme solcher Anlagen beschrieben.

Abschließend wird ein Verfahren zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit dargestellt, um die Vorteilhaftigkeit einer Heizanlage festzustellen. Zu diesem Zweck wurde für ein fiktives Einfamilienhaus ein Heizanlagenvergleich nach der Annuitätenmethode durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen im Besonderen die Vorteile der Erdwärmesondenanlage im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen auf.

Abstract

The use of near-surface geothermal energy represents an important opportunity for heating and cooling of buildings. Especially in terms of raw material consumption and their sustainability, this kind of energy extraction offers significant potential to replace heat supply by conventional energy sources.

This thesis presents a review on different options of using geothermal energy with the focus on the sphere of borehole exchangers.

Furthermore the technical implementation of borehole exchangers is discussed to illustrate the essentials of construction up to initial operation.

Finally a procedure is demonstrated to determine the efficiency and profitability of a heating system. For this purpose the annuity method was used to perform an economic comparison of a fictitious single-family house. The results are particular demonstrating the advantages of the borehole heat exchanger-system compared to conventional heating systems.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 0 | Einleitung | 1 |
| 0.1 | Zielsetzung | 1 |
| 0.2 | Gliederung..... | 2 |
| 1 | Grundlagen der Geothermie | 4 |
| 1.1 | Geologische und physikalische Grundlagen | 4 |
| 1.1.1 | Der Ursprung geothermischer Energie..... | 4 |
| 1.1.2 | Terrestrischer Wärmestrom und geothermischer Gradient..... | 5 |
| 1.1.3 | Temperaturrentwicklung an der Oberfläche und in der Tiefe | 6 |
| 1.1.4 | Der Einfluss des Wassers..... | 8 |
| 1.1.5 | Grundwasserleiter..... | 8 |
| 1.1.6 | Bodencharakteristische Eigenschaften | 11 |
| 1.2 | Unterscheidung und Einteilung von Geothermiequellen..... | 14 |
| 1.2.1 | Oberflächennahe Geothermie..... | 14 |
| 1.2.2 | Tiefe Geothermie | 16 |
| 1.3 | Potenzial der Erdwärme..... | 18 |
| 1.3.1 | Weltweiter Ausblick..... | 18 |
| 1.3.2 | Der österreichische Wärmepumpenmarkt | 19 |
| 1.4 | Vor- und Nachteile der Oberflächennahen Geothermie..... | 22 |
| 1.5 | Die Energiebilanz der Heizsysteme im Vergleich | 23 |
| 2 | Oberflächennahe Geothermie Systeme | 25 |
| 2.1 | Wesentliche Elemente einer Oberflächennahen Geothermie-Anlage | 25 |
| 2.2 | Wärmepumpenanlagen | 26 |
| 2.2.1 | Funktionsweise und Eigenschaften von Wärmepumpen | 27 |
| 2.2.2 | Wichtige Kennzahlen einer Wärmepumpe | 28 |
| 2.2.3 | Erdgekoppelte Wärmepumpentypen und ihre Besonderheiten..... | 30 |
| 2.2.4 | Vorlauftemperatur einer Wärmepumpe | 32 |
| 2.2.5 | Betriebsarten und Betriebsvarianten erdgekoppelter Wärmepumpen | 32 |
| 2.3 | Erdwärmesonden | 34 |
| 2.3.1 | Vor- und Nachteile von Erdwärmesonden | 37 |
| 2.3.2 | Kühlen mit Erdwärmesonden | 37 |
| 2.3.3 | Steigerung der Effizienz durch Solarthermie und Photovoltaik | 37 |
| 2.4 | Weitere Systemarten der Oberflächennahen Geothermie | 39 |
| 2.4.1 | Erdwärmekollektoren | 39 |
| 2.4.2 | Brunnenanlagen | 42 |
| 2.4.3 | Energiepfähle | 44 |
| 2.4.4 | Sonder- und Mischformen..... | 45 |
| 3 | Planungsgrundlagen | 48 |
| 3.1 | Rechtliche Grundlagen und Anforderungen | 48 |
| 3.1.1 | Wasserrechtliche Bewilligung | 48 |
| 3.1.2 | Sonstige Bewilligungen..... | 50 |
| 3.1.3 | Rechtliche Grundlage in der Steiermark..... | 50 |
| 3.2 | Grundlagen der Planung und Einreichung | 55 |
| 3.2.1 | Energetische Beschaffenheit der Gebäudehülle | 55 |
| 3.2.2 | Vorplanungsphase bei einer Sondenanalage..... | 56 |
| 3.2.3 | Planungsphase..... | 56 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2.4 | Einreichunterlagen einer Erdwärmesondenanlage | 57 |
| 3.3 | Grundlagen der Standortbeurteilung | 58 |
| 3.3.1 | Geologisches Vorprofil bei Anlagen bis 15 kW | 58 |
| 3.3.2 | Geothermal Response Test (GRT) bei Anlagen ab 15 kW | 59 |
| 3.3.3 | Enhanced Thermal Response Test (EGRT)..... | 64 |
| 4 | Bemessung einer Erdwärmesondenanlage | 67 |
| 4.1 | Auslegung von Erdwärmesondenanlagen - Grundlagen | 67 |
| 4.2 | Sondenbemessung nach ÖWAV-Regelblatt 207..... | 68 |
| 4.2.1 | Bemessungsbeispiel nach dem ÖWAV-Regelblatt 207 | 74 |
| 5 | Technische Ausführung von Erdwärmesonden | 78 |
| 5.1 | Bohrverfahren..... | 78 |
| 5.1.1 | Rotationsspülbohrung..... | 79 |
| 5.1.2 | Imlochhammerbohrung..... | 82 |
| 5.1.3 | Durchörterung von Druckwasserhorizonten | 82 |
| 5.1.4 | Weitere Risikopotenziale durch Bohrarbeiten..... | 84 |
| 5.2 | Bohrlochdurchmesser..... | 86 |
| 5.2.1 | Problematik Abstandhalter..... | 87 |
| 5.3 | Einbringen und Verpressen von Erdwärmesonden | 89 |
| 5.3.1 | Ablauf der Druckprüfung nach dem Einbringen der Sonden..... | 90 |
| 5.4 | Anforderungen an die Ringraumverpressung von Erdwärmesonden | 92 |
| 5.4.1 | Baustellenmischungen..... | 93 |
| 5.4.2 | Fertigmischungen | 94 |
| 5.4.3 | Schadhafte Verpresskörper | 94 |
| 5.5 | Sondenzuleitungen | 96 |
| 5.5.1 | Thermische Trennung von Zuleitungen..... | 96 |
| 5.5.2 | Verteilerschacht | 98 |
| 5.6 | Inbetriebnahme der Erdwärmesondenanlage..... | 98 |
| 5.7 | Optimierungspotenziale von Erdwärmesondenanlagen | 99 |
| 5.7.1 | Auslegung und Optimierung im Neubau..... | 99 |
| 5.7.2 | Auslegung und Optimierung im Bestand..... | 100 |
| 5.7.3 | Zusammenfassung der Optimierungspotenziale von Erdwärmesondenanlagen | 102 |
| 6 | Praxisbeispiel: Die Herstellung von Erdwärmesonden | 105 |
| 6.1 | Projektbeschreibung | 105 |
| 6.1.1 | Einreichunterlagen..... | 105 |
| 6.1.2 | Geologische und Hydrogeologische Vorerkundung..... | 105 |
| 6.2 | Herstellen der Erdwärmesondenbohrungen..... | 106 |
| 6.3 | Einbringen und Verpressen der Sonden | 109 |
| 7 | Wirtschaftlichkeit | 112 |
| 7.1 | Berechnungsverfahren | 112 |
| 7.2 | Kostenarten | 113 |
| 7.3 | Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung..... | 114 |
| 7.3.1 | Kapitalwertmethode | 115 |
| 7.3.2 | Annuitätenmethode..... | 117 |
| 7.4 | Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätenmethode anhand der VDI 2067 Blatt 1:2012..... | 118 |
| 7.4.1 | Ermittlung der Finanzierungsdaten | 119 |
| 7.4.2 | Ermittlung der kapital- und betriebsgebunden Kosten | 122 |
| 7.4.3 | Ermittlung der bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten | 125 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 7.4.4 | Sonstige Kosten | 126 |
| 7.4.5 | Ermittlung der Gesamtannuität | 127 |
| 7.5 | Beschreibung des Heizanlagenvergleichs..... | 128 |
| 7.5.1 | Gebäudedaten..... | 128 |
| 7.5.2 | Finanzierungsdaten und Energiepreise..... | 129 |
| 7.5.3 | Zusammenstellung der Heizanlagen und der Preisermittlung..... | 130 |
| 7.5.4 | Randbedingungen des Heizanlagenvergleichs | 131 |
| 7.5.5 | Ergebnisse und Interpretation der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | 131 |
| 7.5.6 | Die Heizsysteme im Vergleich | 132 |
| 8 | Zusammenfassung | 136 |
| 8.1 | Persönliches Schlusswort..... | 138 |
| 9 | Anhang | 141 |
| 9.1 | Basisdaten des Wirtschaftlichkeitsvergleichs | 142 |
| 9.2 | Berechnung der Finanzierungsdaten | 143 |
| 9.3 | Ermittlung der kapital- und betriebsgebundenen Kosten nach der VDI 2067 Blatt 1: 2012 | 144 |
| 9.4 | Ermittlung der bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten..... | 146 |
| 9.5 | Ermittlung der Gesamtannuität nach der VDI 2067 Blatt 1: 2012 | 147 |
| 9.6 | Zusammenfassung und Darstellung der Ergebnisse des Wirtschaftlichkeitsvergleichs..... | 152 |
| 9.7 | Preisermittlung der Heizanlagenkomponenten..... | 154 |
| 9.8 | Preisermittlung der Heiz- und Lagerräume..... | 155 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 157 |
| 10.1 | Bücher..... | 157 |
| 10.2 | Skripten | 157 |
| 10.3 | Studien und Fachberichte..... | 157 |
| 10.4 | Normen, Richtlinien und Gesetze | 158 |
| 10.5 | Leitfäden..... | 159 |
| 10.6 | Internet | 160 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 1.1: | Aufbau der Erde | 5 |
| Abbildung 1.2: | Wärmetransportformen (nach Dr. Barthel, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart) | 6 |
| Abbildung 1.3: | Temperaturverteilung an der Oberfläche | 7 |
| Abbildung 1.4: | Temperaturanstieg über die Tiefe | 7 |
| Abbildung 1.5: | Arten von Grundwasserleitern..... | 9 |
| Abbildung 1.6: | Freies und gespanntes Grundwasser (nach Möller 1998) | 10 |
| Abbildung 1.7: | Erläuterung hydrogeologischer Begriffe..... | 11 |
| Abbildung 1.8: | Verfahren der Oberflächennahen Geothermie..... | 15 |
| Abbildung 1.9: | Verfahren der Tiefengeothermie | 17 |
| Abbildung 1.10: | Weltweite Entwicklung der Wärme- und Stromproduktion durch die Geothermie | 19 |
| Abbildung 1.11: | Preisentwicklung der Energieträger für Haushalte von 1998 bis 2014 | 19 |
| Abbildung 1.12: | Verkaufte Wärmepumpen für den österreichischen Inlandsmarkt..... | 20 |
| Abbildung 1.13: | Österreichische Inlands-Marktanteile von Heizungswärmepumpen anhand ihrer Wärmequelle..... | 21 |
| Abbildung 2.1: | Wesentliche Elemente einer Geothermieranlage | 26 |
| Abbildung 2.2: | Kreisprozess einer Wärmepumpe..... | 28 |
| Abbildung 2.3: | Häufigste Sondentypen bei EWS-Anlagen | 35 |
| Abbildung 2.4: | Schema einer Erdwärmesondenanlage | 36 |
| Abbildung 2.5: | Schema einer Erdwärmekollektoranlage | 41 |
| Abbildung 2.6: | Schema einer Grundwasserbrunnenanlage..... | 43 |
| Abbildung 3.1: | Gespannte oder artesisch gespannte Grundwasserkörper in der Steiermark | 52 |
| Abbildung 3.2: | Gespannte, teilweise gespannte sowie artesisch gespannte Zonen (>0,3 bar) der Steiermark..... | 54 |
| Abbildung 3.3: | Energetische Gebäudequalität zur Nutzung der Wärmepumpentechnik..... | 55 |
| Abbildung 3.4: | Schema einer GRT-Einheit | 60 |
| Abbildung 3.5: | Unterschied der Linienquellentheorie (blau) zur Zylinderquellentheorie (rot)..... | 62 |
| Abbildung 3.6: | Schematischer Vergleich einer GRT- und EGRT-Einheit..... | 65 |
| Abbildung 3.7: | Messergebnisse eines EGRT - links: effektive Wärmeleitfähigkeit, rechts: ungestörte Untergrundtemperatur..... | 66 |
| Abbildung 4.1: | Sondenbemessung nach dem ÖWAV Regelblatt 207 (Vergleich Simplex/Duplex-Ausführung) | 76 |
| Abbildung 5.1: | Schema des direkten Spülbohrverfahrens | 81 |
| Abbildung 5.2: | Schema eines Imlochhammers..... | 82 |
| Abbildung 5.3: | Verursachte Stockwerksverbindungen durch unzureichend abgedichtete Erdwärmesonden | 83 |

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Abbildung 5.4: | Bohrlochgeometrie beim Rotationsspülbohrverfahren - Einfach-U-Rohr, 40 mm sowie Doppel-U-Rohr, 32 mm | 87 |
| Abbildung 5.5: | Bohrlochgeometrie bei Verwendung von Abstandhaltern - Doppel-U-Rohr-Ausführung, 32 mm | 88 |
| Abbildung 5.6: | Druckdiagramm nach SIA 384/6 | 91 |
| Abbildung 5.7: | Trennung des Vor- und Rücklaufs | 97 |
| Abbildung 5.8: | Rücklaufdämmung bei Erdwärmesonden | 97 |
| Abbildung 5.9: | Gesamtoptimierung von EWS-Anlagen im Neubau | 100 |
| Abbildung 5.10: | Gesamtoptimierung von EWS-Anlagen im Sanierungsfall | 101 |
| Abbildung 6.1: | Aufstellen und einrichten des Bohrgeräts | 107 |
| Abbildung 6.2: | Austrag des Bohrgutes beim Lufthebeverfahren..... | 108 |
| Abbildung 6.3: | Austrag des Bohrgutes beim Spülbohrverfahren | 109 |
| Abbildung 6.4: | Einbringen der Sonde mit Hilfe einer Haspel | 110 |
| Abbildung 6.5: | Veranschaulichung des Verpressvorgangs..... | 111 |
| Abbildung 7.1: | Berechnungsschema des Kapitalwerts | 116 |
| Abbildung 7.2: | Vereinfachtes Schema der Annuitätenmethode..... | 117 |
| Abbildung 7.3: | Ergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mittels Annuitätenmethode..... | 134 |
| Abbildung 7.4: | Darstellung der bedarfs-(verbrauchs-) geb. Kosten | 135 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------------|--|-----|
| Tabelle 1.1.1: | Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten des ÖWAV-Regelblatts 207, 2009 (nach der VDI 4640)..... | 13 |
| Tabelle 1.2: | Überblick über Systeme, Verfahren und Nutzung der Tiefengeothermie | 16 |
| Tabelle 2.1: | Überblick über die Wärmepumpentypen der Oberflächen-nahen Erdwärmennutzung..... | 31 |
| Tabelle 4.1: | Spezifische Entzugsleistungen bei Anlagen mit einer Bohrung nach der VDI 4640 | 70 |
| Tabelle 4.2: | Planungsprogramme zur Auslegung geothermischer Anlagen .. | 72 |
| Tabelle 4.3: | Simulationssoftware zur Auslegung geothermischer Anlagen ... | 73 |
| Tabelle 5.1: | Bohrtechniken und Verfahren für Erdwärmebohrungen | 78 |
| Tabelle 5.2: | Bohrlochdurchmesser und Ringraumstärke | 89 |
| Tabelle 7.1: | Beispiele zu Kostengruppen und Kostenarten nach VDI 2067 Blatt 1:2012..... | 114 |
| Tabelle 7.2: | Berechnungsbeispiel des Kapitalwerts | 116 |
| Tabelle 7.3: | Rechnerische Nutzungsdauer sowie Aufwand für Instand-haltung und Bedienung von Heizanlagen (Tabelle A2)..... | 125 |
| Tabelle 7.4: | Gebäudedaten für den Heizanlagenvergleich..... | 129 |
| Tabelle 7.5: | Berechnung der Finanzierungsdaten | 129 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------|---|
| a | Jahr bzw. Annuitätenfaktor |
| B0/W35 | B0 = „brine“ (engl. für Sole) bei einer Eintrittstemperatur der Wärmeträgerflüssigkeit von 0 °C; W35 = Wasser bei einer Austrittstemperatur von 35 °C |
| BKI | Baukosteninformationszentrum |
| COP | Coefficient of Performance |
| d | Tag |
| E | Einwohner |
| EWS | Erdwärmesonde |
| EGRT | Enhanced Geothermal Response Test |
| FCKW bzw. HFCKW | voll- bzw. teilhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe |
| GIS | Geografisches Informationssystem |
| GRT | Geothermal Response Test |
| GW | Grundwasser |
| JAZ | Jahresarbeitszahl |
| KF | Korrekturfaktor |
| OIB | Österreichisches Institut für Bautechnik |
| ÖWAV | Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband |
| SIA | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| WP | Wärmepumpe |

0 Einleitung

Die geothermische Energie des Untergrunds oder auch Erdwärme genannt, stellt einen in der Tiefe verborgenen Energievorrat unseres Planeten dar. Unter Oberflächennaher Geothermie werden in Österreich jene Bereiche verstanden, welche die gespeicherte Wärmeenergie in eine Tiefe von bis zu 300 m nutzen. Das gleichmäßige, träge Temperaturniveau der Gesteinsschichten (Locker- und Festgestein) eignet sich dabei hervorragend für eine energetische Nutzung als Wärme- sowie Kältequelle. Speziell im Hinblick auf klimabedingte Veränderungen und unter Berücksichtigung begrenzter Rohstoffvorkommnisse rückt die Nutzung von alternativen Energiequellen immer deutlicher in den Fokus. Infolgedessen ist dem oberflächennahen Gebrauch von Erdwärme ein enormes Potenzial zuzuschreiben, konventionelle Energieträger zur Wärmebereitstellung zu verdrängen.

Die Nutzung dieser Wärme- bzw. Kältequelle kann dabei mittels Wärmepumpen sichergestellt werden, welche die dafür notwendige Energie über ein, in den Untergrund verbautes Absorptionssystem generieren. Dazu sind sowohl offene (z.B. Grundwasserbrunnen) als auch geschlossene Systeme (u.a. Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren) geeignet. Das Prinzip der Erdwärmennutzung zum Heizen und Kühlen von Gebäuden weist vor allem im nordamerikanischen-, europäischen- sowie im skandinavischen Raum eine hohe Verbreitung auf. In Deutschland und Österreich ist dieser Marktanteil allerdings noch relativ gering. Einerseits ist dies durch die historisch gewachsene Struktur der Heizanlagen zu erklären, andererseits beträgt die Lebensdauer heutiger Heizsysteme etwa 15 bis 20 Jahre. Die Verwendung von Wärmepumpen zur Nutzung der Energie aus dem Untergrund stellt dabei eine sehr effiziente Technik dar. Die Energieeinsparungspotenziale liegen im Vergleich zu einem Öl-Kessel bei ca. 30 bis 45 %, gegenüber dem Gasbrennwertkessel bei ca. 20 bis 35 %. Ein weiterer Vorteil der Wärmepumpentechnik entsteht durch die deutlich bessere Energiebilanz. Sowohl der Primärenergiebedarf als auch die Schadstoffemissionen sind im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen deutlich geringer.¹

0.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit liegt einerseits darin, dem Leser/der Leserin einen umfassenden Überblick über die Grundlagen und Systeme der Oberflächennahen Geothermie für den häuslichen Gebrauch zu ermöglichen sowie andererseits Methoden aufzuzeigen, um die Wirtschaftlichkeit ei-

¹ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 5-10.

ner Erdwärmesondenanlage im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen abschätzen zu können. Einen weiteren Bearbeitungsschwerpunkt bilden jene Faktoren, welche für die Herstellung von Tiefensonden notwendig sind. Dabei wird speziell auf die technische Ausführung eingegangen, um eine korrekte Anlagenauslegung gewährleisten zu können.

0.2 Gliederung

Das erste Kapitel widmet sich der Grundlagenerarbeitung, um eine Wissensbasis für die weiteren Themengebiete und Kapitel herzustellen. Dabei wird vor allem auf die geologischen und physikalischen Grundlagen eingegangen.

Im zweiten Kapitel erfolgt eine Darstellung der wesentlichen oberflächennahen Systeme, die zur Sicherstellung von geothermischer Energie für Kleinanlagen genutzt werden. Des Weiteren wird die Wärmepumpentechnik erläutert und beschrieben, da diese ein wesentlicher Bestandteil der Erdwärmenumutzung ist.

Im dritten Kapitel werden die Planungsgrundlagen für die Realisierung einer Erdwärmesondenanlage näher beschrieben. Zu Beginn wird dazu auf die rechtlichen Anforderungen – insbesondere in der Steiermark – eingegangen. Des Weiteren erfolgen die Erarbeitung der Grundlagen der Planung und Einreichung sowie die Darstellung der Methoden zur Standortbeurteilung.

Das vierte Kapitel beschreibt die Auslegung und Bemessung einer Sondenanlage. Dafür werden zunächst die Grundlagen im Hinblick auf die Anlagenauslegung definiert sowie in weiterer Folge die verschiedenen Bemessungsmethoden vorgestellt.

Im fünften Kapitel erfolgt ein umfassender Überblick über die Sondenherstellung. Hier wird im Besonderen auf technische Kriterien, vom Beginn der Bohrung bis hin zur Inbetriebnahme der Erdwärmesondenanlage, eingegangen.

Das sechste Kapitel veranschaulicht und beschreibt die Errichtung einer 100 m tiefen Erdwärmesonde anhand eines praktischen Beispiels der Firma SCHLEICH GEO GmbH. Hierzu wurde der Herstellungsprozess, beginnend von der Sondenbohrung bis hin zur Verpressung des Bohrlochringraums mittels Fotodokumentation abgebildet und beschrieben.

Das siebente Kapitel widmet sich schließlich der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit. Zunächst wird hier auf die grundlegenden Berechnungsverfahren und Methoden eingegangen. Danach erfolgt eine Darstellung der Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätenmethode anhand der Deutschen Richtlinie „VDI 2067 Blatt 1:2012 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“. Auf diese Grundlagen aufbauend, wird abschließend die Wärmepumpentechnik (Sole-Wasser- und Luft-Wasser-

Wärmepumpe), konventionellen Heizsystemen (Öl, Pellet, Gas) anhand eines Beispiels gegenübergestellt.

Im achten Kapitel erfolgt schließlich die Zusammenfassung der Arbeit, um abschließend die wichtigsten Inhalte und Erkenntnisse zusammenzuführen. Des Weiteren wird durch das persönliche Schlusswort die eigene Meinung dargelegt.

Dem Anhang können abschließend die Berechnungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, welche im Kapitel 7 beschrieben wurden, entnommen werden. Sie runden die Auseinandersetzung mit dem Thema der Wirtschaftlichkeit ab und sind als ein möglicher Lösungsweg für einen solchen Vergleich anzusehen.

1 Grundlagen der Geothermie

Um die Mechanismen im Zusammenhang mit der Erdwärme von ihrem Ursprung bis hin zu ihrer Nutzung richtig verstehen und interpretieren zu können, ist ein Basiswissen über die wichtigsten Grundlagen und Funktionsprinzipien erforderlich. Das folgende Kapitel soll dem Leser/der Leseerin dabei als Grundlage dienen und die Basis für die weiter behandelten Themengebiete bilden.

1.1 Geologische und physikalische Grundlagen

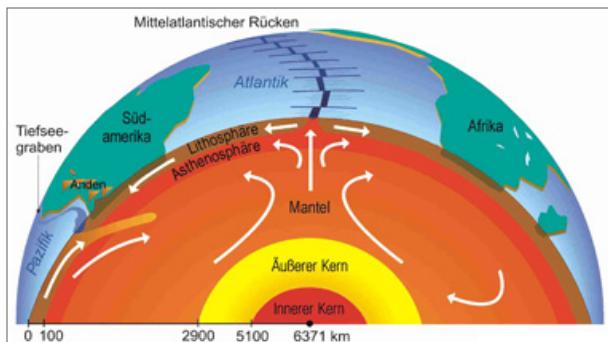
Die Nutzung des energetischen Potenzials des Untergrunds hängt stark von den vorherrschenden Standortbedingungen ab. Art und Zustand der Gesteine, hydrogeologische Verhältnisse als auch die Nutzung beeinflussen die Effizienz einer Anlage. Da diese Parameter erheblich variieren können, sind die Bedingungen am Standort stets neu zu beurteilen.²

1.1.1 Der Ursprung geothermischer Energie

Der Ursprung der geothermischen Energie stammt im Wesentlichen aus drei verschiedenen Quellen. Zum einen ist das die **Ursprungswärme**, welche bereits vor der Entstehung der Erde vorhanden war. Diese Wärmeform spielt jedoch nur eine untergeordnete Rolle, da ihr Anteil im Vergleich zu den anderen Energiequellen gering ausfällt. Die zweite Form ist die **Gravitationsenergie**, deren Ursprung vor ca. 4,5 Mrd. Jahren zur Zeit der Erdentstehung zu finden ist. Sie wurde bei der Vereinigung von Staub, Gas, Gesteins- und Eisbrocken gebunden. In der Entstehungsphase der Erde schmolz sie die angehäuften Gesteinsmassen auf. Im Laufe der Zeit kühlten diese Massen ab und der Großteil der Wärme wurde im Erdinneren gespeichert. Bei der dritten Form spricht man von der **Radioaktivität** als Wärmequelle. Hierbei handelt es sich um eine Wärmeentwicklung aufgrund von Zerfallsprozessen durch die im Erdreich befindlichen natürlichen radioaktiven Isotope. Diese natürliche Form der Kernenergie wird durch Elemente wie beispielsweise Uran, Thorium oder Kalium hervorgerufen und bildet mit 50 bis 70 % den Hauptteil dieser Wärmeenergie.³ Zur Veranschaulichung stellt die folgende Abbildung den Schichtaufbau der Erde mit ihrem heißen Kern dar.

² Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 5.

³ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 17 bis 18.

Abbildung 1.1: Aufbau der Erde⁴

1.1.2 Terrestrischer Wärmestrom und geothermischer Gradient

Der Terrestrische Wärmestrom ist eine wichtige Kenngröße in der Geothermie, um den Nachschub von Wärme aus dem Erdinneren zu berechnen. Darunter versteht man den zur Erdoberfläche gerichteten **Wärmetransport** aus dem Erdinneren, welcher durch das Temperaturgefälle vom Kern (ca. 6000 °C) zur kühlen Oberfläche entsteht. Dabei wird der Wärmetransport im Wesentlichen entweder durch Konduktion (innerhalb des Gesteins) und/oder Konvektion (innerhalb von Gasen und Flüssigkeiten) sichergestellt.⁵

Unter **Konduktion** versteht man den Wärmefluss in einem Feststoff oder ruhendem Fluid (kein Massentransport). Dabei fließt die Wärme in Richtung der geringeren Temperatur (2. thermodyn. Hauptsatz). Die **Konvektion** beschreibt den Wärmetransport von Teilchen (Massentransport) in gasförmigen oder flüssigen Medien, welche thermische Energie mit sich führen. Diese wird einerseits unterschieden in die freie/natürliche Konvektion (Transport von Teilchen durch Temperatur- und/oder Konzentrationsdifferenzen (Dichteströmung)) sowie in die erzwungene Konvektion (Teilchenbewegung durch Einflüsse wie Grundwasser, Pumpen oder Gebläse). In Festkörpern kommt es jedoch zu keinen Konvektionerscheinungen. Der Vollständigkeit halber soll hier auch auf die **Dispersion** hingewiesen werden. Sie steht im Zusammenhang mit der Konvektion und beschreibt die feine Verteilung eines Feststoffs in einer Flüssigkeit.⁶ Die Wärmetransportformen werden in der Abbildung 1.2 veranschaulicht.

⁴ Quelle: <http://images.zeit.de/bilder/2008/37/bildergalerien/galerien/bg-goce/03.jpg>.

⁵ Vgl. <http://www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/einstieg-in-die-geothermie/ursprung-geothermischer-energie-und-geothermischer-gradient.html>. Datum des Zugriffs: 30.03.2015.

⁶ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 21 und 22.

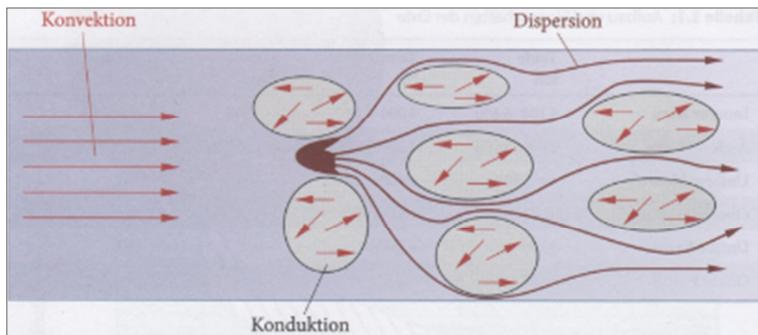


Abbildung 1.2: Wärmetransportformen (nach Dr. Barthel, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart)⁷

Aus dem terrestrischen Wärmestrom ergibt sich in weiterer Folge der sogenannte **geothermische Gradient**. Dieser bezeichnet die Temperaturzunahme über die Tiefe. Dabei beträgt die Wärmestromdichte der kontinentalen Platte etwa 65 mW/m^2 , was einem mittleren geothermischen Gradienten von **$3 \text{ }^\circ\text{C pro 100 m}$** entspricht. Dieser Mittelwert besitzt für große Teile Österreichs Gültigkeit, ist aber je nach geologischer Situation gewissen Schwankungen unterworfen.⁸

1.1.3 Temperaturentwicklung an der Oberfläche und in der Tiefe

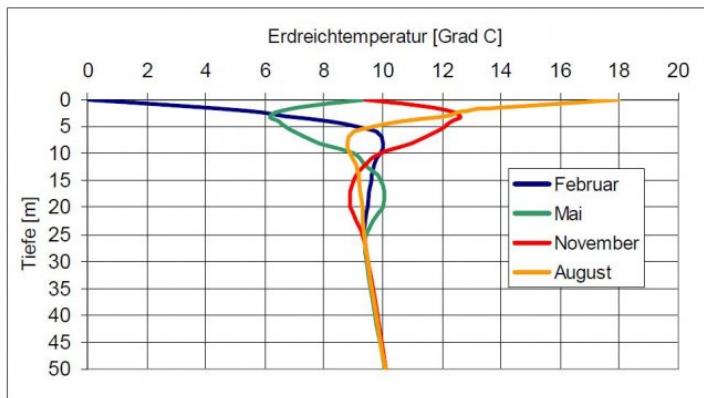
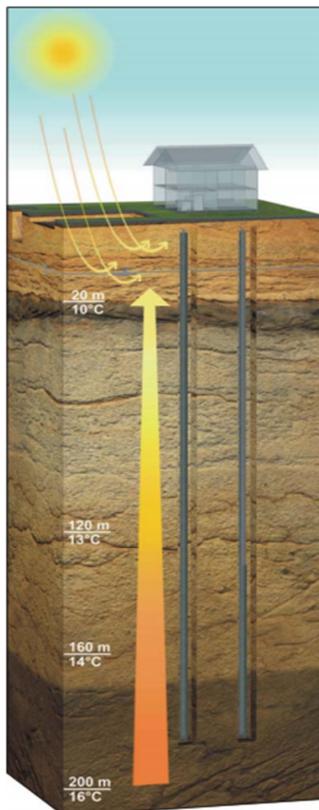
Aufgrund der bereits erläuterten Funktionsprinzipien kommt es durch den geothermischen Gradienten zu einer Temperaturzunahme über die Tiefe. An der Oberfläche hingegen (solare Zone) wird die Temperatur im Untergrund durch klimatische und jahreszeitlich bedingte Schwankungen beeinflusst, wobei hier festzuhalten ist, dass die Temperaturen in mehr als 1 m Tiefe in Mitteleuropa ganzjährig über dem Gefrierpunkt von Wasser liegen. Trotzdem erreichen diese Temperaturschwankungen Tiefen von etwa **10 bis 20 m**. Die dort vorherrschenden Temperaturen betragen in Mitteleuropa etwa **8 bis 12 °C**. Ab dieser Grenztiefe sind die Einflüsse der Oberfläche nicht mehr feststellbar und es wird von Eigenwärme der Erde gesprochen.⁹

Folgende Abbildungen veranschaulichen diese Schwankungen sowie den stetigen Anstieg der Temperatur über die Tiefe.

⁷ Quelle: SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 22.

⁸ Vgl. <http://www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/einstieg-in-die-geothermie/ursprung-geothermischer-energie-und-geothermischer-gradient.html>. Datum des Zugriffs: 30.03.2015.

⁹ Vgl. SASS, I. et al.: Leitfaden Erdwärme - Tipps für Hausbesitzer und Bauherren; 12. Auflage. S. 3.

Abbildung 1.3: Temperaturverteilung an der Oberfläche¹⁰Abbildung 1.4: Temperaturanstieg über die Tiefe¹¹¹⁰ Quelle: <http://www.erdsondenoptimierung.ch/oberflaechennahe-geothermie/begriffe-geothermie/>.¹¹ Quelle: Leitfaden Erdwärmeverwendung Niedersachsen – Rechtliche und technische Grundlagen.

1.1.4 Der Einfluss des Wassers

Die thermischen Eigenschaften des Untergrundes (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) werden neben der Petrographie maßgeblich durch den Wassergehalt beeinflusst. Der Wärmehaushalt des Bodens und in weiterer Folge die Effizienz einer geothermischen Anlage wird durch die Anwesenheit von Wasser und deren Beweglichkeit im Gebirge stark beeinflusst. **Festgesteine** sind durch Klüfte und Störungen (Trennflächen), Ausbildung von Karsten (Hohlräume) sowie durch die poröse Gesteinsmatrix potenziell wasserführend. Bei **Lockergesteinen** ist der effektive Porenraum (bis zu 35 %) für die Führung von Wasser verantwortlich. Dabei wird der Wassergehalt durch klimatische Bedingungen, der Vegetation, dem Grundwasserflurabstand, der Verteilung der Korngrößen, dem Porenanteil sowie der Kapillarität (enggestufte Schluffböden erreichen kap. Steighöhen von bis zu 20 m) beeinflusst. Je größer der Sättigungsgrad des Bodens mit Wasser ist, desto höher ist auch seine Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherfähigkeit. Jedoch führen erst länger anhaltende, gleichmäßige Regenschauer zu einem Anstieg des Wassergehaltes in den oberen Bodenschichten. Dies wiederum hat je nach Anlagenart (z.B. Kollektoren oder Sonden) unterschiedlich großen Einfluss auf ihre geothermische Nutzung.¹²

1.1.5 Grundwasserleiter

Ein Grundwasserleiter ist ein Gesteinskörper, der aufgrund seiner Hohlräume (Poren, Klüfte, Karste) geeignet ist, Grundwasser zu leiten.

Nach dem Maß ihrer Fähigkeiten Wasser zu leiten, werden Gesteinskörper unterschieden in Grundwasserleiter, Grundwasserhemmer (gering wasserdurchlässig) und Grundwassernichtleiter (wasserundurchlässig).¹³

Des Weiteren erfolgt auch eine Unterteilung des Grundwasserleiters in die Bereiche des Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiters.

- a) Der **Porengrundwasserleiter** ist durch ein zusammenhängendes Hohlräumsystem gekennzeichnet und besteht überwiegend aus sandigen/kiesartigen Locker- oder Festgesteinen.
- b) Der **Kluftgrundwasserleiter**, bestehend aus festem Stein, zeichnet sich durch Risse, Spalten und Klüfte aus, in denen das Wasser fließt. Die Fließgeschwindigkeit (bis zu mehreren hundert Meter pro Tag möglich) ist dabei höher als beim Porengrundwasserleiter, jedoch ist seine Speicherfähigkeit geringer.

¹² Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 7 bis 22.

¹³ Vgl. HÖLTING, B.; COLDEWEY, W.: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie; 8. Auflage. S. 9.

- c) Haben Klüfte die Größe unterirdischer Gänge bzw. Höhlen, spricht man von **Karstgrundwassserleiter**. Die dabei bewegten Wassermengen als auch die zurückgelegten Wege des Wassers können sehr groß sein (bis zu mehreren Kilometer Fließstrecke pro Tag).¹⁴

Die Abbildung 1.5 gibt dabei einen Überblick über die verschiedenen hier beschriebenen Grundwasserleiter.

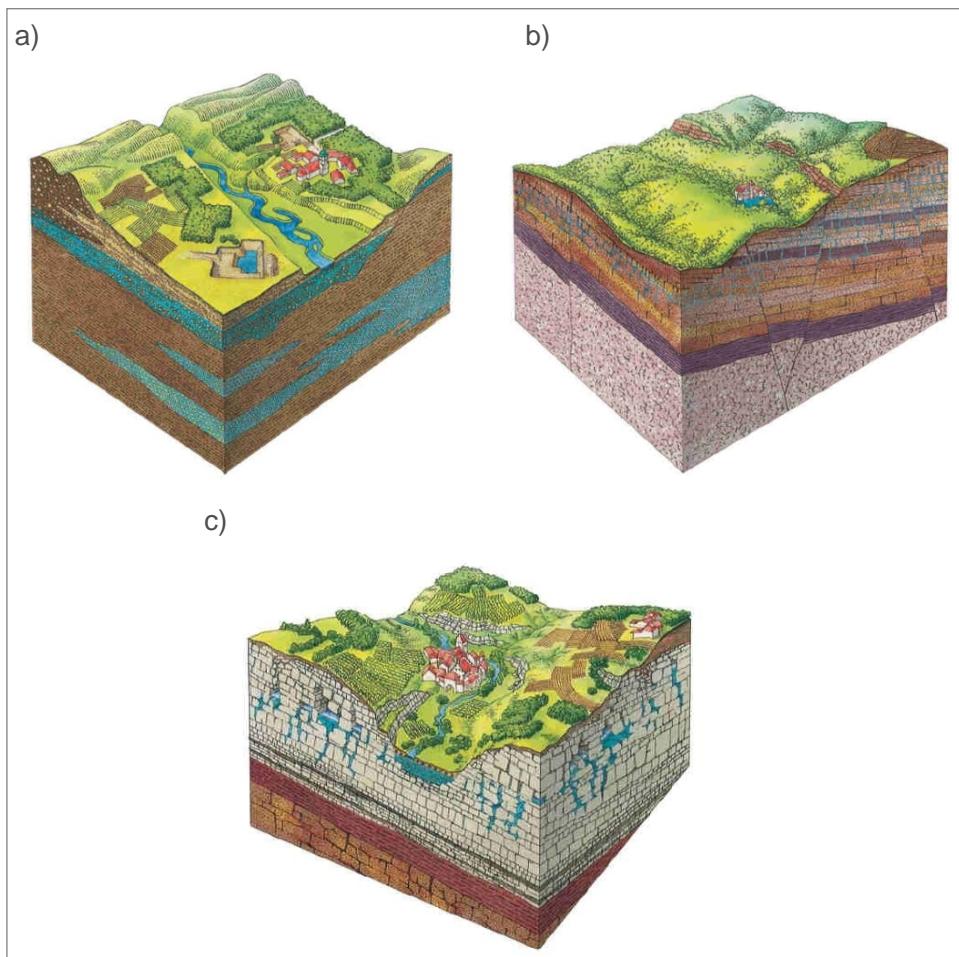


Abbildung 1.5: Arten von Grundwasserleitern¹⁵

Betrachtet man das Grundwasser hinsichtlich seiner verschiedenen Druckverhältnisse im Untergrund, erkennt man drei maßgebliche Fallunterscheidungen. Sind an einer Stelle der Luftdruck an der Oberfläche

¹⁴ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 26.

¹⁵ Quelle: SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 27.

und der Druck des Grundwassers gleich groß, so wird von **freiem/ungespanntem Grundwasser** gesprochen.¹⁶

Gespanntes Grundwasser hingegen weist ein anderes Druckniveau auf, als die Atmosphäre. Dabei wird das Wasser durch schlecht- bis un-durchlässige Schichten abgedeckt und kann dadurch nicht so hoch ansteigen, wie es seinem hydrostatischen Druck entsprechen würde. Ein Sonderfall des gespannten Wassers ist das **artesisch gespannte Grundwasser**. Hier liegt die Druckhöhe/Druckfläche oberhalb der Erdoberfläche. Dies tritt ein, wenn ein Grundwasserleiter so beschaffen ist, dass seine Aquifugen (stauende Schicht bzw. GW-Nichtleiter) mit einem Höhenunterschied abschließen.¹⁷ Da das Grundwasser bestrebt ist einen Druckausgleich mit der an der Oberfläche vorherrschenden Atmosphäre durchzuführen, ist für das Durchbohren dieser Schichten das Spülbohrverfahren zu empfehlen.

Die folgenden Abbildungen 1.6 sowie 1.7 veranschaulichen die verschiedenen Druckverhältnisse innerhalb verschiedener Grundwasserleiter bzw. Grundwasserstockwerke.

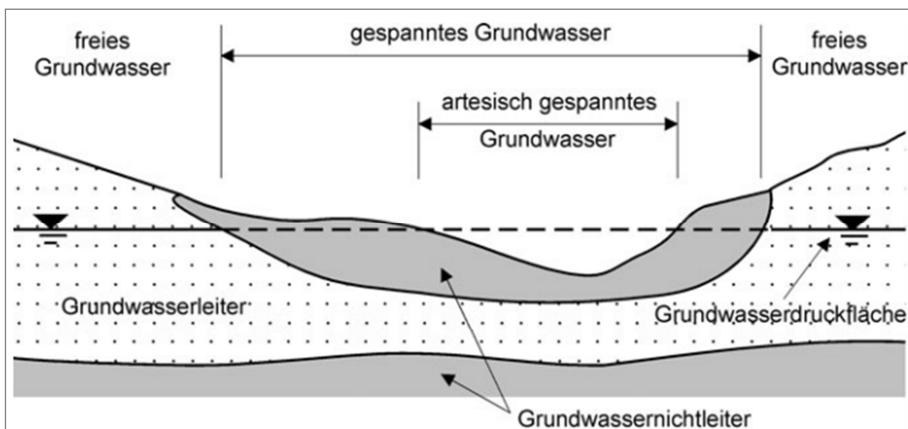
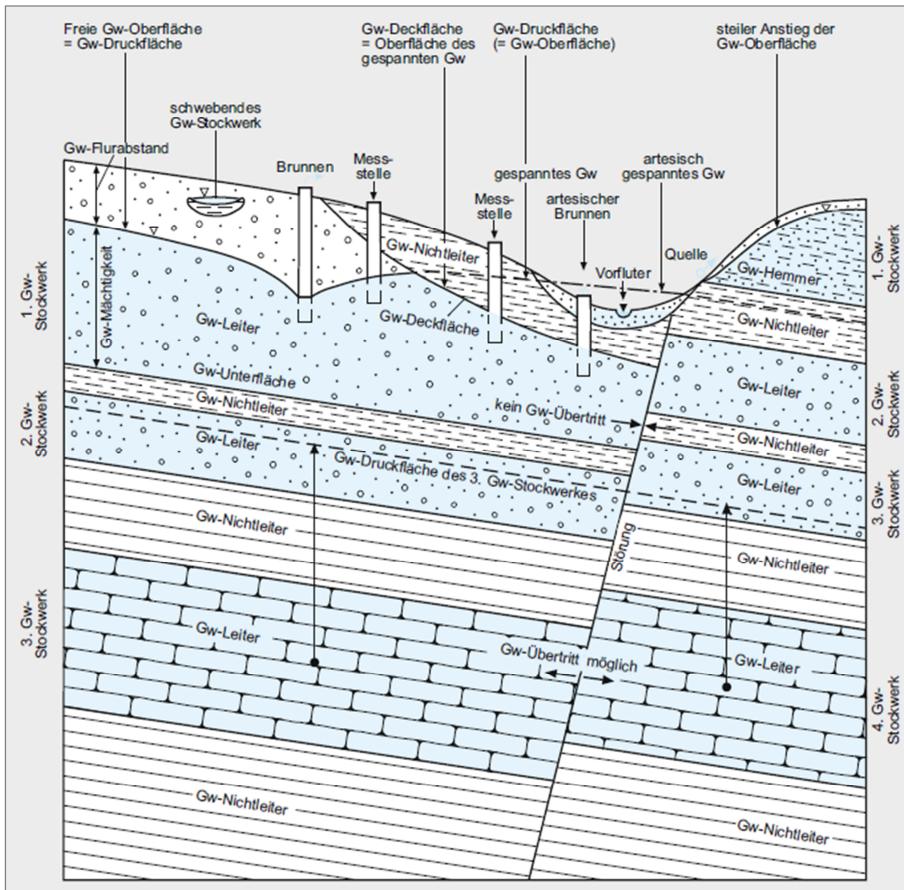


Abbildung 1.6: Freies und gespanntes Grundwasser (nach Möller 1998)¹⁸

¹⁶ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 28.

¹⁷ Vgl. HÖLTING, B.; COLDEWEY, W.: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie; 8. Auflage. S. 9.

¹⁸ Quelle: PATT, H.; JÜPNER, R.: Hochwasser-Handbuch; 2. Auflage. S. 224.

Abbildung 1.7: Erläuterung hydrogeologischer Begriffe¹⁹

1.1.6 Bodencharakteristische Eigenschaften

Die bodencharakteristischen Eigenschaften des Untergrunds sind bei der Nutzung von geothermischen Anlagen von größter Bedeutung. Primär beeinflussen der **Wassergehalt**, die **Bodenart** und die **Dichte** die thermischen Eigenschaften des Bodens. Der Transport von Wärmemengen innerhalb des Untergrunds setzt sich grundsätzlich aus einem konvektiven und konduktiven Anteil zusammen. Bei Bodenschichten, die mit Grundwasser durchzogen sind, überwiegt jedoch ein Wärmetransport aufgrund erzwungener Konvektion. Als Einflussfaktoren sind bei Porengrundwasserleitern unter anderem die Korngrößenverteilung, das Volumen und der effektive Anteil der Poren sowie der Sättigungsgrad zu nennen. Konduktions- als auch Dispersionseffekte spielen hier eine eher untergeordnete Rolle.

¹⁹ Quelle: HÖLTING, B.; COLDEWEY, W.: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie; 8. Auflage. S. 10.

Auch das Frieren und Tauen des Bodens leistet einen Beitrag zur Wärmeübertragung. Steigende Temperaturen verursachen einen Anstieg des Porenwasserdruckes. Dies wiederum bewirkt eine Diffusion des Wassers und führt zur Vermischung von Stoffen (Flüssigkeiten, Gasen oder Lösungen) verschiedener berührter Konzentrationen. Auslöser für diese Vermischung ist die Wärmebewegung der einzelnen Stoffe, wodurch es zu einem Wärmetransport anhand eines Konzentrationsgefälles kommen kann. Zu große Temperaturunterschiede im Boden haben jedoch auch direkte Auswirkungen auf die Bodenfeuchtigkeit. Es kann zur Verschlechterung der thermischen Eigenschaften aufgrund von Austrocknungserscheinungen bzw. zu Setzungs- oder Schrumpfungsvorgängen kommen.²⁰

Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität

Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität sind abhängig vom **Wassergehalt**. Böden mit einer hohen Sättigung weisen deshalb auch höhere thermische Eigenschaften auf. Wasser hat zwar eine geringe Wärmeleitfähigkeit (etwa 0,59 W/(m·K)) aber dafür eine große Wärmekapazität (ca. 4,15 MJ/(m³·K)). Es besitzt also ein großes Vermögen, thermische Energie zu speichern. Dementsprechend sind für die Nutzung von Erdwärmesondenanlagen grundwasserführende Horizonte von großem Vorteil, da diese große Energiemengen mitführen können und somit die Entzugsleistung dieser Schichten signifikant erhöhen. Unter der Definition der Wärmeleitfähigkeit λ eines Gesteins versteht man die Fähigkeit eines Stoffes, thermische Energie mittels Wärmeleiter (Gestein und/oder Grundwasser) zu transportieren. Diese hat Einfluss auf den Temperaturgradienten der einzelnen Bodenschichten. Die Wärmeleitfähigkeit wird mittels der Temperaturleitfähigkeit κ (m²/s), der Dichte ρ (kg/m³) und der spezifischen Wärmekapazität c (W·s/(kg·K) bzw. J/(kg·K)) berechnet (siehe Gl. 1.1). Dabei trifft die Temperaturleitfähigkeit κ eine Aussage darüber, wie schnell sich eine Temperaturänderung ausbreitet. Hingegen beschreibt die Wärmekapazität das Vermögen eines Körpers, thermische Energie zu speichern. Sie wird maßgeblich von der Porosität und der Wassersättigung des Gesteins beeinflusst.²¹

$$\lambda = \kappa * \rho * c \left[\frac{W}{(m \cdot K)} \right]$$

[Gl. 1.1]²²

²⁰ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 28 und 29.

²¹ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 28 und 29 sowie SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 21 und 22.

²² SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 29.

Die Tabelle 1.1.1 zeigt den Zusammenhang der Dichte, der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität verschiedener Gesteine. Darüber hinaus ist darauf hinzuweisen, dass die Werte dieser Tabelle nur einen allgemeinen Überblick darstellen und nach weiteren regionalen sowie länderspezifischen Anpassungen variieren.

Tabelle 1.1.1: Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten des ÖWAV-Regelblatts 207, 2009 (nach der VDI 4640)²³

| | Gesteinstyp | Wärmeleitfähigkeit [λ , W/(m·K)] | | spez. Wärmekapazität [c] MJ/(m ³ ·K) | Dichte [ρ] 103 kg/m ³ |
|--------------------------|------------------------------------|---|---------|---|---|
| | | empf. Rechenwert | | | |
| Lockgesteine | Ton/Schluff, trocken | 0,4–1,0 | 0,5 | 1,5–1,6 | 1,8–2,0 |
| | Ton/Schluff, wassergesättigt | 0,9–2,3 | 1,7 | 2,0–2,8 | 2,0–2,2 |
| | Sand, trocken | 0,3–0,8 | 0,4 | 1,3–1,6 | 1,8–2,2 |
| | Sand, wassergesättigt | 1,5–4,0 | 2,4 | 2,2–2,8 | 1,9–2,3 |
| | Kies/Steine, trocken | 0,4–0,5 | 0,4 | 1,3–1,6 | 1,8–2,2 |
| | Kies/Steine, wassergesättigt | 1,6–2,0 | 1,8 | 2,2–2,6 | 1,9–2,3 |
| Sedimentäre Festgesteine | Ton-/Schluffstein | 1,1–3,5 | 2,2 | 2,1–2,4 | 2,4–2,6 |
| | Sandstein | 1,3–5,1 | 2,3 | 1,8–2,6 | 2,2–2,7 |
| | Konglomerat/Brekzie | 1,3–5,1 | 2,3 | 1,8–2,6 | 2,2–2,7 |
| | Mergelstein | 1,5–3,5 | 2,1 | 2,2–2,3 | 2,3–2,6 |
| | Kalkstein | 2,5–4,0 | 2,8 | 2,1–2,4 | 2,4–2,7 |
| | Dolomitstein | 2,8–4,3 | 3,2 | 2,1–2,4 | 2,4–2,7 |
| | Sulfatgestein (Anhydrit) | 1,5–7,7 | 4,1 | 2,0 | |
| | Sulfatgestein (Gips) | 1,3–2,8 | 1,6 | 2,0 | |
| | Chloridgestein (Stein-/Kalischl.) | 5,3–6,4 | 5,4 | 1,2 | 2,1–2,2 |
| | Steinkohle | 0,3–0,6 | 0,4 | 1,3–1,8 | |
| Magmatische Festgesteine | Tuffit | 1,1 | 1,1 | | |
| | Vulkanit, sauer bis intermediär | z. B. Rhyolit, Trachyt | 3,1–3,4 | 3,3 | 2,1 |
| | | z. B. Latit, Dacit | 2,0–2,9 | 2,6 | 2,9–3,0 |
| | Vulkanit, basisch bis ultrabasisch | z. B. Andesit, Basalt | 1,3–2,3 | 1,7 | 2,3–2,6 |
| | Plutonit, sauer bis intermediär | Granit | 2,1–4,1 | 3,4 | 2,1–3,0 |
| | | Syenit | 1,7–3,5 | 2,6 | 2,5–3,0 |
| Metamorphe Festgesteine | Plutonit, basisch bis ultrabasisch | Diorit | 2,0–2,9 | 2,6 | 2,9–3,0 |
| | | Gabbro | 1,7–2,5 | 1,9 | 2,8–3,1 |
| | gering metamorph | Tonschiefer | 1,5–2,6 | 2,1 | 2,2–2,5 |
| | | Kieselschiefer | 4,5–5,0 | 4,5 | 2,2 |
| | mittel bis hoch metamorph | Marmor | 1,3–3,1 | 2,5 | 2,5–2,8 |
| | | Quarzit | 5,0–6,0 | 5,5 | 2,1 |
| Andere Stoffe | | Phyllit | 1,5–3,1 | 2,2 | 2,2–2,4 |
| | | Glimmerschiefer | 1,5–3,1 | 2,2 | 2,2–2,4 |
| | | Gneis | 1,9–4,0 | 2,9 | 2,4–2,7 |
| | | Amphibolit | 2,1–3,6 | 2,9 | 2,0–2,3 |
| | Bentonit | 0,5–0,8 | 0,6 | ~3,9 | |
| | Beton | 0,9–2,0 | 1,6 | ~1,8 | ~2,0 |
| | Eis (~10 °C) | 2,32 | | 1,87 | 0,919 |
| | Kunststoff (PE) | 0,39 | | | |
| | Luft (0–20 °C) | 0,02 | | 0,0012 | 0,0012 |
| | Stahl | 60 | | 3,12 | 7,8 |
| | Wasser (+10 °C) | 0,59 | | 4,15 | 0,999 |

²³ Quelle: ASCHAUER, J.: Auswertung der Betriebsdaten von Erdwärmesonden und Ableitung des Wärmeleitfähigkeitskatasters Oberösterreich. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62/Juni 2010. S. 88.

1.2 Unterscheidung und Einteilung von Geothermiequellen

Grundsätzlich wird die geothermische Nutzung von Erdwärme in zwei Fachgebiete unterteilt. Zum einen wird von der Tiefengeothermie und zum anderen von der Oberflächennahen Geothermie gesprochen. Im Zusammenhang mit der Tiefe wird hier im Folgenden der Begriff der Teufe verwendet. Dies ist ein Begriff aus dem Bergbau und gibt an, wie tief sich ein gewisser Punkt unter der Erdoberfläche befindet. Die in Österreich verstandene Abgrenzung zwischen Oberflächennaher- und Tiefengeothermie wird entgegen anderweitiger Auffassung (in Deutschland durch die VDI 4640 – Thermische Nutzung des Untergrunds sowie nach behördlicher Festlegung in der Schweiz) nicht bei 400 m Tiefe gezogen.²⁴ Gemäß des österreichischen Wasserrechtsgesetzes (BGBI. I Nr. 54/2014) sind Anlagen zur Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefsonden) bewilligungsfrei, sofern sie nicht eine Tiefe von 300 m überschreiten und des Weiteren gewisse Grundwasserzustände als Ausschlussgrund vorhanden sind. Das bedeutet, dass die Grenze für die Oberflächennahe Geothermie **in Österreich bei 300 m** liegt.²⁵ Somit kann abschließend festgestellt werden, dass bezüglich dieser Grenztiefe kein einheitliches staatenübergreifendes Verständnis besteht.

1.2.1 Oberflächennahe Geothermie

Wie bereits erläutert, nutzt die Oberflächennahe Geothermie in Österreich die Energie des Untergrunds mit Teufen bis etwa 300 m und Temperaturen von bis zu etwa 19 °C²⁶. Dabei kann diese Technik nahezu überall angewendet werden, zumal für den häuslichen Gebrauch lediglich Tiefen bis zu 100 m üblich sind. Dementgegen ist die Tiefengeothermie an gewisse geologische Anforderungen gebunden, die nicht an jedem Standort realisierbar sind. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal stellt die Art der Nutzung der Erdwärme dar. Die Oberflächennahe Geothermie kann die Wärme nicht oder nur selten direkt nutzen. Es muss eine **Wärmepumpe** verwendet werden, um das Temperaturniveau zu steigern und zum Heizen zu verwenden. Hingegen nutzt die Tiefengeothermie die gewonnene Wärme aus der Tiefe direkt zum Heizen bzw. für weitere thermodynamische Prozesse wie etwa die Stromproduktion.²⁷

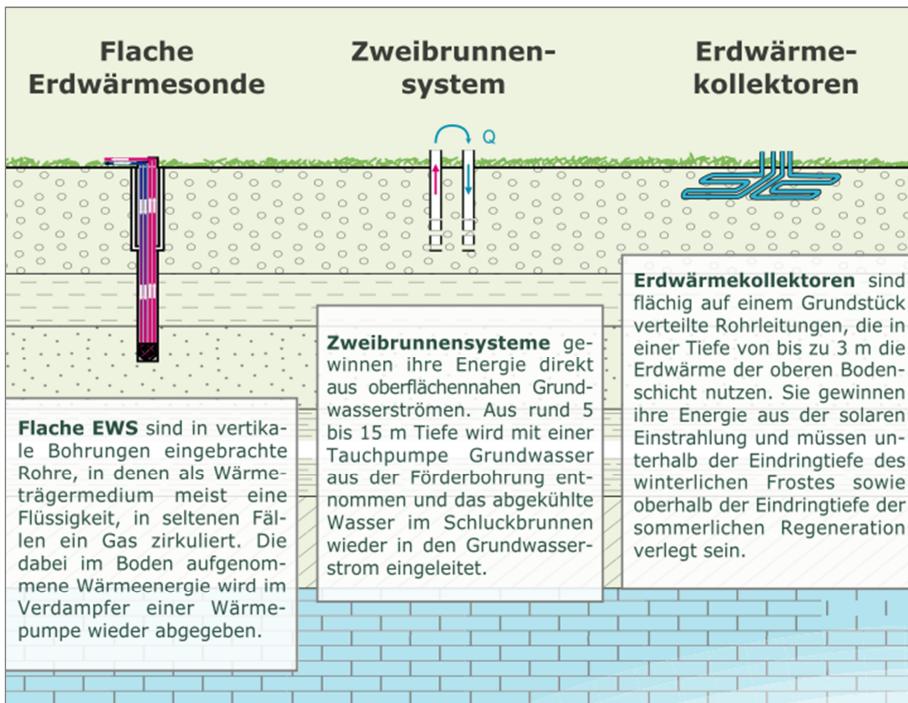
Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht und beschreibt die wichtigsten oberflächennahen geothermischen Systemauslegungen.

²⁴ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 31.

²⁵ Vgl. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, U. u.: Wasserrechtsgesetz (WRG). S. 30.

²⁶ Vgl. SASS, I. et al.: Leitfaden Erdwärme - Tipps für Hausbesitzer und Bauherren; 12. Auflage. S. 3.

²⁷ SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 31.

Abbildung 1.8: Verfahren der Oberflächennahen Geothermie²⁸

Die hier in der Grafik aufgezeigten Systeme stellen die wesentlichen drei Nutzungsarten der Oberflächennahen Geothermie für den häuslichen Gebrauch dar. Bei der ersten Auslegungsform, den Erdwärmesonden (links in der Abbildung), werden vertikal geführte Rohrleitungen in ein Bohrloch bis zu einer Tiefe von üblicherweise 70 bis 100 m eingebracht und der Ringraum mit einer Suspension verpresst, um die Bohrung unter anderem abzudichten sowie die Wärmeübertragung vom Untergrund zu dem in den Sondenrohren befindlichen Wärmeträgermedium zu gewährleisten. Hingegen nutzen Brunnenanlagen (in der Mitte der Abbildung) das energetische Potenzial des Grundwassers, indem sie aus einem Entnahmestollen Wasser entnehmen und diese gespeicherte Energie nutzen. Anschließend wird das abgekühlte Grundwasser in einem Schluckbrunnen wieder dem Untergrund zugeführt. Die dritte Form, die Erdwärmekollektoren (rechts in der Abbildung), nutzen die Energie des Untergrunds ebenfalls wie Sondensysteme durch im Untergrund verlegte Rohrleitungen. Allerdings werden diese Kollektorrohre nicht vertikal eingebracht, sondern horizontal großflächig in einer Tiefe von in der Regel 1 bis 2 m verlegt.

²⁸ Quelle: STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. S. 37.

1.2.2 Tiefe Geothermie

Die Tiefengeothermie bezeichnet Teufen über 400 m (Österreich bis 300 m) und nutzt die radioaktive Wärmeenergie sowie die Ursprungswärme des Untergrundes. Verwendet werden diese Systeme zur Wärmennutzung als auch zur Stromproduktion. Deren Lagerstätten sind einerseits durch heiße, überwiegend trockene Gesteine (petrothermale Systeme) und andererseits durch heiße, tiefliegende Grundwasserleiter (hydrothermale Systeme) gekennzeichnet.²⁹

Die wichtigsten Verfahren bei der Nutzung der Tiefengeothermie bilden das Enhanced Geothermal System (EGS bzw. auch Hot-Dry-Rock Verfahren genannt), die hydrothermale Dublette, die Tiefensonden sowie für die Stromerzeugung das ORC-Verfahren (Organic Rankine Cycle) als auch das Kalina-Verfahren.³⁰ Diese Systeme sind hier nur der Vollständigkeit halber aufgezählt, bilden jedoch keinen Schwerpunkt dieser Arbeit. Die unten angeführte Tabelle gibt einen Überblick über die verschiedenen Systeme im Zusammenhang mit den verwendeten Verfahren und ihrer Nutzung.

Tabelle 1.2: Überblick über Systeme, Verfahren und Nutzung der Tiefengeothermie³¹

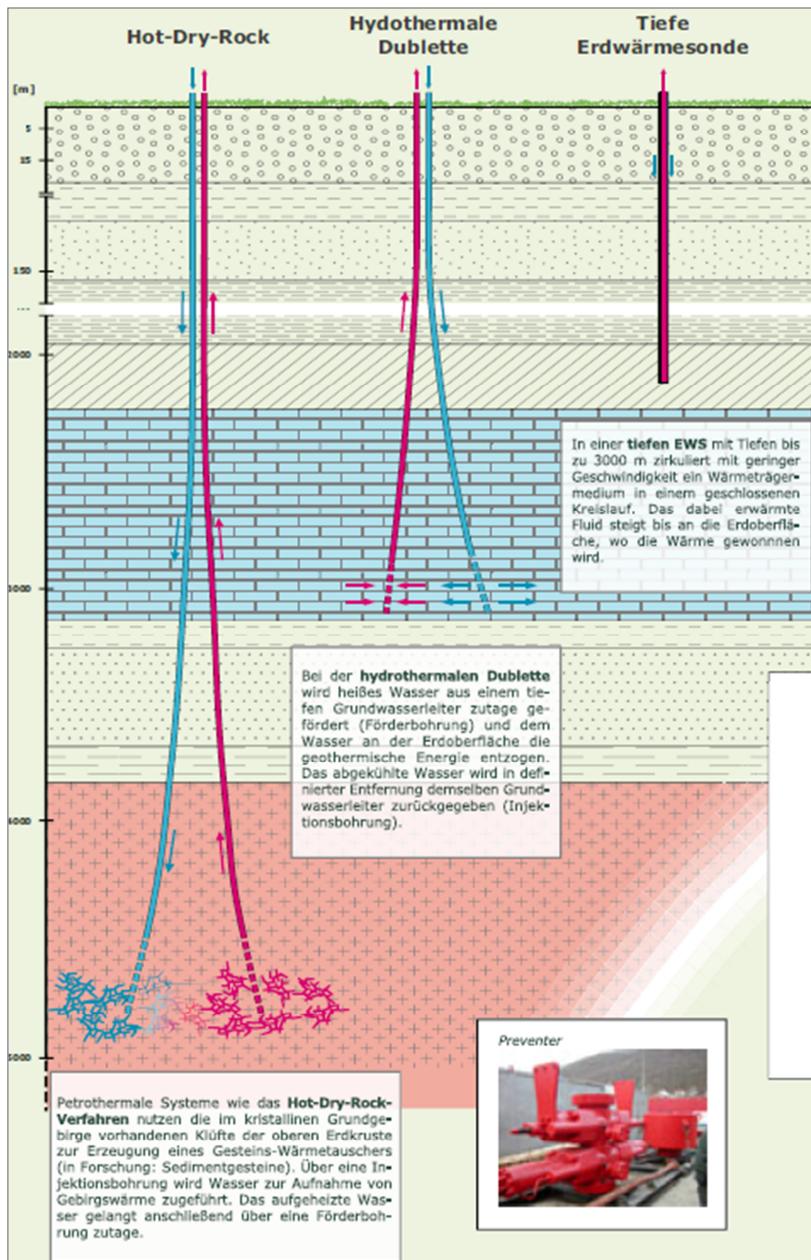
| System: | Untergrund: | Verfahren & Nutzung: |
|-------------------------------------|--|---|
| Petrothermale Systeme | Gestein, Magma | Hot-Dry-Rock Verf.; Wärmennutzung |
| Hydrothermale Systeme (>150°C) | Hochdruckwasserzone Dampfsysteme Heißwassersysteme | Dublette; Wärmennutzung & Stromerzeugung |
| Hydrogeothermische Systeme (<150°C) | Aquifere Thermalwasser | Stromerzeugung (>100°C), dir. Nutzung |

Abschließend erfolgt eine Veranschaulichung der wichtigsten Verfahren aus der Tiefengeothermie anhand der nachfolgenden Abbildung. Aufgrund der Schwerpunktsetzung im Bereich der Oberflächennahen Geothermie wird hier jedoch auf eine weitere Beschreibung der Verfahren aus diesem Themengebiet verzichtet.

²⁹ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 31.

³⁰ Vgl. STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. S. 46 und 47 sowie 172.

³¹ Vgl. GOLDBRUNNER, J.: Vorlesungsfolien Geothermie. S. 2. (Einführung)

Abbildung 1.9: Verfahren der Tiefengeothermie³²³² Quelle: STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. S. 37.

1.3 Potenzial der Erdwärme

Rein theoretisch betrachtet ist die im Untergrund gespeicherte Energie der Erde nahezu unerschöpflich. Denn unser Planet ist ein gigantischer Wärmespeicher.³³

Addiert man die Ursprungswärme, die Wärme aus der Erdentstehung als auch die radioaktive Wärme, so errechnet sich eine Gesamtwärme der Erde zwischen **12 und 24 * 10³⁰ J**. Von dieser Energiemenge befinden sich in der äußeren Erdkruste (bis rund 10 km Tiefe) **etwa 12 bis 24 * 10²⁶ J**, woraus sich ein resultierender Wärmestrom von **65 mW/m²** für die kontinentale und **101 mW/m²** für die ozeanische Kruste ergibt.³⁴

Betrachtet man die Tatsache, dass 99 % der Materie unseres Planeten heißer als 1000 °C und von den restlichen 1 % immer noch ca. 90 % heißer als 100 °C ist, erkennt man dieses riesige Potenzial. „Es wird geschätzt, dass allein die Wärmeverkommenden in den leicht zugänglichen oberen Erdschichten von bis zu 3 km ausreichen würden, um den Energiebedarf für die nächsten 100.000 Jahre zu decken.“³⁵

1.3.1 Weltweiter Ausblick

Weltweit ist ein Anstieg der Nutzung von Erdwärme zu erkennen, sowohl bei der Wärmeerzeugung als auch bei der Stromproduktion. 1985 wurde die Wärme des Untergrunds in 24 Ländern direkt genutzt, 2005 bereits in 59 Ländern. Des Weiteren hat sich die weltweit installierte Menge von Wärmepumpenanlagen, also Anlagen, die oberflächennahe Potenziale abrufen, im Zeitraum von 2000 bis 2005 verdreifacht. Bei der Nutzung von Erdwärme (durch Oberflächennahe- und Tiefengeothermie) für Heizzwecke weisen die USA und China außereuropäisch die höchsten Leistungszahlen auf. Innerhalb Europas werden die größten Produktionsraten von Schweden, Island, der Türkei und von Dänemark erzielt. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die weltweite Entwicklung der Wärme- und Stromerzeugung.³⁶

³³ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 9.

³⁴ Vgl. GOLDBRUNNER, J.: Vorlesungsfolien Geothermie. S. , S.6.

³⁵ <http://www.energie-wissen.at/geothermie/index.php>. Datum des Zugriffs: 30.März.2015.

³⁶ Vgl. OCHMANN, N.; CRAMER, B.; REMPEL, H.: Studie_Energierohstoffe 2009 - Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit. S. 177 bis 186.

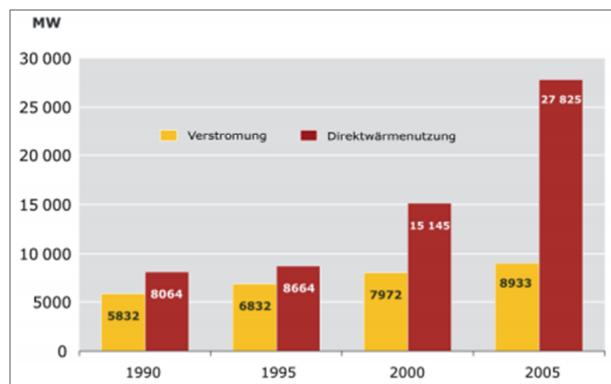


Abbildung 1.10: Weltweite Entwicklung der Wärme- und Stromproduktion durch die Geothermie³⁷

1.3.2 Der österreichische Wärmepumpenmarkt

Wärmepumpenanlagen stellen einen wichtigen Baustein dar, um konventionelle Energieträger wie etwa Öl und Gas, vor allem für die dezentrale Wärmebereitstellung zu verdrängen. Dabei ist die Entwicklung des Wärmepumpenmarktes unter anderem auch von der Preissteigerung der Energieträger abhängig, welche in weiterer Folge die Heizkosten beeinflussen. Um diese Preisentwicklungen zu verdeutlichen, kann die folgende Abbildung herangezogen werden.

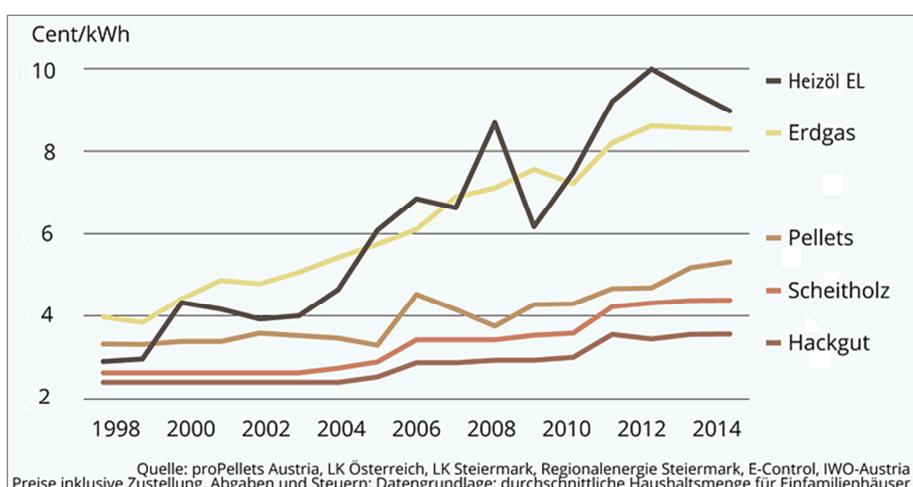


Abbildung 1.11: Preisentwicklung der Energieträger für Haushalte von 1998 bis 2014³⁸

³⁷ Quelle: OCHMANN, N.; CRAMER, B.; REMPEL, H.: Studie_Energierohstoffe 2009 - Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit. S. 184.

³⁸ Quelle: <http://www.waermeausholz.at/guenstig/kosten-und-amortisation/>.

Wie aus der Grafik hervorgeht, unterlagen alle hier angeführten Energieträger teils beträchtlichen Preissteigerungen. Öl wies demnach von 1998 bis 2014 eine Steigerung von ca. 200 % auf, wodurch es zu sehr hohen Heizkosten kam. Bedingt durch diese Entwicklung erfuhr die Nutzung von Wärmepumpenanlagen in den Jahren von 2000 bis 2008 mit 25,7 % jährlichem Wachstum eine enorme Steigerung. Wurden im Jahr 2000 noch in etwa 5000 Wärmepumpen verkauft, waren es 2008 bereits knapp unter 19.000 Anlagen. Dabei ist diese Steigerung vor allem auf den Zuwachs im Bereich der Heizungswärmepumpen bis 20 kW Leistung zurückzuführen. Die nachfolgende Grafik veranschaulicht die Verkaufszahlen von Wärmepumpenanlagen am österreichischen Inlandsmarkt von 1976 bis 2014.³⁹

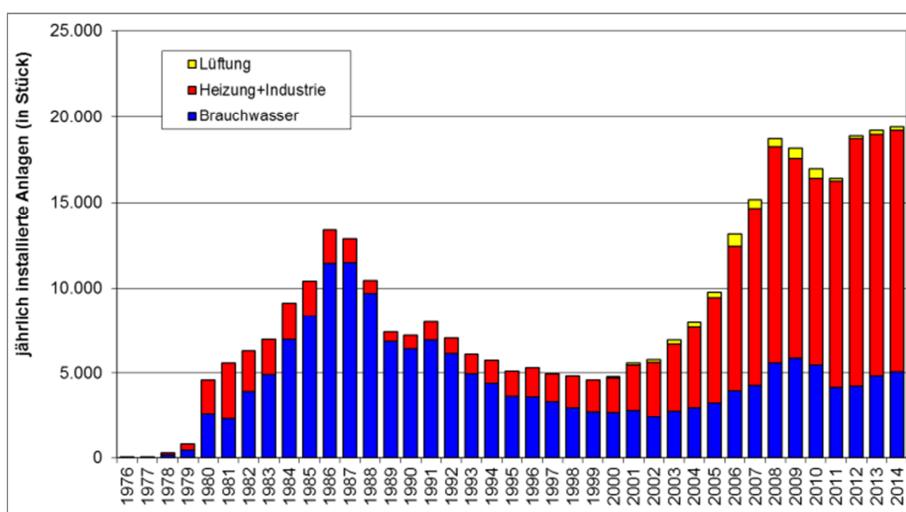


Abbildung 1.12: Verkaufte Wärmepumpen für den österreichischen Inlandsmarkt⁴⁰

Aufgrund der Ölpreiskrisen und den damit verbundenen Preiserhöhungen in den 1970er Jahren, konnte sich die Wärmepumpentechnologie zunächst sehr rasch entwickeln. In weiterer Folge kam es durch fallende Ölpreise und mangelhaftes Qualitätsmanagement zu sinkenden Verkaufszahlen, wobei sich dieser Trend ab dem Jahr 2000 umkehrte und erneut eine beträchtliche Wachstumsphase einsetzte. 2008 kam es, bedingt durch die Finanzkrise, erneut zu einer rückläufigen Entwicklung. Allerdings konnten Heizungswärmepumpen bereits 2011 neue Zuwächse verzeichnen. Die Hintergründe der insgesamt steigenden Wärme-

³⁹ Vgl. BIERMAYR, P. et al.: Innovative Energietechnologien in Österreich - Marktentwicklung 2014 (Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen). Berichte aus Energie- und Umweltforschung. S. 157 und 158.

⁴⁰ Quelle: BIERMAYR, P. et al.: Innovative Energietechnologien in Österreich - Marktentwicklung 2014 (Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen). Berichte aus Energie- und Umweltforschung. S. 157.

pumpenverkaufszahlen können dabei im Wesentlichen auf die Weiterentwicklung der Technologie, die Qualitätssicherung sowie auf die energetische Verbesserung von Gebäuden (geringer Heizwärmebedarf mit niedrigen Vorlauftemperaturen des Heizsystems) zurückgeführt werden. Um nun den Bezug zur Oberflächennahen Geothermie herstellen zu können, ist zunächst die Betrachtung der österreichischen Marktanteile notwendig. Dabei zählen zu den oberflächennahen Systemen die Sole-Wasser und Wasser-Wasser-Wärmepumpe als auch die Direktverdampfersysteme. Die Luft-Luft- als auch die Luft-Wasser-Wärmepumpen nutzen, wie der Name bereits andeutet, das Medium Luft, weshalb sie nicht dieser Kategorie zugeordnet werden können (siehe unten angeführte Abbildung).⁴¹

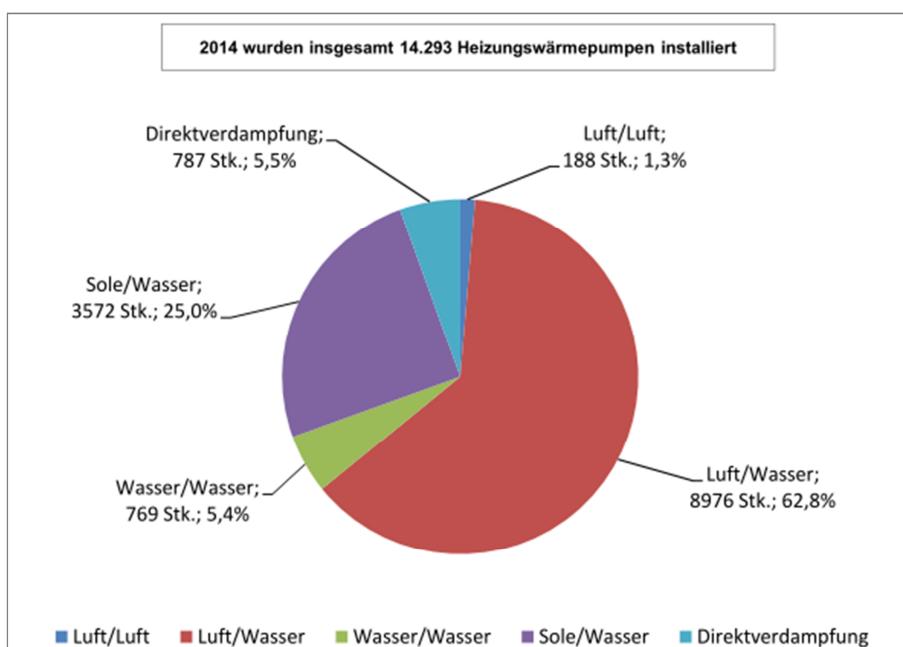


Abbildung 1.13: Österreichische Inlands-Marktanteile von Heizungswärmepumpen anhand ihrer Wärmequelle⁴²

Mit rund 63 % stellt die Luft-Wasser Wärmepumpe den größten Anteil an verkauften Systemen dar. Im Jahr 2011 traten hinsichtlich der Verkaufszahlen erstmals Luft-Wasser Systeme an die erste Stelle. Diesbezüglich ist anhand der verkauften Wärmepumpentypen ein deutlicher Trend in Richtung der Luft-Wasser-Technik zu erkennen, wodurch in den kom-

⁴¹ Vgl. BIERMAYR, P. et al.: Innovative Energietechnologien in Österreich - Marktentwicklung 2014 (Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen). Berichte aus Energie- und Umweltforschung. S. 157 und 158.

⁴² Quelle: Vgl. BIERMAYR, P. et al.: Innovative Energietechnologien in Österreich - Marktentwicklung 2014 (Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen). Berichte aus Energie- und Umweltforschung. S. 168.

menden Jahren fast ausschließlich Sole-Wasser Anlagen verdrängt werden. Als Grund dafür gelten die geringeren Investitionskosten sowie die Tatsache, dass die Wärmequelle Luft im Vergleich zu anderen Systemen (Erdwärmesonden bzw. Grundwasserbrunnen) in der Regel einfacher zu erschließen ist. Im Hinblick auf die Wärmepumpentechnologie ist diese Entwicklung jedoch auch kritisch zu bewerten. Denn die Nutzung von Luft als Wärmequelle ist systembedingt mit einer geringeren Anlageneffizienz verbunden, da dieses Medium am kältesten ist, wenn die meiste Energie zum Heizen benötigt wird. Somit besteht vor allem bei einer ungeeigneten Anlagenkonfiguration die Gefahr einer Nutzerunzufriedenheit durch unterschätzte Betriebskosten.⁴³

1.4 Vor- und Nachteile der Oberflächennahen Geothermie

Die jeweiligen Vor- und Nachteile einer Oberflächennahen Geothermieranlage (Kollektoren, Sonden, etc.) variieren je nach gewähltem System. Sie werden auch durch standortbezogene Faktoren beeinflusst und sind deshalb nicht immer allgemein gültig. Im Kapitel 2 wird auf diese Systemabhängigkeiten näher eingegangen. Dieser Abschnitt soll jedoch einen umfassenden Überblick über die wichtigsten Vor- und Nachteile ermöglichen.

Vorteile

- Regenerative, rohstoffunabhängige Energiequelle
-> gute CO₂-Bilanz
- Ein Großteil der Energie steht kostenlos im Untergrund zur Verfügung
- Komplette Abdeckung möglich
-> Einsetzbar zum Heizen, Kühlen und zur Warmwasseraufbereitung
- Kostengünstiger Betrieb
-> günstiger als konventionelle Heizanlagen
- Keine Lagerräume für Heizstoffe nötig
- Sicherer, wartungsarmer Betrieb
-> Entfall von Wartungskosten für z.B. den Kamin
- Lange Lebensdauer

⁴³ Vgl. BIERMAYR, P. et al.: Innovative Energietechnologien in Österreich - Marktentwicklung 2014 (Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen). Berichte aus Energie- und Umweltforschung. S. 140 bis 142.

Nachteile

- Teils teurere Anschaffungskosten im Vergleich zu konventionellen Heizanlagen
- Eventuelle Bohrungen sowie Erdarbeiten sind in Bezug auf die Platzverhältnisse und ihren Kosten zu berücksichtigen
- Wärmepumpe benötigt Strom
- Der Wärmeentzug ist abhängig von den geologischen Verhältnissen
- Umstellung von Heizanlagen alter Bauten mit schlechten Heizwärmebedarf ist zu hinterfragen⁴⁴

1.5 Die Energiebilanz der Heizsysteme im Vergleich

Die Energiebilanz eines Systems gibt Auskunft über den Verbrauch der verwendeten Energieträger wie beispielsweise Öl, Kohle, Gas, Holz. Dabei ist diese ebenfalls von dem Anteil der zusätzlich benötigten Energie (Strom) abhängig. Je geringer dieser zusätzliche Bedarf eines Systems ausfällt, desto besser ist die energetische Bilanz. Im Vergleich zu konventionellen Heizanlagen wie Öl- und Gas-Systemen, sind Wärmepumpenanlagen zur Erdwärmennutzung durch einen deutlich niedrigeren nicht-regenerativen Primärenergiebedarf sowie durch geringere CO₂-Emissionen gekennzeichnet. Diesbezüglich weisen Pelletanlagen gegenüber der Nutzung von Erdwärme zwar Vorteile auf, da ihr Bedarf aus nicht-regenerativer Primärenergie als auch der CO₂-Ausstoß niedriger ausfallen. Blendet man allerdings die lokale regenerative zur Verfügung stehende Energiemenge (z.B. Solarstrahlung, Umwelt- und Erdwärme) der Wärmepumpentechnik aus, so benötigt ein Pellet-Kessel im Jahr 2030 etwa das 3,3-fache an primärer Energie. Dies stellt im Hinblick auf ein begrenztes Rohstoffpotenzial von Pelletanlagen einen entscheidenden Faktor dar. Das Einsparungspotential von nicht-regenerativer Primärenergie eines Neubaus (2011) gegenüber einem Gas-/Öl-Brennwertgerät inkl. solarer Trinkwasseraufbereitung liegt beispielsweise bei 30 bis 43 %. Dementsprechend ergeben sich daraus CO₂-Reduktionen zwischen 14 und 45 %. Abschließend ist hier festzuhalten, dass Wärmepumpenanlagen zur Nutzung von Erdwärme im Vergleich zu öl- und erdgasbefeuerten Anlagen einen deutlichen Vorteil hinsichtlich der Beanspruchung von nicht-regenerativen Energieressourcen aufwei-

⁴⁴ Vgl. SABEL, M.: Leitfaden Erdwärme - Grundlagenwissen und Praxistipps; 2. Auflage. S. 2 bis 21.

sen. Pellet-Heizsysteme weisen diesbezüglich zwar den geringsten Verbrauch auf, jedoch sind sie aufgrund der Nutzung von Holz aber der größte Verbraucher von Primärenergie.⁴⁵

Des Weiteren ist hier anzumerken, dass für Wärmepumpensysteme Jahresarbeitszahlen von > 3,5 als Voraussetzung für eine effiziente und energetisch sinnvolle Nutzung gelten. Dieser Kennwert beschreibt dabei das Verhältnis der jährlich gelieferten Wärme zu jährlich aufgenommener elektrischer Energie einer Wärmepumpe.⁴⁶

⁴⁵ Vgl. HEILEK, C.; KÜHNE, M.; TZSCHEUTSCHLER, P.: Energiewirtschaftliche Bewertung der Wärmepumpe in der Gebäudeheizung. S. 4 bis 34.

⁴⁶ <http://www.energiestiftung.ch/energiethemen/erneuerbareenergien/umweltwaerme/waermepumpe/>. Datum des Zugriffs: 20.April.2015

2 Oberflächennahe Geothermie Systeme

Zur Nutzung der oberflächennahen Erdwärme stehen eine Reihe von Anlagentypen zur Auswahl. Welche Anlage dabei zur Ausführung kommt ist einerseits von rechtlichen und technischen Parametern sowie von den jeweiligen Standortbedingungen abhängig.

Das folgende Kapitel soll einen umfassenden Überblick über die wichtigsten Systeme zur oberflächennahen Erdwärmeverwendung bieten.

2.1 Wesentliche Elemente einer Oberflächennahen Geothermie-Anlage

Um das Potential der Erdwärme aus solarer sowie terrestrischer Strahlung nutzen zu können, benötigt man ein System, welches die im Untergrund gespeicherte Energie aus dem Erdreich bzw. dem Grundwasser aufnimmt und weitertransportiert. Ein solches **Absorptionssystem** nimmt durch Konduktions- und/oder Konvektionsprozesse Energie aus dem Erdreich auf und gibt sie in weiterer Folge an das Heizsystem ab. Dabei fließt innerhalb eines Erdwärme-Absorptionssystems (Erdwärmequelle bzw. Flächenkollektoren) zur Energieaufnahme ein flüssiges Wärmeträgermedium, welches als „Sole“ bezeichnet wird. Da aber die aufgenommen Temperaturen des oberflächennahen Erdreichs für eine direkte energetische Nutzung zu gering sind, wird zur Anhebung der aus dem Untergrund geförderten Energiemenge eine **Wärmepumpe** zwischen Absorptions- und Heizkreislauf zwischengeschaltet. Diese bildet das Herzstück der Anlage und vollzieht den Temperaturhub auf eines zum Heizen erforderliches Temperaturniveau. Dadurch werden in weiterer Folge das **Heizsystem** (Fußbodenheizung bzw. großflächige Wärmeüberträger inkl. Pufferspeicher) sowie der für die Warmwasseraufbereitung erforderliche **Speicher** mit Wärme gespeist.⁴⁷

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht dabei die wichtigsten hier beschriebenen Elemente anhand einer schematisierten Darstellung.

⁴⁷ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 45.

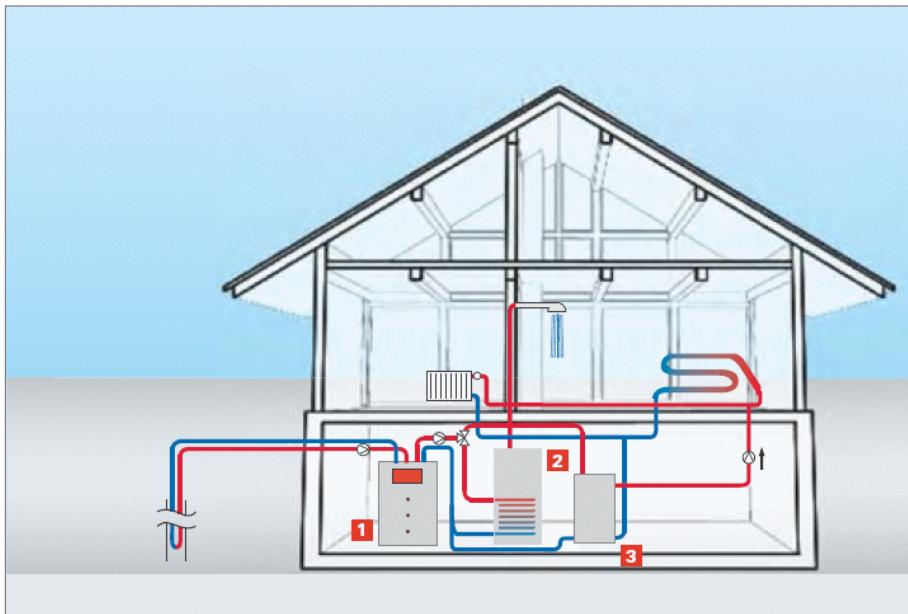


Abbildung 2.1: Wesentliche Elemente einer Geothermieanlage⁴⁸

Als Absorptionssystem wird in dieser Grafik eine Erdwärmesonde dargestellt, wobei die Heizenergie sowohl durch Flächenkollektoren als auch durch eine Grundwasser-Brunnenanlage bzw. eine Luft-Wärmepumpenanlage generiert werden kann. Die weiteren Heizanlagenkomponenten bestehen aus der:

- Wärmepumpe (Punkt 1 der Abbildung)
- dem Warmwasserspeicher (Punkt 2 der Abbildung) sowie
- aus dem Pufferspeicher (Punkt 3 der Abbildung)
- Heizkreislauf (idealer Weise mit Fußbodenheizung)

2.2 Wärmepumpenanlagen

Wie bereits oben angeführt ist die Wärmepumpe für den Temperaturhub verantwortlich. Mit ihrer Hilfe kann die aus dem Erdreich gewonnene Energie von maximal 12 °C in 100 m Tiefe auf ein Niveau von etwa **35 bis 55 °C im Vorlauf** des Heizsystems angehoben werden. Dabei nimmt die Wärmepumpe unabhängig von der Witterung und der Jahreszeit die gespeicherte Erdwärme auf, die ebenfalls im Bereich knapp unterhalb des Gefrierpunkts liegen kann. Nach dem Temperaturhub erfolgt schließ-

⁴⁸ Quelle: <http://schmidhaustechnik.ch/wp/home-2/heizung/waermepumpen/>.

lich die Abgabe der Wärme an das Heizsystem (inkl. gewonnener elektrischer Antriebsenergie). Damit die Wärmepumpe diesen Temperaturunterschied allerdings überwinden kann, benötigt sie zusätzlich einen Anteil aus Fremdenergie.⁴⁹ Dabei kann man in etwa von einer Verteilung von **25 % zu 75 %** ausgehen. Das bedeutet, dass ca. drei Viertel der benötigten Heizenergie vom Untergrund, quasi frei zur Verfügung gestellt wird und ungefähr ein Viertel extern, in Form von Strom beigestellt werden muss.⁵⁰

2.2.1 Funktionsweise und Eigenschaften von Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe arbeitet nach dem Prinzip des geschlossenen Kreisprozesses, wie es vereinfacht ausgedrückt auch bei Kühlschränken der Fall ist. In diesem Kreislauf befindet sich ein Arbeitsmedium (Kältemittel), welches ständig einer Änderung seines Aggregatzustands (Verdampfung -> Verdichtung -> Verflüssigung -> Entspannung) unterworfen wird. Dabei verfügen diese Mittel über die **Eigenschaft bei geringen Temperaturen zu verdampfen und gleichzeitig hohe Eigenwärme zu haben**. Zur Anwendung kommen FCKW- und HFCKW-freie Stoffe⁵¹ wie Ammoniak, Wasser oder Kohlendioxid, die ungiftig, biologisch abbaubar sowie nicht brennbar sind. Bei der Anwendung solcher Anlagen ist allerdings darauf zu achten, dass die entzogene gewonnene **Vorlauftemperatur** aus dem Absorptionssystem **möglichst hoch** ist. Denn nur so kann die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizwärme möglichst gering gehalten werden, sodass der Anteil an zusätzlicher elektrischer Energie minimiert wird. Als Heizsysteme treten hier im Wesentlichen entweder Brunnenanlagen, Sondenanlagen bzw. Kollektoranlagen oder Luft-Wärmepumpenanlagen in Erscheinung. Ihre Energie schöpfen diese Systeme aus dem Grundwasser (Brunnenanlage), der Erdwärme (Sonden- und Kollektoranlagen) sowie aus der Luft (Luft-Wärmepumpenanlagen). Zu den wichtigsten Komponenten einer Wärmepumpe zählen der Verdampfer, der Kompressor bzw. Verdichter mit Antriebsmotor, der Kondensator und das Expansionsventil.⁵²

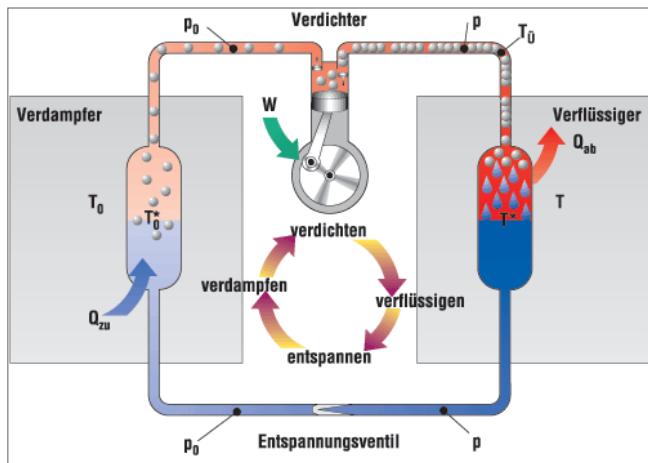
Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht den Aufbau und die Funktionsweise einer Wärmepumpe.

⁴⁹ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 45 bis 47.

⁵⁰ Vgl. SABEL, M.: Leitfaden Erdwärme - Grundlagenwissen und Praxistipps; 2. Auflage. S. 4.

⁵¹ FCKW (Fluorchlorkohlenwasserstoffe), HFCKW (teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe)

⁵² Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage. S. 9 und 10.

Abbildung 2.2: Kreisprozess einer Wärmepumpe⁵³

Die über das Absorptionssystem aufgenommene Energie Q_{zu} wird mit der Temperatur T_0 an das Arbeitsmedium des Verdampfers (Kreislauf der Wärmepumpe) abgegeben. Dabei verdampft das Arbeitsmittel, wobei die Wärme entzogen und gespeichert wird. Die Temperaturen können hier sogar Werte im Minusbereich annehmen. In weiterer Folge wird das gasförmige Medium dem Verdichter zugeführt. Hier entsteht durch die Verdichtung ein höherer Druck (p_0 auf p), wodurch ein Temperaturanstieg von T_0 auf T_0^* erreicht wird. Anschließend strömt das erwärmte Kältemittel zum Verflüssiger. Da dieser ein Wärmetauscher ist, kann somit die zugeführte Wärme an den Heizkreis des Hauses (Q_{ab}) abgegeben werden. Durch die Wärmeabgabe verflüssigt sich das Arbeitsmedium wieder. Abschließend wird das Kältemittel dem Entspannungsventil zugeführt, wodurch eine Druckabsenkung auf das Niveau des Verdampfers stattfindet (p auf p_0) und die Resttemperatur des Arbeitsmediums ebenfalls absinkt. Somit schließt sich der Kreislauf des Wärmepumpenprozesses.

2.2.2 Wichtige Kennzahlen einer Wärmepumpe

Um die Leistungsfähigkeit einer Wärmepumpe für den Betrieb sicherzustellen, ist es notwendig diese dementsprechend auszulegen und zu dimensionieren. Des Weiteren sei hier angemerkt, dass Wärmepumpen in elektrische- und primärenergetische Pumpen zu unterscheiden sind. Es soll hier jedoch nur auf die elektrische Variante eingegangen werden, da diese die größte Verbreitung aufweisen. Die folgenden Kennzahlen

⁵³ Quelle: <http://www.textor-brunnenbau.de/erdwaerme/waermepumpe/>.

dienen dabei als **Grundlage für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit** der Wärmepumpe, als auch der gesamten Anlage.

Leistungszahl (“Coefficient of Performance“- COP)

Dieser Wert beschreibt das Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung zu aufgenommener elektrischer Energie bei einem gewissen Arbeitspunkt der Wärmepumpe. Die Leistungszahl bzw. auch COP genannt trifft eine Aussage über die Effizienz der Pumpe. Je höher dieser Wert ist, desto effizienter ist der Betrieb der Wärmepumpe, wobei dieser durch den Kehrwert des Carnot-Wirkungsgrades η_c begrenzt ist.⁵⁴ Moderne Wärmepumpen erreichen in Abhängigkeit ihrer Wärmequelle (Luft, Wasser, Erdreich) bei genormten Prüfbedingungen Werte von kleiner 4 bis größer 5. Allerdings berücksichtigt der COP nicht alle Energieverbraucher wie beispielsweise die Umwälzpumpe für den Heizkreislauf sowie für die Zirkulation innerhalb des Absorptionssystems. Ein weiterer Einfluss auf die Leistungszahl entsteht durch den Betriebs- oder Arbeitspunkt einer Wärmepumpe. Als Beispiel kann etwa der COP einer Sole-Wasser Pumpe herangezogen werden. Bei einem Arbeitspunkt von S0/W35 wäre die Leistungszahl höher (z.B. COP = 5,5), als im Betriebspunkt S0/W55 (z.B. COP = 5,0). Dabei bezeichnet „S0“ die Soletemperatur bei 0 °C (wobei „S“ bzw. auch „B“ -> „brine“, engl. für Sole verwendet werden kann) und „W35“ die Temperatur des (Heizungs-) Wassers bei 35 °C beschreibt.⁵⁵

Jahresarbeitszahl β (JAZ)

Eine weitaus aussagekräftigere und praktikablere Kennzahl hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der gesamten Systemtechnik stellt die Jahresarbeitszahl dar. Sie beschreibt das Verhältnis der jährlich gelieferten Wärme zu jährlich aufgenommener elektrischer Energie (inkl. aller notwendigen elektrischen Geräte der Heizanlage). Die Jahresarbeitszahl ist ein theoretisch ermittelter Wert und kann je nach Verbraucherverhalten, Witterung und anderen Parametern von der tatsächlichen Zahl durchaus deutlich abweichen. Je nach Wärmepumpenart können die Werte im Bereich von 3,5 bis 4,5 bzw. durch Anlagenoptimierung auch höher liegen.⁵⁶

⁵⁴ SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 48.

⁵⁵ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage, S. 50 bis 52.

⁵⁶ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage, S. 60 und 61.

Ein Wert der Jahresarbeitszahl von 4,0 bedeutet beispielsweise, dass die Wärmepumpe mit Hilfe von 1 kWh elektrischer Energie -> 4 kWh thermische Energie mit einer Temperatur von 55 °C produzieren kann.⁵⁷

2.2.3 Erdgekoppelte Wärmepumpentypen und ihre Besonderheiten

Wie bereits oben angeführt, weisen die Elektro-Kompressions-Wärmepumpen den größten Anteil der am Markt befindlichen Systeme auf. Es gibt jedoch auch Pumpen, die mit Öl bzw. Gas betrieben werden können. Allerdings besitzen elektrische Varianten den Vorteil eines wartungsarmen und geräuscharmen Betriebs sowie einer hohen Lebensdauer. Aus diesem Grund wird hier nur auf diese Typen eingegangen.⁵⁸

Die folgende Tabelle auf der nächsten Seite gibt einen Überblick über die wichtigsten erdgekoppelten Wärmepumpentypen mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen.

Dabei spiegeln die hier angegebenen Jahresarbeitszahlen die Ergebnisse mehrerer Feldstudien wieder und dienen als Richtwerte.⁵⁹

⁵⁷ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 48.

⁵⁸ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 51.

⁵⁹ Vgl. <http://www.jahresarbeitszahlen.info/index.php/theorie-und-praxis/feldstudien-und-ergebnisse>. Datum des Zugriffs: 16.August.2015.

Tabelle 2.1: Überblick über die Wärmepumpentypen der oberflächennahen Erdwärmesysteme⁶⁰

| Typ: | Vorteile: | Nachteile: | JAZ: |
|--|--|--|-----------|
| Wasser-Wasser | Kostensparnis durch Entfall v. Sonden | Eisen- u. manganhältige- sowie stark aggressive Wässer sind ungeeignet. | 3,8 - 6,4 |
| | Wirkungsgrad um etwa 20% höher als bei Sole-Wasser | | |
| | Beste Voraussetzungen zum Heizen und Kühlen | | |
| | Optimal für freie Kühlung | | |
| Sole-Wasser mit Sonden | Keine Verrockerung u. Vereisung mögl., daher größte Betriebssicherheit | Höhere Herstellungskosten durch Sonden | 3,5 - 5,2 |
| | Gute Voraussetzungen zum Heizen und Kühlen | Geringerer Wirkungsgrad als Wasser-Wasser Wärmepumpe | |
| | Extrem lange Lebensdauer | | |
| | Geringer Platzbedarf | | |
| Sole-Wasser mit Kollektoren | Kostensparnis durch Entfall v. Sonden | Keine freie Kühlung möglich | - |
| | Guter Wirkungsgrad zum Heizen | Geringerer Wirkungsgrad als Wasser-Wasser Wärmepumpe | |
| | Sehr hohe Betriebssicherheit | | |
| | Extrem lange Lebensdauer | | |
| Sole-Wasser mit CO₂-Sonden | Sehr hoher Wirkungsgrad | Sehr hohe Materialkosten für Sonden/ Kollektoren sowie für das Kältemittel | - |
| | Keine Verrockerung u. Vereisung mögl., daher größte Betriebssicherheit | Geringerer Wirkungsgrad als Wasser-Wasser Wärmepumpe | |
| | Extrem lange Lebensdauer der Wärmequelle | Keine freie Kühlung möglich | |
| | Geringerer Platzbedarf als Kollektoren | | |
| Wärmepumpe mit Direkt-verdampfer | Besserer Wirkungsgrad als Sole-Wasser Wärmepumpe | Sehr hohe Materialkosten für Sonden/ Kollektoren sowie für das Kältemittel | 4,3 - 5,5 |
| | Hohe Betriebssicherheit | Geringerer Wirkungsgrad als Wasser-Wasser Wärmepumpe | |
| | Lange Lebensdauer | Keine freie Kühlung möglich | |

⁶⁰ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage, S. 23 bis 28 und 137.

2.2.4 Vorlauftemperatur einer Wärmepumpe

Die Vorlauftemperatur, also jene Temperatur, die dem Heizkreislauf zugeführt wird, stellt ein wichtiges Kriterium für die korrekte Auslegung einer Heizanlage dar. Nach ihr richtet sich die Art des Wärmepumpeneinsatzes. Man unterscheidet zwischen Nieder-, Mittel- und Hochtemperatur-Wärmepumpen.

Die **Niedertemperatur-Wärmepumpe** kommt bei Heizanlagen zum Einsatz, deren Räume eine maximale Vorlauftemperatur von bis zu 55 °C benötigen, wie es bei Fußbodenheizungen der Fall ist. Aufgrund der Anforderungen an den Heizwärmebedarf beim **Neubau** von Wohngebäuden nach OIB-Richtlinie 6⁶¹ wird diese Technik überwiegend eingesetzt.

Bei energetisch teilsanierten Wohnbauten mittels Wärmedämmung oder bei Teilaustausch vorhandener Radiatoren werden **Mitteltemperatur-Wärmepumpen** mit einer Vorlauftemperatur von 55 °C bis maximal 65 °C vorgesehen. Dies ist der Fall, wenn fast alle Räume diese Temperatur benötigen.

Hochtemperatur-Wärmepumpen werden bei Vorlauftemperaturen von 65 bis 75 °C eingesetzt. Diese Art kommt zum Einsatz, wenn alle Räume eine gleich hohe Temperatur aufweisen sollen und deren energetische Gebäudesanierung nur mit großem Aufwand durchgeführt werden könnte oder bereits vorhandene Radiatoren weiter zu nutzen sind.⁶²

2.2.5 Betriebsarten und Betriebsvarianten erdgekoppelter Wärmepumpen

Wärmepumpen können aufgrund ihrer unterschiedlichen Betriebsart in eine monovalente-, monoenergetische- und bivalente Arbeitsweise eingeteilt werden. Im Folgenden wird jedoch nur auf die monoenergetische Art des Betriebs eingegangen, da alle anderen Arten den Einsatz einer Zusatzheizung mittels Strom, Öl und Gas vorsehen. Dies wäre aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht jedoch zu hinterfragen und spielt deshalb in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle.

Die **monovalente Nutzung** der Wärmepumpe deckt den Wärmebedarf eines Gebäudes vollständig über das gesamte Jahr ab und ist immer zu bevorzugen. Dabei kann auch die Warmwasseraufbereitung berücksichtigt werden. Der Einsatz dieser Betriebsart wird üblicherweise bei Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen angewendet. Prinzipiell sind auch Luft-Wasser-Pumpen für diese Arbeitsweise möglich, worauf hier jedoch nicht näher eingegangen wird. Die monovalente Betriebsart

⁶¹ Vgl. ÖSTERREICHISCHE INSTITUT FÜR BAUTECHNIK: OIB-Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz. S. 3 bis 13.

⁶² Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 51 und 52.

ist für alle Niedertemperatur-Heizanlagen mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 65 °C geeignet.

Betriebsvarianten

Geothermische Energie kann grundsätzlich in zwei Varianten der Nutzung unterschieden werden – Energieentnahme sowie Energieeinspeicherung. Diese Entnahmen- bzw. Einspeicherungsprozesse führen dabei zu einer Störung des Wärmesystems im Untergrund. Folge dessen müssen die entstehenden Wärmedefizite bzw. Wärmeüberschüsse durch Heizen und/oder Kühlen wieder ausgeglichen werden. Die nachfolgend angeführten Betriebsvarianten sollen diese Prozesse näher erläutern.

- **Heizen:** Aufgrund des reinen Energieentzugs muss die Regeneration des Untergrunds durch den Wärmetransport aus der Umgebung ausgeglichen werden. Passiv- und Niedertemperatur-Wohnbauten mit niedrigem Heizwärmebedarf wirken dem Wärmebedarf der natürlichen Regeneration bei optimaler Anlagenauslegung nicht entgegen.
- **Heizen und Kühlen:** Eine Wärmepumpe kann neben dem Heizbetrieb ebenfalls zum Kühlen der Wohnräume verwendet werden. Dies kann über zwei Möglichkeiten geschehen.⁶³

Bei der ersten Variante wird die Wärmepumpe reversibel betrieben. Man spricht hier von einer „**aktiven/direkten Kühlung**“ bzw. einem „**reversiblen Kühlbetrieb**“. Die zweite Möglichkeit nutzt die Besonderheit der Wärmepumpe aus. Sie besteht aus einer warmen- und einer kalten Seite. Während die warme Seite zum Heizen genutzt wird, kann die kalte Seite direkt zum Kühlen verwendet werden (ohne dass die Wärmepumpe laufen muss). In diesem Fall spricht man von „**freier- bzw. passiver/indirekter Kühlung**“.⁶⁴

- **Saisonale Energiespeicherung:** Es besteht die Möglichkeit, Wärme oder Kälte im oberflächennahen Bereich des Erdreichs oder dem Grundwasser einzulagern. Für die Anwendung können hier sowohl offene (Brunnenanlagen) als geschlossene Systeme (Sonden, Pfähle) verwendet werden. Die Speicherung der Energie kann dabei in Niedertemperatur- (0 bis 40 °C) und Hochtemperaturspeicher (> 40 °C mit z.T. mehreren 100 einzelnen Sonden) erfolgen und in weiterer Folge durch die Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen verwendet werden. Aus wirtschaftlichen

⁶³ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 52 bis 55.

⁶⁴ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage. S. 32.

Gründen ist diese Betriebsvariante für kleine häusliche Einzelanlagen allerdings nicht geeignet.

- **Direkte Nutzung:** Wie oben bereits angeführt, kann die gespeicherte Energie des Erdreiches auch ohne Wärmepumpe genutzt werden. Das Prinzip der direkten Nutzung kommt sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen zur Anwendung. Der direkte Heizbetrieb wird etwa beim Enteisen von Brücken und sonstigen ver-eisungsgefährdeten Bereichen wie beispielsweise Eisenbahnweichen eingesetzt. Beim direkten Kühlen wird die Wärme durch den Temperaturunterschied zwischen Kühlbereich und Erdreich in den Untergrund abgeführt.⁶⁵

Abschließend ist hier anzumerken, dass für einen Neubau mit einer Erdwärmesondenanlage eine Niedertemperatur-Wärmepumpe in monovalenter Nutzung aus den oben angeführten Gründen anzustreben ist, da dies die meisten Vorteile im Hinblick auf einen ökonomisch und ökologisch sinnvollen Betrieb mit sich bringt. Des Weiteren bildet diese Anlagenauslegung in dieser Konfiguration die Grundlage für den Heizanlagenvergleich im Kapitel „Wirtschaftlichkeit“.

In Bezug auf die Betriebsvariante einer solchen Anlage stellt sich das „Heizen und Kühlen“ als empfehlenswerteste Variante dar, da hier nicht nur kostengünstig geheizt sowie gekühlt werden kann, sondern sich auch der Untergrund - bedingt durch die Energieeinspeisung der Kühlung - optimal regenerieren kann. Jedoch ist auch ein reiner Heizbetrieb bei Einhaltung der Regeln der Technik über die gesamte Lebensdauer der Anlage als unproblematisch einzustufen.

2.3 Erdwärmesonden

Die Nutzung von Erdwärme durch Tiefensonden ist eine von mehreren Möglichkeiten die oberflächennahe geothermische Energie zu erschließen. Der Vorteil dieses Systems liegt dabei in der konstanten Leistungsabgabe über das gesamte Betriebsjahr hinweg, da die tief abgeteuften Sonden von den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im oberflächennahen Bereich weitgehend unbeeinflusst bleiben. Dieser Anlagentyp nutzt also Sonden, die vertikal bis zu einer Tiefe von maximal 300 m in den Untergrund eingebaut werden. Ursprünglich wurde diese Systemart entwickelt, um Verckerungs- oder Korrosionserscheinungen von Brunnenanlagen zu verhindern. Aufgrund der konstanten Untergrundtemperaturen ab einer Tiefe von etwa 10 bis 20 m sind Erdwärmesonden

⁶⁵ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 55.

ein idealer Energielieferant für Wärmepumpen. Für den häuslichen Gebrauch sind Teufen von etwa 70 bis 150 m üblich. Die Anzahl sowie Tiefe der einzelnen Erdwärmesonden ist dabei von der Dimensionierung der Anlage sowie von den Standortbedingungen (Wärmentzugsleistung des Untergrunds) abhängig. Als häufigste Ausführungsformen treten die Einfach- (simplex) und Doppel-U-Rohrsysteme (duplex) in Erscheinung. Jedoch sind auch Koaxialsonden mit außen- bzw. innengeführtem Rücklauf möglich. Die am meist verwendeten Systeme bestehen, je nach Sondentyp, aus ein bis zwei Polyethylen-Rohrschleifen mit jeweils einer Vor- und Rücklaufleitung. Innerhalb dieser Rohrleitungen zirkuliert Wasser, welches üblicherweise mit einem Frostschutz aus Glykol versetzt ist. Beim Hinabströmen der Flüssigkeit (**Vorlauf**) wird begonnen, die Energie des Untergrundes aufzunehmen, um sie nach dem Aufstieg (**Rücklauf**) an die Wärmepumpe abzugeben.⁶⁶ Die folgende Abbildung veranschaulicht die hier beschriebenen Sondentypen.

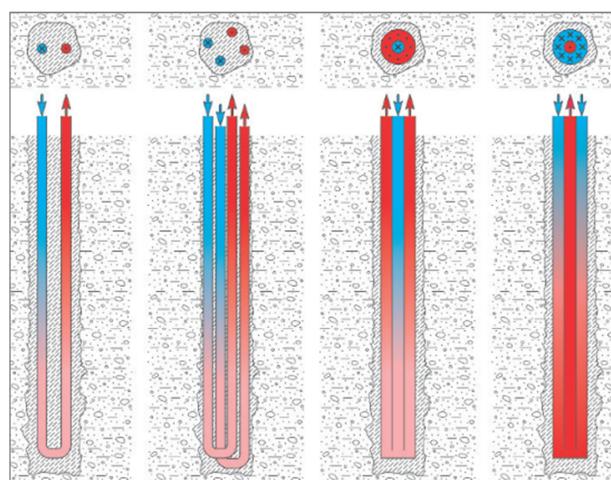


Abbildung 2.3: Häufigste Sondentypen bei EWS-Anlagen⁶⁷

Das Bohrloch wird nach dem Einbringen der Sonden mit einem Verfüllbaustoff verpresst, welcher eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen sollte. Die Hinterfüllung hat dabei einerseits die Aufgabe einen hydraulischen Kurzschluss zwischen möglichen Grundwasserstockwerken zu unterbinden und andererseits die thermische Anbindung an den Untergrund sicherzustellen.⁶⁸

⁶⁶ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 56 und 57.

⁶⁷ Quelle: SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 41.

⁶⁸ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 60.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Systemüberblick dieser Anlagen-technik.



Abbildung 2.4: Schema einer Erdwärmesondenanlage⁶⁹

Die Grafik zeigt ein Absorptionssystem mit zwei Erdwärmesonden, welche über Zuleitungen in den Technikraum mit der Wärmepumpe verbunden sind. Das in dem Sondenkreislauf befindliche flüssige Wärmeträgermedium nimmt dabei zunächst die in der Tiefe gespeicherte geothermische Energie des Untergrunds auf. Die Sole-Wasser-Wärmepumpe vollzieht anschließend den Temperaturhub und versorgt in weiterer Folge den Pufferspeicher für den Heizkreis des Gebäudes sowie den für die Warmwasseraufbereitung erforderlichen Speicher. Abschließend fließt das abgekühlte flüssige Wärmeträgermedium wieder in die Sonden, um dort erneut die Erdwärme des Untergrunds aufzunehmen.

⁶⁹ Quelle: <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktionsweise/erde/> (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.).

2.3.1 Vor- und Nachteile von Erdwärmesonden

- + Keine Verokerungs- bzw. Vereisungerscheinungen – daher größte Betriebssicherheit
- + Gut zum Heizen und Kühlen
- + Wartungsärmerer Betrieb gegenüber offenen Systemen
- + Platzsparendes System
- Geringerer Wirkungsgrad gegenüber einer Wasser-Wasser Wärmepumpe
- Höhere Herstellungskosten durch Erdwärmesondenbohrungen⁷⁰

2.3.2 Kühlen mit Erdwärmesonden

Da die abgeteuften Sonden tief in das Erdreich ragen, eignen sich diese Wärmepumpenanlagen ebenfalls gut zur freien (passiven/indirekten) Kühlung von Gebäuden. Dabei fließt die Wärme selbst immer vom warmen zum kühlen Bereich (2. thermodyn. Hauptsatz). Der Vorteil dieser Kühlungsart ist, dass die Wärmepumpe bzw. ihr Kompressor sich nicht einschaltet und somit keinen Strom für die Kühlung benötigt, was aus ökologischer und ökonomischer Sicht anzustreben ist. Zur Steigerung der Effektivität wird hier die Kombination aus Fußbodenheizung und so genannten Kühldecken empfohlen.⁷¹

In einem Neubau mit guter Wärmedämmung können Räume in der Regel um etwa 5 °C abgekühlt werden. **Höhere Kühlleistungen** sind nur über eine aktive (direkte) Kühlung realisierbar. Hier wird die Wärmepumpe reversibel eingesetzt („Kühlschrank- Prinzip“), sie benötigt also Strom um die Räume stärker abzukühlen. Des Weiteren ist auch eine Kombination aus aktiver und passiver Kühlung möglich, um die an besonders heißen Tagen auftretenden Temperaturen zu senken.⁷²

2.3.3 Steigerung der Effizienz durch Solarthermie und Photovoltaik

Wärmepumpenanlagen sind grundsätzlich sehr gut für eine kombinierte Nutzung mittels Solar- und Photovoltaikanlagen geeignet. Dabei kann

⁷⁰ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage, S. 26 und 27.

⁷¹ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage, S. 26 bis 33.

⁷² Vgl. <http://www.waermepumpe-austria.at/die-waermepumpe/vorteile-einer-waermepumpe.html>. Datum des Zugriffs: 28.April.2015

die Solarstrahlung einerseits in Wärme (Solarthermie) und andererseits in Strom (Photovoltaik) umgesetzt werden.⁷³

• Die solarunterstützte Erdwärmesonde

Die Kombination einer Solaranlage mit Erdsonden führt zu bemerkenswerten Synergieeffekten. Durch diese Systemverknüpfung ist eine signifikante Senkung der jährlichen Energiekosten möglich, da das Gesamtsystem deutlich effizienter arbeitet. Die solaren Erträge in den Sommer- bzw. auch in den Übergangsmonaten reichen aus, um den Wärmebedarf annähernd vollständig abzudecken.⁷⁴

Allerdings kann die solare Energie nicht nur zur **Warmwasseraufbereitung** eingesetzt werden (Wassertemperatur > 60 °C), sie bietet des Weiteren den Vorteil, die im Sommer in großem Umfang zur Verfügung stehende Wärme über die Sonden in den Untergrund abzuführen und zu speichern (Untergrund als thermischer Speicher). Dabei fungiert das Erdreich als **Langzeitwärmespeicher bzw. saisonaler Speicher**, um die Wärmeenergie schließlich während der Heizperiode wieder nutzbar zu machen. Die Sommermonate sind hinsichtlich der **natürlichen Regeneration des Untergrunds** also von großer Bedeutung und stellen eine entscheidende Phase dar. Deshalb ist es durchaus sinnvoll, die Bodenkörpertemperatur vor der Heizperiode über das natürlich vorherrschende Temperaturniveau hinaus zu erhöhen, um der Wärmepumpe sozusagen bessere Startbedingungen zu ermöglichen. Dadurch kann über das Jahr hinweg eine Verbesserung der Effizienz der Wärmepumpe erreicht werden, was sich wiederum in einer signifikanten Erhöhung der Jahresarbeitszahl bemerkbar macht. Bei reinem Heizbetrieb hingegen wird der Untergrund lokal ausgekühlt. Dies kann nach einiger Betriebszeit zu einem Temperaturabfall und damit verbundenen niedrigeren Entzugsleistungen führen. Aus diesem Grund ist der **Energieeinspeisung im Sommer** besonders große Bedeutung zu geben.⁷⁵

Vorteile einer solarunterstützten Erdwärmesonde

- + Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems
-> Vor allem bei Niedertemperatur-Wärmepumpen
- + Steigerung der Leistungszahl COP von ursprünglich 4 bis 5 bei modernen Wärmepumpenanlagen auf 5,9 bis 7 durch solare Unterstützung

⁷³ Vgl. STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. S. 30.

⁷⁴ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 71.

⁷⁵ Vgl. STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. S. 111 bis 113.

- + Reduktion der Betriebszeit und des elektrischen Verbrauchs durch solare Erträge
- + Unterstützung der thermischen Speicherfähigkeit sowie der natürlichen Regeneration des Erdreichs durch solare Überschüsse⁷⁶

• Erdwärmesonden in Kombination mit einer Photovoltaikanlage

Im Gegensatz zu einer Solaranlage weist eine Photovoltaikanlage keinen Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpe auf. Jedoch ist eine ausreichend dimensionierte Anlage in der Lage, den von der Wärmepumpe benötigten Strom zu produzieren. Deshalb ist eine solche Kombination ideal. Beispielsweise besteht durch den Einsatz einer 3 kW-Peak-Photovoltaikanlage mit ca. 25 m² Fläche die Möglichkeit, so viel Strom zu produzieren, wie für eine effiziente Heizung mit Wärmepumpe für ein Einfamilienhaus inklusive der Warmwasserbereitung bei vier Personen notwendig wäre. Dadurch kann in weiterer Folge bei guter Anlagenauslegung im Hinblick auf die Jahresbilanz ein „Null-Heizenergiehaus“ erreicht werden.⁷⁷

2.4 Weitere Systemarten der Oberflächennahen Geothermie

Die folgenden Erläuterungen sollen die Übersicht über die verschiedenen Systemarten der oberflächennahen Nutzung von geothermischer Energie vervollständigen sowie deren Anwendungsmöglichkeiten näher beschreiben. Diese Anlagen können dabei grundsätzlich in **geschlossene** (Sonden, Kollektoren, Erdwärmekörbe, Energiepfähle sowie erdbeührende Betonbauteile) und **offene Systeme** (Brunnenanlagen, Wässer aus Bergwerken und Tunnel) eingeteilt werden. Nachfolgend werden diese Systeme nun beschrieben.

2.4.1 Erdwärmekollektoren

Als Erdwärmekollektoren bezeichnet man Kollektorrohre, die horizontal in einer Tiefe von 1 bis 2 m verlegt werden. Wie bei den Erdwärmesonden zirkuliert in dem Rohrsystem ein frostsicheres Wärmeträgermedium, welche dem Untergrund Wärme entzieht. Der Rohrabstand beträgt dabei in der Regel etwa 0,5 bis 0,8 m, wobei darauf zu achten ist, dass die

⁷⁶ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 71 und 72.

⁷⁷ Vgl. SCHLADER, W. et al.: Richtig heizen mit Erdwärme (Informationsbroschüre). S. 16.

Rohre mit einem Sicherheitsabstand von mindestens 0,2 m zur örtlichen Frostgrenze einzubauen sind. Die wesentlichen Energielieferanten sind die solare Strahlung und der Wassergehalt des Bodens (Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit). Durch den Heizbetrieb ist davon auszugehen, dass der umgebende Boden im Bereich der Kollektorrohre, abhängig von lokalen klimatischen Bedingungen, einfriert. Diese Vereisung führt zu einem deutlichen Anstieg der nutzbaren Energiemenge, da beim Phasenübergang von flüssig auf fest (gefroren) sehr große Mengen an Latentwärme entstehen (ca. 0,09 kWh/kg; Wärmeleitfähigkeit von Wasser: ca. 0,6 W/(m·K) -> Eis: ca. 2,2 W/(m·K)). Die Entzugsleistung einer Kollektoranlage ist dabei in Abhängigkeit des Anlagenstandortes und den damit verbundenen klimatischen Bedingungen zu sehen. Demzufolge sind selbst bei gleichartigen Bodentypen in unterschiedlichen Klimazonen variierende Entzugsleistungen erkennbar. Diese liegen je nach Bodenart und Wassergehalt zwischen **10** und **40 W/m²**.⁷⁸

Eine effektive freie/passive Kühlung ist mit Erdwärmekollektoren jedoch nicht möglich, da das oberflächennahe Erdreich gerade im Sommer selbst hohe Temperaturen aufweist. Deshalb ist bei dieser Systemauslegung nur eine aktive/reversible Kühlung mit der Wärmepumpe möglich. Dementsprechend ist hier mit höheren Energiekosten für den Kühlbetrieb zu rechnen.⁷⁹

Vor- und Nachteile von Erdwärmekollektoren

- + Günstigere Herstellkosten durch Wegfall der Bohrarbeiten
- + Hohe Betriebssicherheit
- + Gut geeignet zum Heizen, hoher Wirkungsgrad
- + Wartungsärmerer Betrieb gegenüber offenen Systemen
- Geringerer Wirkungsgrad gegenüber einer Wasser-Wasser-Wärmepumpe
- Keine freie/passive Kühlung möglich
- Großer Platzbedarf durch Kollektorflächen⁸⁰

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Systemüberblick über den Aufbau von Erdwärmekollektoranlagen.

⁷⁸ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 56 bis 58.

⁷⁹ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage, S. 27 und 28.

⁸⁰ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage, S. 28.

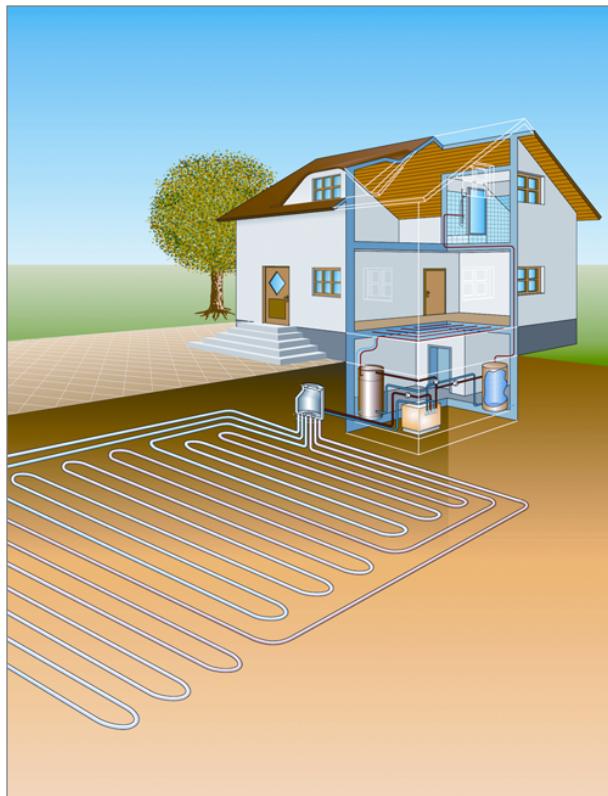


Abbildung 2.5: Schema einer Erdwärmekollektoranlage⁸¹

Die Grafik zeigt ein Absorptionssystem, welches aus Flächenkollektoren besteht. Das in dem Sondenkreislauf befindliche flüssige Wärmeträgermedium nimmt dabei zunächst die überwiegend solare gespeicherte geothermische Energie des Untergrunds auf. Die Sole-Wasser-Wärmepumpe vollzieht anschließend den Temperaturhub und führt die Zuleitungen, wie bei den Erdwärmesonden, in den Technikraum zur Wärmepumpe. Allerdings ist hier zwingend ein Verteilerschacht notwendig, um die Rohrleitungen zusammenzuführen. Die Wärmepumpe versorgt in weiterer Folge den Pufferspeicher für den Heizkreis des Gebäudes sowie den für die Warmwasseraufbereitung erforderlichen Speicher. Abschließend fließt das abgekühlte flüssige Wärmeträgermedium wieder in die Kollektoren, um dort erneut Wärme aufzunehmen.

⁸¹ Quelle: <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktionsweise/erde/> (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.).

2.4.2 Brunnenanlagen

Brunnenanlagen zählen zu den offenen Systemen und zeichnen sich dadurch aus, dass sie Grundwasser zur thermischen Nutzung entnehmen und dies danach wieder dem Untergrund zuführen (Reinfiltration). Dafür ist ein dementsprechendes Grundwasservorkommen mit einer geeigneten Wasserqualität vorauszusetzen, um den Betrieb der Anlage hinsichtlich der Lebensdauer sowie der Wartung zu gewährleisten. Die Bauweise wird dabei als Dublette bezeichnet, da solche Anlagen durch mindestens einen Förder- und einen Schluckbrunnen (Infiltrationsbrunnen) gekennzeichnet sind. Aufgrund des jährlich konstanten günstigen Temperaturniveaus des Grundwassers von etwa 7 bis 12 °C⁸² weisen offene Systeme grundsätzlich höhere Wirkungsgrade auf, als die meisten geschlossenen Bauweisen. Für den Bau und den Betrieb solcher Brunnenanlagen ist jedoch immer eine **wasserrechtliche Bewilligung** erforderlich. Des Weiteren sind die allgemein anerkannten technischen Regeln des Brunnenbaus anzuwenden. Durch die wasserrechtliche Nutzung ist der geothermischen Planung besonderes Augenmerk zu schenken. Dabei gibt es eine Reihe von Ausschlussgründen, die hier dementsprechend zu berücksichtigen sind.⁸³

Ausschlussgründe für Brunnenanlagen

- Mangelnde Sicherheit der Brunnenanlage selbst sowie ungeeignete Gebrauchs- und Standsicherheiten in Bezug auf benachbarte Bebauungen
- Hydraulische und thermische Beeinflussungen von Nachbargrundstücken durch Grundwasserabsenkung und -aufhöhung sowie auch durch Temperaturfeldbeeinflussungen
- Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit (Chemismus)
- Konkurrenz zu bestehenden Wasserrechten (Trinkwasserversorgung, etc.)
- Einzugsgebiet der Brunnenanlage liegt im Bereich eines Grundwasserschadens (Altlasten, etc.)
- Mögliche hydraulische Störungen Dritter (Grundwasserstandsänderungen, etc.)⁸⁴

⁸² Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 65.

⁸³ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 58 bis 60.

⁸⁴ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 58 bis 60.

Vor- und Nachteile von Brunnenanlagen

- + Günstigere Herstellkosten durch Wegfall der Bohrarbeiten
- + Bestens geeignet zum Heizen und Kühlen
- + Wirkungsgrad etwa 20 % höher, als bei Sole-Wasser-Wärme-pumpen
- Verockerungs- und Vereisungerscheinungen der Brunnenanla-ge
- Nicht geeignet für eisen und manganhaltige Wässer sowie stark aggressive Wässer
- Wartungsintensiver als geschlossene Systeme
- Anlage abhängig vom Grundwasserangebot und Wasserquali-tät⁸⁵

Die folgende Abbildung gibt einen Systemüberblick über die Brunnenan-lagen.

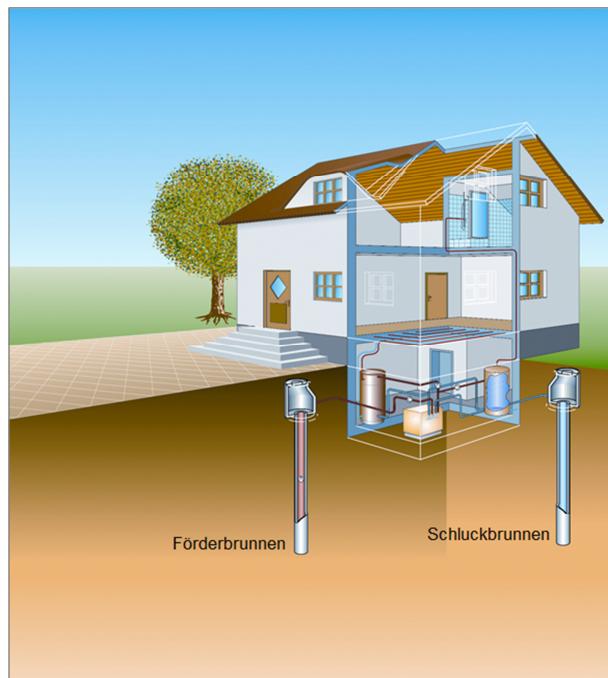


Abbildung 2.6: Schema einer Grundwasserbrunnenanlage⁸⁶

⁸⁵ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage, S. 24.

Als Absorptionssystem tritt bei Brunnenanlagen der Förder- und Schluckbrunnen in Erscheinung. Das aufgenommene Grundwasser wird hier vom Entnahmestollen über eine Zuleitung in den Technikraum zur Wärmepumpe geführt. Die Wasser-Wasser-Wärmepumpe vollzieht anschließend den Temperaturhub und versorgt in weiterer Folge den Pufferspeicher für den Heizkreis des Gebäudes sowie den für die Warmwasseraufbereitung erforderlichen Speicher. Abschließend wird das abgekühlte Grundwasser über den Schluckbrunnen wieder dem Untergrund zugeführt.

2.4.3 Energiepfähle

Energiepfähle sind geschlossene Systeme, die hauptsächlich zur Anwendung kommen, wenn aufgrund der Bodenbeschaffenheit eine Pfahlgründung zwingend notwendig ist. Die üblichen Teufen liegen in Bereichen bis etwa 30 m. Das Wärmeaustauschersystem, welches meist aus Kunststoffrohren (typisch PE-HD) besteht, wird am Bewehrungskorb fixiert und eingebracht. Gründungspfähle mit solchen Wärmeaustauscherrohren werden in weiterer Folge als Energiepfähle bezeichnet. Aufgrund ihrer Gründungsfunktion eignen sich solche geothermischen Anlagen sehr gut als saisonaler Energiespeicher. Es sollte also neben dem Heizbetrieb (Energieentnahme) ebenfalls gekühlt werden (Energieeinspeisung), um die Regeneration des Untergrunds zu unterstützen. Im Folgenden werden die drei wichtigsten Arten unterschieden und deren häufigsten Ausführungsvarianten angegeben.

1. Fertigteilpfähle: Dabei handelt es sich um gerammte Energiepfähle, die werkseitig bereits mit Wärmetauscherrohren ausgestattet sind.
2. Ortbetonpfähle: Diese Pfahlart wird im Bohrloch betoniert. Die wichtigsten Vertreter hierbei sind:
 - Ortbetonrammpfähle
 - Bohrpfähle
 - Schneckenbohrpfähle
3. Hohlpfähle: Stahlbeton-Hohlpfähle werden durch

⁸⁶ Quelle: <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktionsweise/grundwasser/> (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.)

einrammen eingebracht, Micropfähle werden mittels Spülbohrverfahren hergestellt.

- Stahlbeton-Hohlpfähle
- Micropfähle

Darüber hinaus sind grundsätzlich alle weiteren erdberührten Bauteile zur Nutzung von Erdwärme geeignet wie z.B. Schlitz- und Stützwände.⁸⁷

2.4.4 Sonder- und Mischformen

Sonder- und Mischformen kommen zur Anwendung, wenn einerseits die geologischen Rahmenbedingungen nicht ausreichen, um einen Einzelbetrieb mit dementsprechender voller Wärmeabdeckung zu gewährleisten oder andererseits eine Steigerung der Effizienz der Anlage angestrebt wird. Im Folgenden werden aus diesem Grund die meisteingesetzten Anlagenvarianten für den häuslichen Gebrauch angegeben und beschrieben.⁸⁸

Des Weiteren folgt ein Überblick über weitere Anwendungsformen der Erdwärmegewinnung, die jedoch nicht im Zusammenhang mit der Nutzung für das Eigenheim zu sehen ist, sondern viel mehr die Vielfalt dieser Energiegewinnungsmethode veranschaulichen soll.

2.4.4.1 Die meisteingesetzten Sonder- und Mischvarianten für den häuslichen Gebrauch

1. Solarunterstützte Erdwärmesonde (siehe Punkt 2.3.3):
2. Regenwasserunterstützter Erdwärmekollektor:

Bei Erdwärmekollektoren steht die spezifische Entzugsleistung im engen Zusammenhang mit der Bodenbeschaffenheit. Je höher die Wassersättigung im Boden ist, desto höher ist auch die erreichbare Entzugsleistung. Die Sättigung des Erdreichs um den Kollektor kann durch dementsprechende Maßnahmen erhöht werden. Eine einfache Methode stellt die Bewässerung mittels Dach- und Oberflächenwässer dar. Zur permanenten Befeuchtung werden Regen-, Sicker-, Drainage- oder Brunnenwässer in

⁸⁷ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 66 bis 70.

⁸⁸ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 70.

eine Kollektorwanne geleitet, deren überschüssiges Wasser über den Rand abgeleitet werden kann oder gleich der Kanalisation zugeführt wird. Im Vergleich zur normalen Ausführungsvariante lässt sich so ein **Flächenbedarfsvorteil von etwa 75 %** erreichen. Auch die Entzugsleistung steigt durch die Regenwassernutzung auf **bis zu 40 W/m²**.⁸⁹

3. Luft-Wasser-Wärmepumpe:

Bei diesem Anlagentyp wird zur besseren Leistungsausbeute Luft durch Rohre (Erdwärmetauscher) in das Erdreich geführt, dort vorgewärmt und anschließend entweder direkt oder durch den Einsatz einer Wärmepumpe zur Wohnraumbeheizung/Belüftung genutzt. Da Luft eine geringere Wärmekapazität aufweist, müssen sehr große Volumina bewegt werden, wodurch es zu erhöhter Geräuschbildung kommen kann. Dieses System ist vor allem bei Niedrigenergie- und Passivhäusern im Einsatz, welche einen sehr niedrigen Heizwärmeverbrauch aufweisen. Eine Verwendung bei Bestandsgebäuden ist in der Regel nur durch einen Parallelbetrieb eines zusätzlichen, konventionellen Heizungssystems möglich. Hinsichtlich der Dimensionierung ist darauf zu achten, dass der Wärmebedarf bis zu einer Außentemperatur von - 5 °C vollständig gedeckt wird. Bei erhöhtem Bedarf bzw. bei tieferen Temperaturen wird die Wärme durch elektrische Erzeuger oder durch Zusatzheizsysteme zugeführt (oftmals kein monovalenter Betrieb möglich).⁹⁰

Der große Nachteil von Luft-Wasser- bzw. Luft-Luft-Wärmepumpenanlagen besteht also darin, dass die Wärmequelle Luft am kältesten ist, wenn die meiste Leistung gebraucht wird. Deswegen weisen diese Systeme bei solchen Bedingungen einen schlechten Wirkungsgrad auf. Zusätzlich besteht bei Splitanlagen noch das Problem der Vereisung des Verdampfers, speziell an nasskalten Tagen, wodurch zum Abtauen wieder zusätzliche Energie benötigt wird. Allerdings liegt der Wirkungsgrad in der Übergangszeit etwas über der Sole-Wasser-Wärmepumpe.⁹¹

Die Jahresarbeitszahlen von Luft-Wasser-Wärmepumpenanlagen bewegen sich in Bereichen von 2,8 bis 4,7.⁹²

⁸⁹ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 72 bis 74.

⁹⁰ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 74 und 75.

⁹¹ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage. S. 29 bis 31.

⁹² Vgl. <http://www.jahresarbeitszahlen.info/index.php/theorie-und-praxis/feldstudien-und-ergebnisse>. Datum des Zugriffs: 16.August.2015.

4. Koaxialbrunnen:

Dieses System kommt zum Einsatz, wenn eine direkte Nutzung des Grundwassers mit nur einer tiefen Bohrung (Teufen von ca. 100 bis 250 m) realisiert werden muss, um die Kosten eines zweiten Brunnens einzusparen. Der Koaxialbrunnen fördert dabei wie eine herkömmliche Brunnenanlage Wasser über ein Steigrohr zu einer Wärmepumpe, die dem flüssigen Medium in weiterer Folge die erforderliche Energie zum Heizen und Kühlen entzieht. Die Rückführung des Wassers erfolgt über eine um das Steigrohr gelegte Kiespackung, wodurch erneut Wärmeenergie aufgenommen wird. Aufgrund der fehlenden Abgrenzung zum natürlichen Boden darf kein Frostschutzmittel verwendet werden, infolgedessen sollte die Austrittstemperatur nicht unter ca. + 3 °C abfallen. Des Weiteren dürfen durch die Bohrung keine Grundwasserstockwerke miteinander verbunden werden. Der Koaxialbrunnen rechnet sich aufgrund der hohen Erschließungskosten nicht für einen reinen Heizbetrieb.⁹³

2.4.4.2 Sonstige Sonder- und Mischformen zur Nutzung von oberflächennaher geothermischer Energie

- Thermisch aktivierte Fundamente
- Thermisch aktivierte Tiefgaragen
- Wässer aus Bergwerken und Tunnel⁹⁴
- Energieanker

Zusammenfassend wurde durch dieses Kapitel die Vielzahl der möglichen Anlagenarten dargestellt und beschrieben, um die die geothermische Energie des Untergrunds zu nutzen. Die Auswahl eines geeigneten Heizsystems wird dabei vor allem durch die Bedingungen am Anlagenstandort sowie durch die vom Bauherren geforderte Betriebsvariante (im Wesentlichen entweder Heizen oder Heizen und Kühlen) beeinflusst. Dementsprechend ist speziell im Hinblick auf die spezifischen Vor- und Nachteile einer Geothermieanlage nicht jede Systemart in gleichem Ausmaß für eine optimale Nutzung geeignet. Ebenfalls stellen der Energieverbrauch des Gebäudes sowie die Investitionskosten einen maßgebenden Faktor für die Systemauswahl dar, wodurch die hier angeführten Kriterien einer abschließenden Bewertung und Gewichtung unterzogen werden sollten.

⁹³ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 70 und 71.

⁹⁴ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 53 bis 67.

3 Planungsgrundlagen

Bei der Realisierung einer Erdwärmesondenanlage gilt es bestimmte Randbedingungen einzuhalten um den Anlagenbetrieb möglichst ökonomisch sowie ökologisch sinnvoll zu gestalten. Aus diesem Grund ist eine fachgerechte Planung und Bauausführung durch qualifizierte Unternehmen von allergrößter Bedeutung.

Zu Beginn wird auf die rechtlichen Anforderungen eingegangen, die für die Errichtung einer Sondenanlage von Bedeutung sind. Danach werden die Grundlagen der Planung und der damit verbundenen Einreichung vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Beschreibung der wichtigsten Methoden, wie Anlagenstandorte hinsichtlich ihrer thermischen Ergiebigkeit eingeschätzt werden können.

3.1 Rechtliche Grundlagen und Anforderungen

An dieser Stelle erfolgt ein Überblick über die rechtlichen Grundlagen und Anforderungen bezüglich der Erschließung und Nutzung von Erdwärmesondenanlagen. Dabei wird im Speziellen auf die Besonderheiten im Steirischen Raum eingegangen.

3.1.1 Wasserrechtliche Bewilligung

In Österreich beruht die rechtliche Grundlage zur thermischen Nutzung des Grundwassers mittels Vertikalkollektoren (Tiefensonden) auf dem **Wasserrechtsgesetz (WRG 1959 idF BGBI. I Nr. 54/2014)**.⁹⁵ Dieses Bundesgesetz stellt das umfassende gesetzliche Regelwerk zur Beurteilung von unterschiedlichsten (aus wasserwirtschaftlicher Sicht) relevanten Lebensverhältnissen dar.⁹⁶

Anlagen, die Grundwasser entnehmen und thermisch verändert versickern bzw. diese Wässer in einen Vorfluter einleiten, unterliegen der **Bewilligungspflicht**. Dagegen entnimmt eine Anlage zur thermischen Nutzung des Untergrunds (durch Kollektoren, Sonden oder Mischformen) zwar kein Wasser, sie könnte jedoch eine Gefährdung für das

⁹⁵ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 45.

⁹⁶ Vgl. http://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht_national/wasserrechtsgesetz/WRG1959.html. Datum des Zugriffs: 24.Juli.2015

Grundwasser darstellen. Demzufolge gelten für **bewilligungsfreie Ansuchen** folgende Voraussetzungen:⁹⁷

Nach **§31c, Abs. 5 (lit. a,b,c) WRG** wurden Anlagen zur Gewinnung von Erdwärme, die eine...

- **Tiefe von 300 m** nicht überschreiten oder
- welche sich nicht in Gebieten mit **gespannten oder artesisch gespannten Grundwasservorkommen** bzw.
- sich nicht in **wasserrechtlich besonders geschützten Gebieten** (nach §§ 33f, 34, 35 und 54 WRG) **und in geschlossenen Siedlungsgebieten ohne zentrale Trinkwasserversorgung** befinden sowie
- Anlagen zur **Wärmenutzung der Gewässer** (z. B. im Gewässer verlegte Kollektortrohre, jedoch ohne Wasserentnahme),
...bewilligungsfrei gestellt (Anzeigeverfahren).⁹⁸

Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass bezüglich der Bewilligung von Anlagen zur Nutzung von Erdwärme mittels Tiefensonden österreichweit große Unterschiede bestehen. Als bewilligungspflichtig gelten etwa Bauvorhaben in den Bundesländern Kärnten, Salzburg, Tirol und Salzburg. In Oberösterreich sowie in der Steiermark wurden Gebiete mit einer solchen Bewilligungspflicht ersichtlich gemacht. Diese Zonen können dabei anhand von öffentlich zugänglichen Informationssystemen (GIS bzw. Wasserbuch) eingesehen werden. In Niederösterreich sind derartige Anlagen wiederum bewilligungsfrei gestellt. Innerhalb der Grenzen von Wien und Burgenland wird zwar größtenteils eine Bewilligungspflicht vorgesehen, allerdings wurden diese Zonen noch nicht in einem Wasserbuch oder ähnlichem sichtbar gemacht. Infolgedessen sind Erdwärmesondenanlagen unter Berücksichtigung der Rechtslage streng genommen bewilligungsfrei.⁹⁹

Abschließend ist anzumerken, dass bei Planung, Errichtung und Betrieb solcher Anlagen die entsprechenden Normen und Richtlinien, unter anderem die...

- ÖN B 2601:2004 „Wassererschließung – Brunnen Planung, Bau und Betrieb“,

⁹⁷ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 45.

⁹⁸ Vgl. LAND STEIERMARK: Die Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefensonden) - Strategiepapier. S. 1.

⁹⁹ Vgl. GOLDBRUNNER, J.; FERSTL, M.; SONNEK, I.: Seminar - Erdwärmennutzung zur Heizung und Kühlung von Bauwerken. S. 13 bis 15.

- ÖN der Reihe B 4400 ff „Benennungen und Definitionen, Beschreibung und Klassifizierung von Böden sowie Fels“,
- EN der Reihe „Ausführung von besonderen geotechnischen Anlagen - Spezialtiefbau“,
- EN der Reihe „Geotechnische Erkundung und Untersuchung“,
- Regelwerke z.B. ÖWAV Regelblatt 207 „Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds“ sowie
- etwaige Landesgesetze bzw. Leitlinien z.B. Strategiepapier Land Steiermark

...zu berücksichtigen sind!¹⁰⁰

3.1.2 Sonstige Bewilligungen

Neben dem Wasserrechtsgesetz (WRG) sind zur thermischen Nutzung des Untergrunds sowie des Grundwassers weitere Gesetze und Verordnungen zu beachten.

- Mineralrohstoffgesetz (MintoG), BGBl. I 1999/38 i. d. g. F.:
-> Bewilligung von Sonden mit mehr als 300 m Tiefe
- Gewerbeordnung 1994, BGBl. 194 i. d. g. F.:
-> Fällt die Anlage in den Bereich der Gewerbeordnung, sind die betriebsanlagenrechtlichen Bestimmungen anzuwenden.
- Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 (UVP-G 2000), BGBl. 697/1999 i. d. g. F.:
-> Errichtung und Betrieb einer Anlage zur thermischen Nutzung des Untergrunds und Grundwassers im Rahmen einer UVP-Maßnahme.
- Bau- und Naturschutzrecht:
-> Berücksichtigung der jeweiligen landesgesetzlichen Bestimmungen¹⁰¹

3.1.3 Rechtliche Grundlage in der Steiermark

Wie bereits erläutert wurde, sind neben der Einhaltung des Wasserrechtsgesetzes (= Bundesgesetz) sowie der weiter oben angeführten Normen und Richtlinien, die jeweiligen **Bestimmungen der Bundesländer**

¹⁰⁰ Vgl. LAND STEIERMARK: Die Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefensonden) - Strategiepapier. S. 2.

¹⁰¹ Vgl. ÖSTERREICHISCHE ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 47.

der einzuhalten. Zu beachten ist hier, dass diese Vorgaben voneinander abweichen können und nicht einheitlich aufgebaut sind.

In der Steiermark gibt es diesbezüglich das **Strategiepapier „Die Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefsonden)“**. Das Ziel dieses Papiers ist die Formulierung einer anwenderorientierten Herangehensweise für die Erschließung von Erdwärmesondenanlagen durch Darlegung der Grundlagen sowie der technischen und rechtlichen Erfordernisse. Im Folgenden werden deshalb die wichtigsten Inhalte dieses Regelwerks beschrieben.¹⁰²

Gebiete mit gespannten oder artesisch gespannten Grundwasser

Die Grundwasserkörper innerhalb des steirischen Raums (oberflächennahe als auch Tiefengrundwasserkörper) können in sechs Bereiche gegliedert werden. Diese bestehen aus dem:

1. Steirischen und Pannonischen Becken,
2. Oststeirischen Becken,
3. Weststeirischen Becken,
4. Mittleren Ennstal,
5. Oberen Ennstal sowie aus
6. der Region Traun.

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die steirischen Grundwasserkörper.

¹⁰² Vgl. LAND STEIERMARK: Die Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefensonden) - Strategiepapier. S. 1.

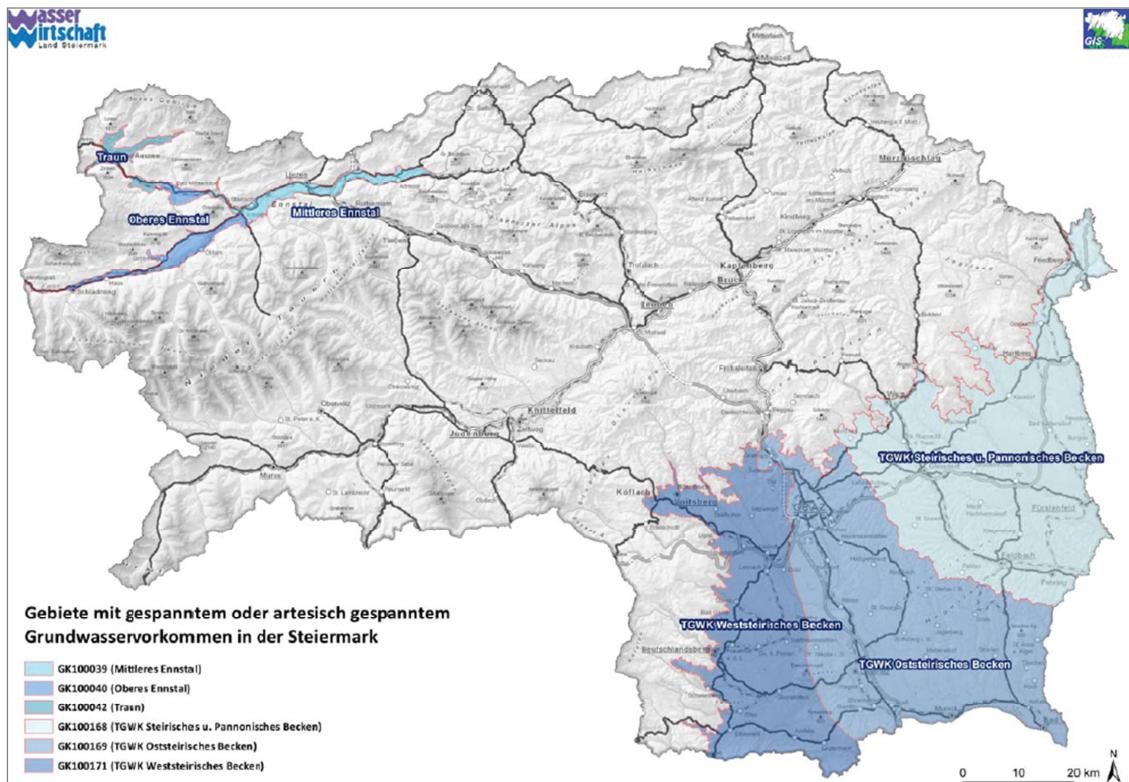


Abbildung 3.1: Gespannte oder artesisch gespannte Grundwasserkörper in der Steiermark¹⁰³

Die Zustimmung der wasserwirtschaftlichen Behörde zur Erschließung von geothermischen Anlagen in Bereichen mit gespannten oder artesisch gespannten Grundwasser ist dabei an gewisse Kriterien gebunden. Hierzu wurden drei Zonen definiert, welche in weiterer Folge unterschiedliche Auflagen für die Errichtung von Sondenanlagen beinhalten. Die entsprechenden **Auflagenkataloge** sind den Anhängen des Strategiepapiers zu entnehmen. Die Gliederung der Zonen mit den jeweiligen Anforderungen wird nachfolgend beschrieben.

1. Zone „Grazer und Leibnitzer Feld“

In diesen Bereichen ist **bis ca. 100 m Tiefe kein** gespanntes oder artesisches gespanntes Grundwasser zu erwarten. Eine Bewilligung im Anzeigeverfahren ist demnach unter Einhaltung eines selbstverpflichtenden Auflagenkatalogs, sofern keine fremden Rechte (z.B. Hausbrunnen u.ä.) im Umkreis von 150 m oder

¹⁰³ Quelle: LAND STEIERMARK: Die Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefensonden) - Strategiepapier. S. 3.

keine öffentlichen Interessen beeinträchtigt werden, möglich. Bohrungen, die tiefer als 100 m reichen sind mittels einer **Rotationsspülbohrung** durchzuführen. Auch hier sollte eine Beachtung von fremden Rechten bei oberflächennahen Wässern im Umkreis von 150 m erfolgen sowie bei gespannten oder artesisch gespannten Grundwässern auf einen Radius von mindestens 1000 m erweitert werden.

Die betroffenen Katastralgemeinden sind dem Anhang 1 des Strategiepapiers zu entnehmen.

2. Zone „gespannt und teilweise artesisch gespannt“

In diese Zonen fallen die Grundwasserkörper der Ost- und Weststeiermark sowie jene des Ennstals und der Traun. Hier ist jederzeit mit einem Antreffen von gespannten oder artesisch gespannten Grundwasser zu rechnen, weshalb unbedingt eine **Rotationsspülbohrung** vorzusehen ist. Des Weiteren ist dafür Sorge zu tragen, dass die Wichte der Bohrspülung ausreichend erhöht werden kann. Fremde Rechte sowie gespannte Grundwasserverhältnisse sind gemäß Zone 1 (150 bzw. 1000 m) zu berücksichtigen.

3. Zone „artesisch gespannt > 0,3 bar“

In diesen Bereichen ist je nach Höhenlage mit artesischen Wässern zu rechnen, welche Drücke über 0,3 bar aufweisen. Durch die fachgerechte Ausführung der Bohrarbeiten ist eine Beherrschung solcher Druckniveaus zwar möglich, jedoch sieht das ÖWAV Regelblatt darin einen **Ausschlussgrund**. Daher muss bereits vorab ein hydrogeologisches Gutachten belegt werden, dass die Bohrungen nicht tiefer als in den Stauer des oberflächennahen, ungespannten Grundwasserkörper reichen. Die Anzahl sowie die Tiefe der Sonden sind diesbezüglich anzupassen und im **Rotationsspülbohrverfahren** abzuteufen. Eine Berücksichtigung fremder Rechte sollte im Umkreis von mind. 150 m erfolgen.

Wird dennoch auf eine Abteufung auf das Niveau von artesischen Horizonten bestanden, ist dies nur zulässig, wenn eine von der Behörde unabhängige wasserrechtliche Bauaufsicht (z.B. einschlägiges Technisches Büro, Zivilingenieurbüro, etc.) bestellt wird. Des Weiteren erfolgt in solchen Fällen ein **Bewilligungsverfahren mit Ortsaugenschein**. Auch hier ist die Sondenbohrung mittels Rotationsspülbohrverfahren abzuteufen und dafür zu sorgen, dass die Wichte der Bohrspülung ausreichend erhöht werden kann. Die Berücksichtigung fremder Rechte bei oberflä-

chennahen Wässern (mind. 150 m) sowie der Bereich um gespannte Wässer (mind. 1500 m) sollte ebenfalls ausgedehnt werden.¹⁰⁴

Abschließend gibt die folgende Abbildung einen Überblick über die gespannten Grundwasserverhältnisse im West- und Oststeirischen Becken sowie im Steirischen und Pannonischen Becken.

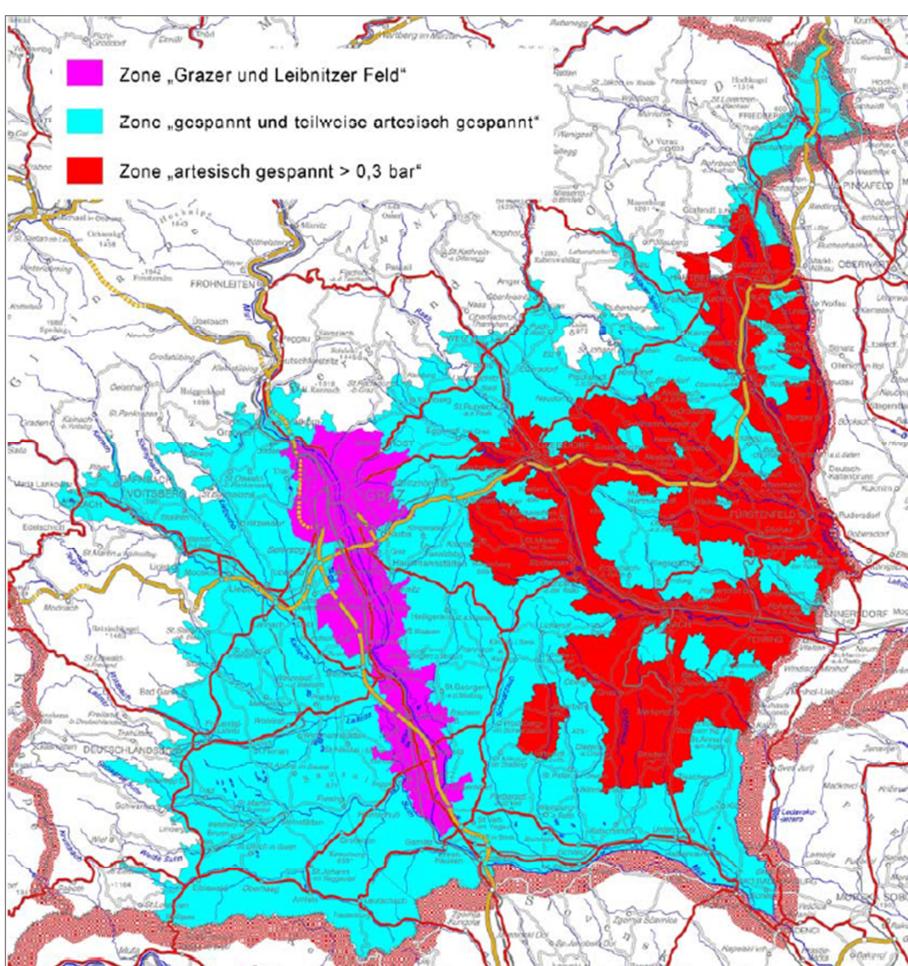


Abbildung 3.2: Gespannte, teilweise gespannte sowie artesisch gespannte Zonen (>0,3 bar) der Steiermark¹⁰⁵

¹⁰⁴ Vgl. LAND STEIERMARK: Die Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefensonden) - Strategiepapier. S. 1 bis 7.

¹⁰⁵ Quelle: LAND STEIERMARK: Die Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefensonden) - Strategiepapier. S. 5.

3.2 Grundlagen der Planung und Einreichung

Die Planung stellt bei der Errichtung einer geothermischen Anlage eine wichtige Phase dar. Hier wird die Grundlage für eine technisch, wirtschaftlich sowie ökologisch sinnvolle Anlagenauslegung gelegt. Fehler, die bei der Auslegung und Dimensionierung gemacht werden, können zu fatalen Folgeerscheinungen führen und beeinträchtigen in weiterer Folge signifikant den Betrieb der Heizanlage.

3.2.1 Energetische Beschaffenheit der Gebäudehülle

Nur sehr gut energetisch sanierte bzw. errichtete Gebäude stellen die Basis für einen wirtschaftlichen Einsatz von Heizanlagen dar. Dies gilt im Besonderen für Wärmepumpensysteme, da diese mit einem Niedertemperatur-Heizsystem bei einer idealen Vorlauftemperatur von etwa 35 °C arbeiten. Somit ist ein geringer Energieverbrauch eines Objektes als Grundlage für einen ökologisch und ökonomisch sinnvollen Einsatz heranzuziehen. Die folgende Abbildung kann dabei als Empfehlung für die Anwendung der Wärmepumpentechnik im Hinblick auf den energetischen Zustand eines Gebäudes gesehen werden.¹⁰⁶

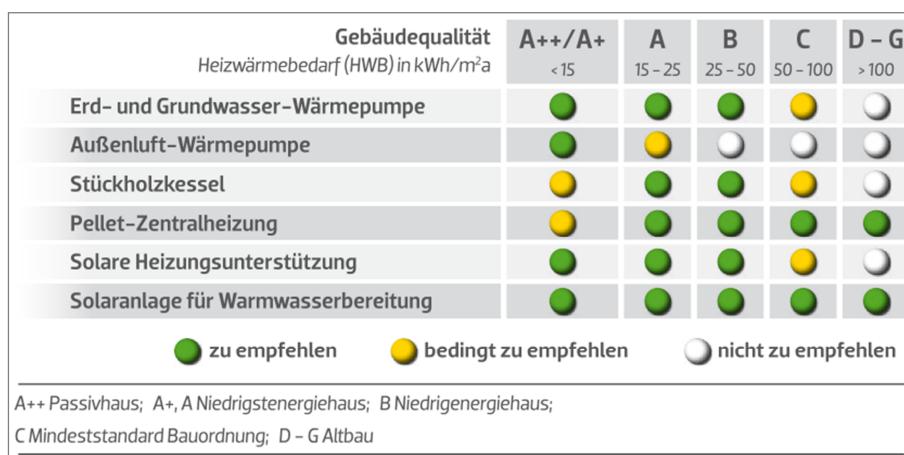


Abbildung 3.3: Energetische Gebäudequalität zur Nutzung der Wärmepumpentechnik¹⁰⁷

¹⁰⁶ Vgl. SCHLADER, W. et al.: Richtig heizen mit Erdwärme (Informationsbroschüre). S. 6.

¹⁰⁷ Quelle: SCHLADER, W. et al.: Richtig heizen mit Erdwärme (Informationsbroschüre). S. 6.

3.2.2 Vorplanungsphase bei einer Sondenanlage

In der Vorplanungsphase steht die Abklärung einer grundsätzlichen Durchführbarkeit der Erdwärmesondenanlage im Vordergrund. Dies beinhaltet unter anderem die Prüfung von möglichen Ausschlussgründen für die Errichtung und den Betrieb einer solchen Anlage. Folgende Punkte sind für die Vorplanungsstufe von Bedeutung:

- Ausschlussgründe:
 - Wasserrechtliche Bestimmungen (siehe Punkt 3.1 – Rechtliche Grundlagen und Anforderungen -> Tiefenbeschränkung der Bohrung, gespannte Wässer, Schutzzonen, usw.)
 - Altlasten (schädliche Stoffe, Sprengmittel, etc.)
- Prüfung möglicher Konkurrenznutzungen (Wasserversorgung, Rohstoffgewinnung, etc.)
- Sonstige Grundlagenermittlung (Genehmigungssituation, Anforderungen der Bundesländer, usw.)
- Prüfung der Zugänglichkeit für Bohrgeräte und Zubehör (Bewegungsflächen für Bohrarbeiten sowie ausreichend große Zufahrtsmöglichkeiten für den An- und Abtransport)
- Förderungsmöglichkeiten

3.2.3 Planungsphase

In dieser Phase beginnt die eigentliche Planungsleistung. Hier werden alle wichtigen Parameter und Randbedingungen für die Errichtung einer geothermischen Anlage mittels Tiefensonden ermittelt. Diese Daten dienen in weiterer Folge als Grundlage für die technische Ausführung, weshalb dieser Projektphase große Bedeutung zugeschrieben werden muss. Die folgenden Punkte geben einen Überblick über die zu erbringenden Leistungen innerhalb dieser Phase.

- Feststellung der Art der Nutzung:
-> reiner Heizbetrieb oder eine Kombination aus Heizen und Kühlen
- Ermittlung des Energiebedarfs des Objekts - Heizlastermittlung:
-> Grundlast – Spitzenlast – Jahresprofil (der Energieausweis ist zur Auslegung der Wärmepumpe nicht geeignet!)
- Festlegung der zulässigen Maximal- und Minimaltemperaturen im Betrieb der Sondenanlage
- Ermittlung der spezifischen Entzugsleistung:
-> Auslegung anhand des geologischen Vorprofils

- > Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit sowie der volumetrischen Wärmekapazität von durchteuften Schichten
- > für kleine häusliche Anlagen (< 15 kW) meist durch Abschätzung!
- Ein Vorhandensein von grundwasserführenden Horizonten ist vorteilhaft.
 - > Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit sowie der Wärmekapazität¹⁰⁸

3.2.4 Einreichunterlagen einer Erdwärmesondenanlage

Um die erforderlichen Bewilligungen für eine Sondenanlage zu erlangen, ist die Vorlage von Einreichunterlagen (je nach gesetzlicher Anforderung) an die zuständige Wasserrechtsbehörde notwendig. Die wasserrechtliche Bewilligung ist dabei anhand der spezifischen Vorgaben der jeweiligen Bundesländer einzubringen. In der Steiermark setzen sich die Unterlagen zur wasserrechtlichen Einreichung aus folgen Inhalten zusammen:

- Angabe der Beteiligten:
(Grundstückseigentümer, Antragsteller, Planverfasser, Behörde)
- Technischer Bericht:
Der technische Bericht besteht im Wesentlichen aus der Projektbeschreibung, der Beschreibung der Wärmepumpenanlage, der Tiefensonde, der Sondenbohrung, der Verpressung, der Inbetriebnahme, den Angaben über die Trink- und Nutzwasserversorgung sowie aus den sonstigen Anmerkungen. Die erforderlichen Stellungnahmen, Berechnungen, Datenblätter sowie die Planbeilagen werden dabei als Anhang beigefügt.
- Anhang A - Fachtechnische Stellungnahme Geologie/Hydrogeologie:
Der Anhang A beschreibt die geologischen- und hydrogeologischen Verhältnisse am Standort. Des Weiteren erfolgen Hinweise zur Errichtung und Rückbau von Tiefensonden. Die Beilagen der Stellungnahme beinhalten außerdem umgebende Wasserrechte, Grundbuchauszüge sowie den selbstverpflichtenden Auflagenkatalog zur Errichtung von Erdwärmesonden lt. Strategiepapier Steiermark.

¹⁰⁸ Vgl. GOLDBRUNNER, J.; FERSTL, M.; SONNEK, I.: Seminar - Erdwärmennutzung zur Heizung und Kühlung von Bauwerken. S. 21 bis 22 (Kap. 2).

- Anhang B - Heizlastberechnung und Energieausweis:
Die Heizlastermittlung des Gebäudes dient als Grundlage für die Auslegung der Erdwärmesondenanlage. Sie ist von großer Bedeutung und ist zwingend von qualifizierten Unternehmen durchzuführen. Der Energieausweis ist dabei **nicht** für die Auslegung der Wärmepumpe geeignet.
- Anhang C - Datenblätter zur Wärmepumpenanlage
- Anhang D - Datenblätter zu Bohrmaßnahmen und Tiefensonden
- Planbeilagen:
(Katasterlageplan, Detaillageplan inkl. Darstellung der Sondenstandorte und Anschlussleitungen sowie Abbildung von Fremdleitungen (Wasser, Abwasser))¹⁰⁹

3.3 Grundlagen der Standortbeurteilung

Die Grundvoraussetzung **zur Beurteilung der thermischen Ergiebigkeit** des Untergrunds bilden die geologischen- und hydrogeologischen Verhältnisse. Diese bodencharakteristischen Eigenschaften beeinflussen die entziehbare Energiemenge aus dem Untergrund maßgeblich und sind deshalb als ein entscheidendes Kriterium für die Bemessung einer Erdwärmesondenanlage anzusehen.

Die maßgebenden Kennwerte bezüglich des Wärmeentzugs und der Wärmeeinspeisung werden durch die Wärmeleitfähigkeit λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) und die spezifische Wärmekapazität c ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) von Locker- und Festgestein charakterisiert. Die Wärmekapazitäten nach dem ÖWAV-Regelblatt 207 (siehe Punkt 1.1.6) variieren hier zwischen 0,3 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (für Sand, trocken) und über 6 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (für Chloridgestein). Dabei ist zu beachten, dass diese Werte immer einer gewissen Bandbreite unterliegen und je nach Anwesenheit von Wasser geringer bzw. auch höher liegen können!¹¹⁰

3.3.1 Geologisches Vorprofil bei Anlagen bis 15 kW¹¹¹

Bei kleineren geothermischen Anlagen (z.B. Ein- bzw. Zweifamilienhäuser) wird auf kostenintensive Verfahren zur Ermittlung der relevanten thermophysikalischen Untergrundparameter wie z.B. der Wärmeleitfähig-

¹⁰⁹ Vgl. GOLDBRUNNER, J.; FERSTL, M.; SONNEK, I.: Seminar - Erdwärmennutzung zur Heizung und Kühlung von Bauwerken. S. 32 bis 37 (Kap. 2).

¹¹⁰ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 85.

¹¹¹ Vgl. GOLDBRUNNER, J.: Vorlesungsfolien Geothermie. S. 3. (Oberflächennahe Geothermie - Wärmepumpen (Teil 2/1))

higkeit und der Wärmekapazität verzichtet. Eine solche Anlagenauslegung kann zwar nicht als optimal angesehen werden, stellt aber im Hinblick auf den Planungsaufwand einen guten Kompromiss dar. Somit ist eine **Auslegung** dieser Anlagen **nach Tabellen und Erfahrungswerten** (siehe Punkt 4.2 – Sondenbemessung) als ausreichend zu betrachten.

Werden geologische Schichtenprofile mit einer dementsprechenden schichtenspezifischen Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten verwendet, erhöht dies signifikant die Genauigkeit der erzielbaren Entzugsleistung.¹¹² Aufgrund der enormen zusätzlichen Kosten einer solchen Vorerkundungsmaßnahme (mittels Kernbohrung!) wird aber davon abgesehen. Die „gängige Praxis“ für den privaten häuslichen Gebrauch besteht also aus dem Abschätzen der spezifischen Wärmeleitfähigkeiten und in weiterer Folge der spezifischen Entzugsleistung der Anlage mittels Tabellen sowie Erfahrungswerten.

3.3.2 Geothermal Response Test (GRT) bei Anlagen ab 15 kW¹¹³

Das Response-Verfahren (Geothermal- bzw. Thermal Response Test genannt) ist mittlerweile eine weitverbreitete und universelle Untersuchungsmethode zur Planung und Überprüfung der Standortbedingungen von größeren geothermischen Anlagen (Sondenfelder, etc.) mit einer Leistung von über 15 kW. Es dient zur in-situ- Feststellung der **thermophysikalischen Untergrundparameter**. Dadurch können die für die Auslegung einer Geothermieanlage erforderlichen Kennwerte bestimmt werden. Diese sind:

- die Untergrundtemperatur ϑ (ungestört)
- die Wärmeleitfähigkeit λ und die volumenspezifische Wärmekapazität $\rho * c_p$ des Untergrunds
- der thermische Bohrlochwiderstand R_B sowie
- die Grundwasserabstandsgeschwindigkeit v_a .

Von diesen Parametern lassen sich allerdings lediglich die Temperatur und der Volumenstrom direkt messen. Die übrigen geothermischen Kennwerte werden anhand von physikalisch-mathematischen Konzepten abgeleitet. Dabei stehen zur Ermittlung dieser Werte eine Reihe von unterschiedlichen Messgeräten, Methoden sowie diverse mathematische Auswerteverfahren und physikalische Modelle zur Verfügung. Je nach Erkundungsaufgabe sind anschließend eine geeignete Messanordnung

¹¹² Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 88.

¹¹³ Vgl. GOLDBRUNNER, J.: Vorlesungsfolien Geothermie. S. 3. (Oberflächennahe Geothermie - Wärmepumpen (Teil 2/1))

und ein Auswertungsverfahren zu wählen. Die Bestimmung der Kennwerte erfolgt (in Abhängigkeit des Messverfahrens) entweder über die gesamte Sondenlänge (gemittelter Wert), punktuell in gewissen Tiefen oder als Funktion der Tiefe.¹¹⁴

Weitere Grundlagen und Messprinzip des Thermal Response Tests

Die Erdwärmesonde wird mit einem Wärmeträgermedium beaufschlagt, welches durch eine externe Wärmequelle der GRT-Einheit erhitzt wurde (konstanter Wärmeeintrag!). Dabei wird dieses erhitze Fluid in die Sondenrohre gepumpt und in weiterer Folge die Abkühlung des flüssigen Mediums durch den Untergrund gemessen. Die dadurch entstehende Temperaturdifferenz zwischen Sondenvor- und Rücklauf ist für die Versuchsauswertung wesentlich. Die folgende Abbildungen veranschaulicht das Schema eines Thermal Response Tests.

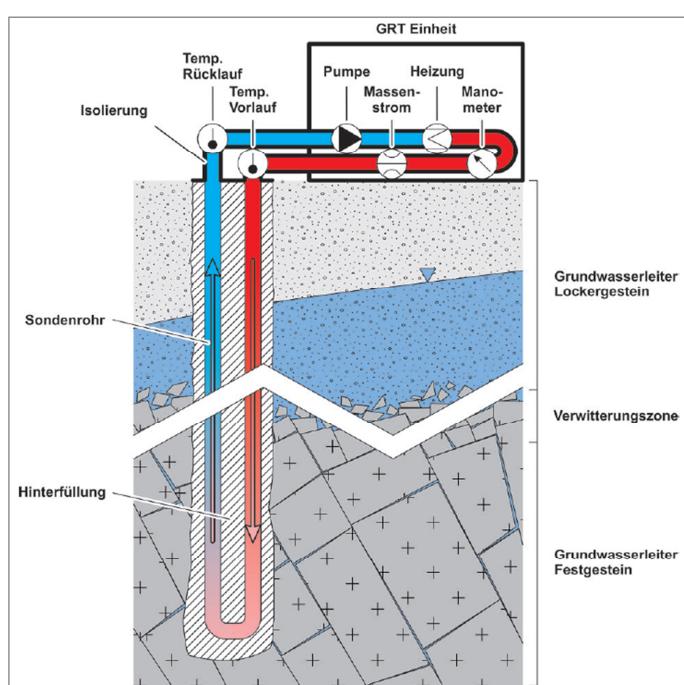


Abbildung 3.4: Schema einer GRT-Einheit¹¹⁵

Der Umlaufvolumenstrom der Trägerflüssigkeit sowie die Ein- und Auslauftemperatur werden als Funktion der Zeit gemessen. Die Temperaturabnahme wird bei dieser Anordnung als gemittelter Wert über die Son-

¹¹⁴ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung, S. 116 und 117.

¹¹⁵ Quelle: SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung, S. 117.

dengesamtlänge angegeben. Möchte man den Verlauf der Temperatur innerhalb der Sonde differenzieren ist dies nur durch zusätzliche Temperaturfühler bzw. mit faseroptischen Messungen möglich (siehe „Enhanced Geothermal Response Test – EGRT“).

Für die Auswertung der Ergebnisse eines Response Tests sind zwei Theorien zu unterscheiden. Die Grundlage der Messauswertung bildet dabei die idealisierte **Linienquellentheorie** (nach Kelvin 1856¹¹⁶), welche einen quasistationären Wärmetransport von der Linienquelle weg voraussetzt und einige Vereinfachungen unterliegt (Ersatz der Untergrundtemperatur durch die mittlere Fluidtemperatur, gemittelter Wert der effektiven Wärmeleitfähigkeit, etc.). Für die Planung ergeben sich daraus bedeutende Einschränkungen. Es kann lediglich die thermische Leitfähigkeit des gemessenen Systems ermittelt werden, ohne dabei die volumetrischen Wärmekapazitäten zu messen. Darüber hinaus wird eine konstante Heizleistung der GRT-Einheit vorausgesetzt. Zudem werden Daten, welche nicht der Bedingung eines quasi-stationären Wärmeflusses entsprechen, von der Auswertung ausgenommen (Mindestzeitkriterium). Der Earth Energy Designer (EED V3.16) sowie andere weitverbreitete Softwarelösungen nutzen sog. G-Funktionen zur Auslegung von Sondenfeldern und basieren auf diesen oben angeführten Vereinfachungen. Aus diesem Grund können solche analytischen Verfahren (verfahrensbedingt) keine Bestimmung der Leitfähigkeit für einzelne Schichten sowie die volumetrische Wärmekapazität bestimmen, weshalb diese Parameter anhand von Normen und Richtlinien abzuschätzen sind.¹¹⁷

Der Ansatz nach der **Zylinderquellentheorie** kann axiale und radiale Wärmeflüsse berücksichtigen. Dabei wird die Größe des axialen Einflusses auf die Messung vor allem durch das Verhältnis der Höhe zum Durchmesser beeinflusst. Die Daten der Linienquellentheorie sind jedoch bei wachsendem axialem Wärmeleitungsanteil mit einem zunehmenden Fehler behaftet. Der Unterschied der beiden Ansätze wird durch die nachfolgende Abbildung anhand einer Doppel-U-Sonde deutlicher veranschaulicht.

¹¹⁶ KELVIN: Compendium of the Fourier Mathematics for the conduction of heat in solids, and the mathematically allied physical subjects of diffusion of fluids and transmission of electrical signals through submarine cables. Quarterly Journal of Mathematics (1). S. -.

¹¹⁷ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 118 bis 129.

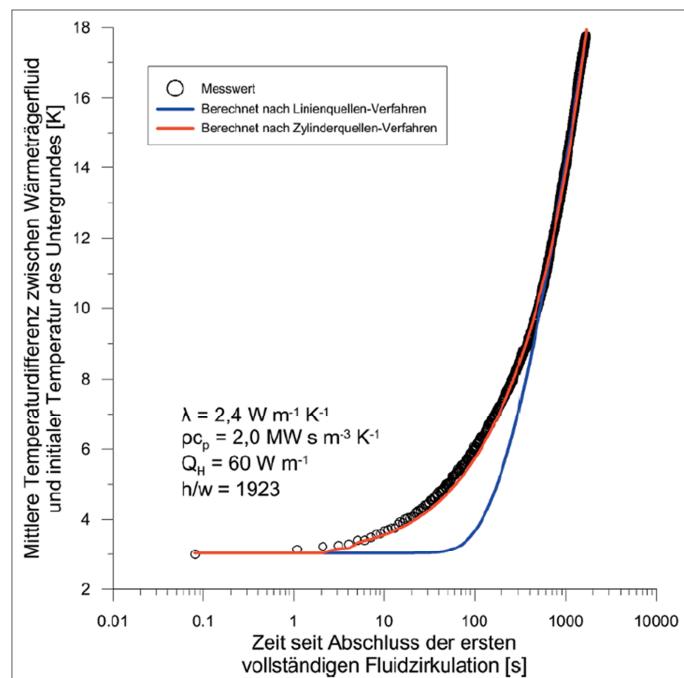


Abbildung 3.5: Unterschied der Linienquellentheorie (blau) zur Zylinderquellentheorie (rot)¹¹⁸

Vor allem ein sehr kleines Verhältnis von Durchmesser zu Länge der U-Sonde lassen die Ergebnisse sehr stark differieren. Einzig der Ansatz nach der Zylinderquellentheorie kann über die gesamte Laufzeit die reale Messkurve abbilden. Eine gute Anpassung der Ergebnisse mit der Linienquellentheorie ist erst nach vielstündiger Versuchsdurchführung bei quasi-stationären Bedingungen (Wärmetransport) zu erreichen. Bei Bauteilen mit ungünstiger Geometrie (Erdwärmekörbe, Energiepfähle) kann der Fehler durch das Linienverfahren allerdings bei über 100 % liegen.

Weitere Vorteile der Zylinderquellentheorie liegen darin, dass dieses Verfahren in jedem geologischen und technischen Zusammenhang (EWS, Energiepfähle, komplexe Strukturen, etc.) genutzt werden kann. Auch die volumetrische Wärmekapazität ist bestimmbar und auf instationäre sowie quasi-stationäre radiale Bereiche der Messkurve anwendbar. Des Weiteren können Messungen unter schwankender Heizleistung, transienten (vorübergehenden) Bedingungen als auch in kürzerer Zeit durchgeführt werden, ohne dabei die Präzision der Auswertung abzumindern.

Bei numerischen Simulationen ist zu bedenken, dass die Wärmeleitfähigkeit sowie die volumetrische Wärmekapazität durch strömendes

¹¹⁸ Quelle: SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 136.

Grundwasser und andere Faktoren wie etwa durch die Hydratationswärme der Sondenverfüllung teilweise erheblich beeinflusst werden. Eine deutliche Überschätzung dieser Parameter kann in weiterer Folge zu fatalen Auslegungsfehlern führen, wodurch ein Abgleich mit Literaturwerten zu empfehlen ist.¹¹⁹

3.3.2.1 Thermischer Bohrlochwiderstand R_B

Ein Geothermal Response Test ermittelt den thermischen Gesamtwiderstand unmittelbar an der Sonde. Die Gesteinseigenschaften können zwar nicht direkt bestimmt werden, jedoch lassen sich indirekte Schlüsse daraus ziehen.

Der GRT ist also eine Aufsummierung thermischer Einzelwiderstände aus dem umliegenden, ungestörten Gebirge und dem Nahbereich der Sonde (Skinzone), der Hinterfüllung, der Rohrwand sowie dem Wärmeträgermedium – also das Resultat aller Teilwiderstände durch sämtliche Bohrlocheinbauten. Durch die Bohrtätigkeit wird die hydraulische und thermische Leitfähigkeit im Nahbereich des Bohrlochs verändert, da dieser Bereich oftmals durch die Hinterfüllsuspension infiltriert wird. In weiterer Folge kommt es zu einer Veränderung des thermischen Bohrlochwiderstands in diesen Bereichen. Der **Skineffekt** kann bezüglich der Leitfähigkeit in diesem Bereich sowohl zu einem negativen als auch zu einem positiven Einfluss führen. Eine positive Beeinflussung ist die Folge von dem Eindringen der (hoch-) leitfähigen Hinterfüllsuspension in den Porenraum infolge Ausspülungsscheinungen der Spülbohrung. Dadurch wird der Widerstand in diesen Bereichen verringert und die Wärmeleitfähigkeit erhöht. Der Skineffekt hat also nennenswerten Einfluss auf den Gesamtwiderstand R_B . Er kann Größenordnungen von etwa 20 % erreichen. Das Bohrverfahren sowie die Ausführung der Bohrung sind demnach von erheblicher Bedeutung und beeinflussen die thermische Leistungsfähigkeit der sonden.

Ein weiterer Vorteil des GRT liegt in der Möglichkeit dieses Verfahren für die Qualitätssicherung zu nutzen. Stehen bereits geothermische Kennwerte zur Verfügung, sind die Testergebnisse dieses Verfahrens nicht nur für die **Bemessung der Sondenanlage** zu verwenden, sondern auch zur **Überprüfung der Ausbauqualität** anhand der nachweisbaren Widerstände geeignet. Werden beispielsweise die Sondenrohre als Rollenware eingebaut, ist davon auszugehen, dass einerseits der Abstand zur Bohrlochwand nicht eingehalten werden kann und es andererseits punktuell bzw. abschnittsweise zu Berührungen der Rohre kommt. Der

¹¹⁹ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 130-139.

Abstand der Sondenrohre beeinflusst jedoch den thermischen Widerstand! Bei einer Halbierung des Rohrabstandes kann sich der thermische Bohrlochwiderstand infolgedessen beinahe verdoppeln.

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass die GRT-Bohrungen geotechnisch und geothermisch vollständig zu untersuchen sind, um die Ergebnisse in den Raum extrapolieren zu können. Die Empfehlungen der Mindestdauer einer solchen Versuchsanordnung liegen (unter Zu grundelegung der Linienquellentheorie) bei etwa 30 bis 100 Stunden. Jedenfalls ist der Versuch solange durchzuführen, bis **quasi-stationäre Verhältnisse** herrschen. Konventionelle GRT's sind allenfalls nach dem **Abklingen der Hydratationswärme** bzw. etwaiger anderer **Störeinflüsse** (Bohrtätigkeit, Wasserentnahmen, etc.) zu starten. Bei Bohrungen von z.B. 150 mm ist mit etwa einer Woche Wartezeit zu rechnen, bis sich die natürlichen Temperaturbedingungen um den Nahbereich des Bohrlochs wieder eingestellt haben.¹²⁰

3.3.3 Enhanced Thermal Response Test (EGRT)

Dieses Verfahren stellt eine Weiterentwicklung des klassischen Thermal Response Tests dar. Herkömmliche Response-Verfahren ermitteln lediglich gemittelte oder punktuelle Messwerte über die gesamte Sondenlänge. Der EGRT hingegen liefert ein Tiefenprofil der Temperatur, der Wärmeleitfähigkeit und des Bohrlochwiderstands.

Zur Messung wird ein Hybridkabel (Zentralader als Zugentlastung, mind. eine Kupferader sowie mind. eine Glasfaser) in Form einer Schleife in das Bohrloch eingebracht, welches dauerhaft im Untergrund verbleibt. Dies hat den Vorteil, dass das Mess- und Auswertungsverfahren jederzeit wiederholt werden kann. Der Wärmeeintrag erfolgt über die Kupferadern, welche an eine konstante Stromquelle angeschlossen sind. Die Temperaturmessung wird mittels faseroptischen Messverfahren (Distributed Temperature Sensing – DTS) unter Verwendung eines Lasers durchgeführt. Dabei kann die Temperatur entlang eines Glasfaserkabels über die gesamte Länge und zu jeder Zeit bestimmt werden. Die Verteilung der Wärmeleitfähigkeit sowie der thermische Bohrlochwiderstand der Sonde sind unter Verwendung der Linien- bzw. der Zylinderquellentheorie als Funktion der Tiefe bestimmbar.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht den Unterschied der Messwertermittlung des GRT zum EGRT anhand einer schematischen Darstellung.

¹²⁰ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 116-140.

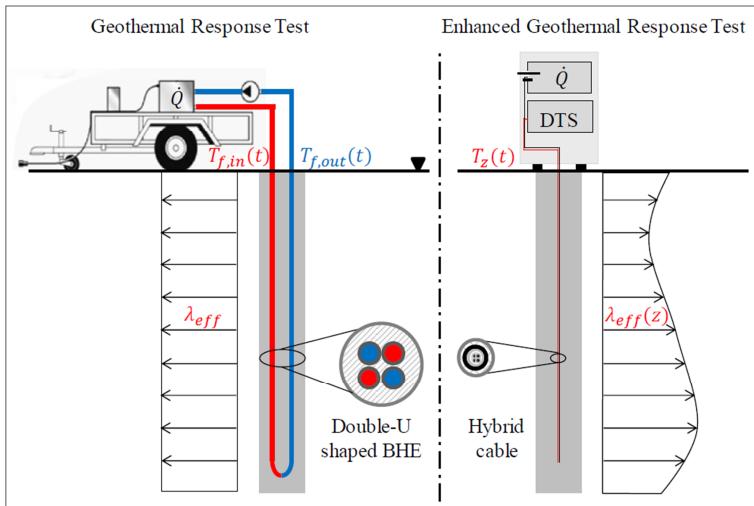


Abbildung 3.6: Schematischer Vergleich einer GRT- und EGRT-Einheit¹²¹

Im Vergleich zum GRT bietet der EGRT also einen **Zugewinn an Informationen**, die bei der Auslegung und Systemoptimierung von größeren Anlagen von Nöten sind. Darüber hinaus eignet sich das Verfahren zur Feststellung der ungestörten Untergrundtemperatur, worauf in weiterer Folge der geothermische Gradient ermittelt werden kann. Die Messergebnisse bieten des Weiteren den Vorteil, dass grundwasserführende Klüfte erkannt sowie Grundwasserleiter von Nicht- bzw. Geringleitern unterschieden werden können.

Die folgende Abbildung bildet die Messergebnisse eines EGRT ab. Dabei wurden Tiefenprofile der effektiven Wärmeleitfähigkeit sowie der ungestörten Untergrundtemperatur aufgezeichnet. Die sprunghafte Erhöhung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von etwa 1 W/(m·K) bei 80 m Tiefe lässt dabei auf einen Grundwasserleiter schließen, der durch die Bohrkleinansprache der Spülbohrung nicht zu erwarten gewesen wäre.¹²²

¹²¹ Quelle: Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1, 2012 (SGP-TR-194).

¹²² Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 144-149.

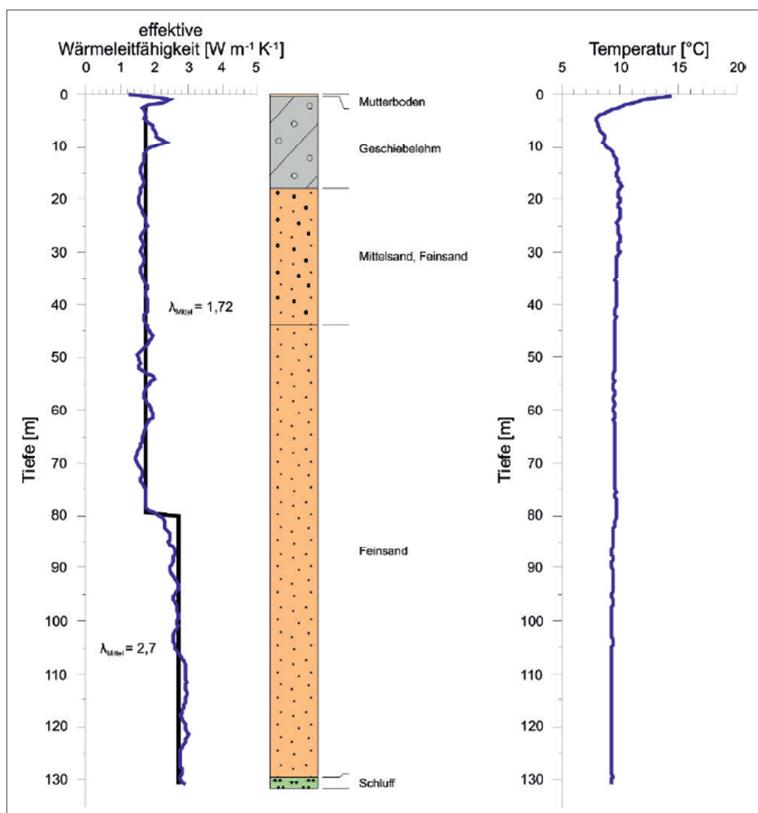


Abbildung 3.7: Messergebnisse eines EGRT - links: effektive Wärmeleitfähigkeit, rechts: ungestörte Untergrundtemperatur¹²³

¹²³ Quelle: SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 147.

4 Bemessung einer Erdwärmesondenanlage

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die Sondenbemessung aufgezeigt und dargestellt. Zunächst wird auf die grundlegenden Faktoren hinsichtlich der Systemauslegung eingegangen, um die Rahmenbedingungen für eine funktionierende Anlage definieren zu können. Anschließend erfolgt ein Überblick über die wichtigsten Dimensionierungsmethoden solcher Erdwärmesondenanlagen. Damit soll vor allem ein Bewusstsein für die Sensibilität im Hinblick auf die Wahl der systemrelevanten Schlüsselfaktoren geschaffen werden, da diese Parameter wesentlich die Entzugsleistung einer Sondenanlage beeinflussen. Abschließend erfolgt eine Darstellung der Sondenbemessung mit Hilfe eines Excel-Berechnungsblattes nach dem ÖWAV-Regelblatt 207¹²⁴, da diese Methode die übliche Auslegungsvariante für den häuslichen Gebrauch darstellt.

4.1 Auslegung von Erdwärmesondenanlagen - Grundlagen

Die Leistungsangaben eines Gebäudes zum Heizen und Kühlen bilden die Grundlage für die Planung, Dimensionierung sowie für die Auslegung einer Erdwärmesondenanlage. Bei der Leistungsermittlung sollte deshalb mit größter Sorgfalt vorgegangen werden, um den tatsächlichen Energiebedarf möglichst realitätsnah abbilden zu können. Die **Wärmebedarfsermittlung** (Heiz- und Warmwasserbereitung) sowie die **Ermittlung des Kühlbedarfs** ist somit ein wichtiges Kriterium für einen langen, störungsfreien Betrieb eines Objektes.

Abweichungen vom Wärmebedarf, insbesondere ein größerer Bedarf, als jener Wert aus der Heizlastermittlung, ergibt längere Jahresbetriebsstunden der Wärmepumpe. Dadurch kommt es in weiterer Folge i.d.R. zu massiven Auskühlungsscheinungen in der Sondeenumgebung, was irreversible Schäden der Anlage nach sich ziehen kann.¹²⁵

Hinsichtlich der **Bemessung** von Erdwärmesonden ist sicherzustellen, dass diese die erforderlichen Energiemengen über die gesamte Lebensdauer bereitstellen können, ohne die Sondeenumgebung dabei unter den Gefrierpunkt abzukühlen bzw. unzulässig zu erwärmen. Um dieser Forderung nachzukommen, dürfen die Grenzwerte der mittleren Wärmeträgertemperatur (Mittelwert aus EWS Ausgangs- zu EWS Eingangstemperatur) nach Erreichen eines erneuten Gleichgewichtszustands **-1,5 °C** im Lastfall Heizen nicht unterschreiten sowie **+30 °C** im Lastfall Kühlen nicht überschreiten.

¹²⁴ Excel-Berechnungsblatt (RB_207_2_Bemessung_Erdwärmesonden.xls, Stand: Oktober 2010).

¹²⁵ Vgl. SCHWEIZERISCHER INGENIEUR- UND ARCHITEKTENVEREIN: SIA 384/6 - Erdwärmesonden. S. 28.

Wird die **maximal zulässige Entzugsleistung** (bzw. Jahresentzugsarbeit) jedoch überschritten, ist mit Unterkühlungserscheinungen und häufigen Frost-Tau-Wechseln um die Sonden zu rechnen. Es kommt dadurch zu Gefriererscheinungen des Verfüllbaustoffes, weshalb in weiterer Folge Risse entstehen. Die Rissbildung wiederum kann eine Abnahme der Festigkeit und Abdichtfunktion der Sondenverpressung verursachen, wodurch mit einer wesentlichen Verringerung des Wirkungsgrads der Wärmepumpe zu rechnen ist.

Für die **thermische Regeneration** des Untergrunds ist des Weiteren ein Heiz- und Kühlbetrieb vorteilhaft, da nicht nur Energie entzogen, sondern auch wieder rückgeführt wird. Die erzielbare Kühlleistung liegt bei freier (passiver bzw. indirekter) Kühlung bei **ca. 15 bis 30 W/m** bzw. bei etwa 50 % der Entzugsleistung des Lastfalls Heizen. Unter Verwendung einer reversiblen Wärmepumpe (aktive bzw. direkte Kühlung) sind Kühlleistungen **bis zu 80 W/m** erreichbar.

Bei der Auslegung der **Umwälzpumpe** ist darauf zu achten, dass die ermittelte Temperaturspreizung lt. Bemessung eingehalten wird. Eine energieeffiziente Pumpenauslegung hat wesentlichen Einfluss auf die Jahresarbeitszahl.¹²⁶

4.2 Sondenbemessung nach ÖWAV-Regelblatt 207

Die Bemessung von Erdwärmesondenanlagen kann lt. ÖWAV-Regelblatt 207 (2009) nach folgenden Methoden erfolgen:

1. Bemessung anhand der Betriebsdaten bestehender Anlagen
2. Bemessung nach der VDI 4640 – Thermische Nutzung des Untergrunds
3. Bemessung nach der SIA 384/6 – Erdwärmesonden
4. Bemessung von Sondenfeldern anhand numerischer Modelle (größere Anlagen >15 kW)

Bemessung nach den Betriebsdaten eines Gebäudes

Bei vergleichbaren Standortbedingungen können Erdwärmesonden anhand der spezifischen Entzugsleistung bestehender Anlagen bemessen werden. Als Voraussetzung dafür müssen allerdings nachvollziehbare Daten vorhanden sein, welche belegen, dass die erforderlichen Grenztemperaturen des Wärmeträgermediums eingehalten wurden. Dabei soll-

¹²⁶ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 34 und 35.

ten Betriebsdaten über einen Zeitraum von zwei Jahren vorliegen und für jede Heizperiode mindestens folgende Daten enthalten:

- Jahresbetriebsstunden Heizen
- Temperaturaufzeichnungen der minimalen Vor- und Rücklauftemperaturen des Wärmeträgermediums bei Anlagenbetrieb (möglichst wöchentlich)
- Stromverbrauch der Wärmepumpe sowie der ev. elektrischen Zusatzheizung bei monoelektrischen Anlagen
- Betriebsstunden für die Kühlung bei Anlagen im Heiz- und Kühlbetrieb

Die mittlere Untergrundtemperatur ist bei Inbetriebnahme der Wärmepumpe festzuhalten. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass unterschiedliche Betriebsbedingungen aufgrund abweichender Anlagenauslegung (z.B. hinsichtlich Sondenabständen, Jahresbetriebsstunden, etc.) gesondert zu berücksichtigen sind.

Bemessung nach der VDI 4640 – „Thermische Nutzung des Untergrunds“

Liegen keine konkreten Kenntnisse über die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds am Anlagenstandort vor, kann die spezifische Entzugsleistung für **Einzelsonden** anhand von Tabellenwerten der VDI 4640 ermittelt werden. **Die Anwendung dieser Tabelle setzt allerdings voraus, dass die Wärmeleitfähigkeit der Bohrlochhinterfüllung auf dem Niveau des umgebenden Gebirges liegt.** Da dies nur durch thermisch verbesserte Verfüllsuspensionen gewährleistet werden kann, sind im Falle von verwendeten Baustellenmischungen diese Tabellenwerte abzumindern.

Des Weiteren ist zu beachten, dass der Anwendung dieser Norm ein Betrieb der Erdwärmesondenanlage **ohne Kühlung** bei 1800 bis 2400 Wärmepumpen-Betriebsstunden pro Jahr mittels **Doppel-U-Rohrsonden** zugrunde gelegt wird. Kommt es zu einer Überschreitung der Jahresbetriebsstunden durch erhöhten Wärmebedarf (Warmwasserbereitung, Pool, extreme Klimazonen, etc.), sind die Werte der spezifischen Entzugsleistung so weit abzumindern, dass die errechnete maximal zulässige Jahresentzugsarbeit (= Entzugsleistung mal 1800 bzw. 2400 h/a) nicht überschritten wird. Darüber hinaus ist bei der Verwendung dieser Tabellenwerte darauf zu achten, dass plausible, den Untergrundverhältnissen angepasste Entzugsleistungen angesetzt werden, wobei eine Überschreitung der Angaben nicht zulässig ist.¹²⁷ Die folgende Tabelle

¹²⁷ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 35-36.

veranschaulicht die spezifische Entzugsleistung in Abhängigkeit der Gesteinsart und der Wassersättigung.

Tabelle 4.1: Spezifische Entzugsleistungen bei Anlagen mit einer Bohrung nach der VDI 4640¹²⁸

| Untergrund | spezifische Entzugsleistung: | |
|--|-------------------------------------|---------------------|
| | bei 1800 h/a | bei 2400 h/a |
| Allgemeine Richtwerte: | | |
| schlechter Untergrund (trockenes Sediment: $\lambda < 1,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) | 25 W/m | 20 W/m |
| normaler Festgestein-Untergrund und wasser- gesättigtes Sediment ($\lambda = 1,5 - 3,0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) | 60 W/m | 50 W/m |
| Festgestein mit hoher Leitfähigkeit ($\lambda > 3,0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) | 84 W/m | 70 W/m |
| Einzelne Gesteine: | | |
| Kies, Sand, trocken | < 25 W/m | <20 W/m |
| Kies, Sand, wasserführend | 65 – 80 W/m | 55 – 65W/m |
| Ton, Lehm, feucht | 35 – 50 W/m | 30 – 40 W/m |
| Kalkstein massiv | 55 – 70 W/m | 45 – 60 W/m |
| Sandstein | 65 – 80 W/m | 55 – 65 W/m |
| saure Magmatite (z.B. Granit, Gneis) | 65 – 85 W/m | 55 – 70 W/m |
| basische Magmatite (z.B. Basalt) | 40 – 65 W/m | 35 – 55 W/m |
| Die angegebenen Werte können durch Gesteinsausbildung wie Klüftung, Schieferung, Verwitterung wesentlich schwanken. | | |

Eine Sondenauslegung nach dieser Tabelle lässt allerdings keinen Rückschluss der spezifischen Entzugsleistung in Abhängigkeit der Standorthöhe zu. Die Höhe des Standorts beeinflusst jedoch die vorherrschenden Bodentemperaturen, was sich wiederum auf die Jahresbetriebsstunden der Heizanlage auswirkt.¹²⁹ Dabei gilt, je höher der Anlagenstandort, desto größer sind die Betriebsstunden der Wärmepumpe anzusetzen. Abschließend muss darauf hingewiesen werden, dass sich die Zuordnung des Standortes bezüglich der spezifischen Entzugsleistungen der einzelnen Gesteine ohne Vorkenntnisse des Untergrunds als schwierig darstellt und deswegen mit **großen Unsicherheiten** behaftet ist.¹³⁰

¹²⁸ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 36.

¹²⁹ Vgl. GÖTZL G., O. V. et al.: GEO-Pot: Seichtes Geothermie Potenzial Österreichs - Potenzialstudie. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 5/2010. S. 126.

¹³⁰ Vgl. ASCHAUER, J.: Auswertung der Betriebsdaten von Erdwärmesonden und Ableitung des Wärmeleitfähigkeitskatasters Oberösterreich. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62/Juni 2010. S. 89.

Bemessung nach der SIA 384/6 – „Erdwärmesonden“

Bei näherer Kenntnis der thermophysikalischen Untergrundparameter, im Speziellen der Wärmeleitfähigkeit, kann die Sondenauslegung anhand des vereinfachten Berechnungsverfahrens für einfache Anlagen nach der Schweizer Norm erfolgen.¹³¹

Die Wärmeleitfähigkeit der Sondenumgebung (umgebendes Gebirge) hat großen Einfluss auf die Leistung der Erdwärmesonde. Dabei spielt die Wärmekapazität (Vermögen eines Körpers, thermische Energie zu speichern) eine eher untergeordnete Rolle. Für die Bemessung kann die Normleistung von **Doppel-U-Rohr-Sonden** (Duplex-Sonden mit einem Durchmesser von 32 und 40 mm) anhand von Tabellen in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit sowie der spezifischen volumetrischen Wärmekapazität des Untergrunds bestimmt werden. Eine Berücksichtigung von Einfach-U-Rohr-Sonden (Simplex-Sonden), welche in Österreich häufig verbaut werden, ist durch die Miteinbeziehung eines **Korrekturfaktors (KF 1)** möglich. Aufgrund der geringeren Oberfläche dieses Sondentyps ist die Leistungsausbeute geringer und muss deshalb durch einen Längenzuschlag kompensiert werden. Eine Duplex-Sonde mit dem Durchmesser 40 mm leistet dabei um 5 % mehr als eine Duplex-Sonde mit 32 mm. Die Längenzuschläge sind dabei in Abhängigkeit der Temperaturspreizung bzw. des Durchflusses anhand eines Diagrammes auszuwählen. Bei Wärmeleitfähigkeiten des Untergrunds im Bereich von **2,0 bis 3,0 W/(m·K)** liegen die Zuschläge je nach Temperaturspreizung bei etwa **16 bis 29 %** für Simplex-Sonden. Ein zusätzlicher Aufschlag auf die Sondenlänge entsteht durch die Berücksichtigung der Jahresbetriebszeit, der Wärmeleitfähigkeit sowie der Anordnung der EWS durch einen weiteren Korrekturfaktor **(KF 2)**. Somit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass es aufgrund verschiedener Betriebsstunden, Sondenabstände (5 bis 10 m) und Sondenanzahlen (1 bis 4 EWS als auch 2 x 2 EWS) sowie variiierenden Wärmeleitfähigkeiten zu Längenzuschlägen kommt. Des Weiteren bietet die Schweizer Norm im Gegensatz zur Deutschen Ausführung die Möglichkeit, die Jahresbetriebsstunden der Wärmepumpenanlage in Abhängigkeit der Standorthöhe zu berücksichtigen.¹³²

Bemessung anhand numerischer Modelle

Für die Bemessung größerer geothermischer Anlagen ab 15 kW (Sondenfelder, etc.) ist eine numerische Modellabbildung unerlässlich. Darunter fallen insbesondere komplexe Anlagenauslegungen zum Heizen

¹³¹ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 36 und 37.

¹³² Vgl. SCHWEIZERISCHER INGENIEUR- UND ARCHITEKTENVEREIN: SIA 384/6 - Erdwärmesonden. S. 42-52.

und Kühlen (z.B. Mehrfamilienhäuser, Einkaufzentren, usw.). Auf diese Weise können unter anderem gegenseitige Beeinflussungen mehrerer Anlagen sowie deren thermischen Auswirken auf die Grundwasserströmung untersucht werden.

Die Basis für die Modellierung bilden die Erkenntnisse aus der Untergrunderkundung mittels Thermal Response Tests (TRT bzw. EGRT) durch eine Pilotbohrung. Dabei sind die gewonnenen geophysikalischen Parameter (u.a. die Temperaturprofile der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität sowie der thermische Bohrlochwiderstand) als Datengrundlage heranzuziehen. Der Zeitraum bis zum Erreichen eines erneuteten thermischen Gleichgewichtszustandes im Untergrund ist durch die numerische Modellierung abzudecken und beträgt in der Regel 5 bis 50 Jahre.¹³³ Für die Auswahl einer geeigneten Simulationssoftware sollte abgeklärt werden, ob der Wärmetransport dominant über Wärmeleitung (konduktiv) oder gekoppelt (konduktiv-konvektiv unter Beteiligung von strömendem Grundwasser) erfolgt.

Die Grundlagen der Response-Testverfahren sind dem Punkt 3.3 zu entnehmen.

Die folgenden zwei Tabellen geben einen Überblick über die gängigen Planungsprogramme und numerischen Softwarelösungen.

Tabelle 4.2: Planungsprogramme zur Auslegung geothermischer Anlagen¹³⁴

| Name | Quelle | Methode | Kurzbeschreibung | Kosten ca. |
|--|--|----------------------|--|-----------------------|
| Earth Energy Designer (EED) | www.buildingphysics.com | Analytisch-empirisch | Auslegungstool für Erdwärmesonden | 900 € |
| Erdwärme-sonde | www.berndglueck.de | FVM | Auslegungstool für Erdwärmesonden | Freeware |
| Erdwärme-kollektor | www.berndglueck.de | FVM | Auslegungstool für Erdwärmekörbe | Freeware |
| EWS | www.hetag.ch | Analytisch-numerisch | Auslegungstool für Erdwärmesonden | ca. 1.200 bis 2.700 € |
| Tempfeld | www.tempfeld.de | Analytisch | überschlägige Berechnung von Kälte-/Wärmefahnen im Grundwasser | 250 € |
| GWP SF 0905 (für Excel) | www.um.baden-wuerttemberg.de | Analytisch | überschlägige Berechnung von Kälte-/Wärmefahnen im Grundwasser | Freeware |
| Engineering Equation Solver (EES) | www.fchart.com | | Universeller thermodynamischer Gleichungslöser | ca. 450 bis 900 € |
| Ground Loop Designer (GLD) | www.groundloopdesign.com | | Analytische Berechnungssoftware in Stundenauflösung für EWS Felder und Kollektoren, Berechnung von Rohrleitungsverlusten, Wirtschaftlichkeitsanalyse, CO ₂ Bilanz | ca. 3.150 € |

¹³³ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 37.

¹³⁴ Quelle: SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 95.

Tabelle 4.3: Simulationssoftware zur Auslegung geothermischer Anlagen¹³⁵

| Name | Quelle | Methode | Kurzbeschreibung | Kosten ca. |
|---------------------|--|---------|--|---------------------------------------|
| Geologic SF | www.geologik.com/sf | | Numerische FE Software 2½ D Simulation von Geothermiefeldern, Berücksichtigung von Grundwassereinfluss, Berechnung der thermischen Ausbreitung, freie Sondenanordnung, Energiebilanz unter Berücksichtigung der WP Kennlinie | 3.000 € |
| FEFLOW | www.feflow.info | FEM | 3D Strömung, Massen- und Energietransport einschließlich Pre- und Postprocessing, | 7.000 € |
| HEAT2/HEAT3 package | www.buildingphysics.com | FDM | 3D Energietransport rein konduktiv einschließlich Pre- und Postprocessing | 2.000 € |
| SHEMAT | www.springer.com | FDM | 3D Strömung, reaktiver Massen- und Energietransport einschließlich Pre- und Postprocessing auf Basis von Processing Modflow | 290 € |
| SPRING++ | http://spring.delta-h.de | FEM | 3D Strömung, Massen- und Energietransport einschließlich Pre- und Postprocessing | 5.500 € |
| TOUGH2 / PETRASIM | http://esd.lbl.gov | FDM | 3D Strömung, Energie- und Mehrphasenmassen-transport | ab ca. 3.000 € |
| TRADIKON-3D | www.bgu-geoservice.de | FDM | 3D Strömung und Energietransport einschließlich Phasenwechsel von Wasser, Fortran Quelle und Binary | Freeware |
| RockFlow | www.rockflow.de | FEM | 3D Strömung, Massen- und Energietransport | Freeware für nichtkommerzielle Zwecke |
| Abaqus | www.simulia.com | FEM | 3D-FEM Simulationspaket (u. a. Wärmetransport) | |

¹³⁵ Quelle: SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 96.

4.2.1 Bemessungsbeispiel nach dem ÖWAV-Regelblatt 207

Die Bemessung von Erdwärmesonden kleinerer Anlagen (< 15kW) erfolgt in Österreich nach dem ÖWAV-Regelblatt 207 in Anlehnung an die Schweizer Norm „SIA 384/6 - Erdwärmesonden“. Das dafür notwendige Excel-Berechnungsblatt kann über den Verein des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes freizügiglich bezogen werden. Für den Bemessungsvorgang dient der Inhalt der SIA 384/6 in der jeweils gültigen Form als Grundvoraussetzung.

Im Folgenden wird ein Beispiel für eine Sondenbemessung eines Einfamilienhauses dargestellt, um einerseits den Bemessungsablauf grundlegend abzubilden und anderseits eine Gegenüberstellung der Auslegungsvarianten einer Doppel-U-Rohrsonde im Vergleich zu einer Einfach-U-Rohrsonde zu ermöglichen. Für den Bemessungsvergleich wurden die Parameter der Gebäudedaten (Heizen und Kühlen), der Warmwasseraufbereitung, der Sperrzeit, der Sondenanzahl sowie die spezifische Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds in gleicher Größe angesetzt, um einen Variantenvergleich gewährleisten zu können.

Beschreibung des Berechnungsablaufs

Zu Beginn des Berechnungsblattes werden die Daten aus der Energiebedarfsermittlung des Objektes (Heiz- und Kühlbedarf, Warmwasseraufbereitung sowie sonstige Verbräuche) als Grundlage für die Bemessung herangezogen und eingetragen. Die Auslegung der Wärmepumpe erfolgt nach den jeweiligen Normen (siehe Berechnungsblatt). Die Heizleistungen der Betriebspunkte (B0/W35 sowie B0/W55) sowie die elektrische Leistungsaufnahme sind dem Datenblatt des Herstellers zu entnehmen. Anschließend ist die spezifische Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds, möglichst anhand eines geologischen Vorprofils, zu ermitteln. Dabei ist darauf zu achten, dass dieser gemittelte Wert nicht zu hoch (realitätsnah!) angesetzt wird, da dieser Parameter einen direkten Einfluss auf die zu entziehende Leistung der Sonde nach sich zieht.

Achtung:

Zu gering angesetzte Leistungsdaten eines Gebäudes führen zu einer falschen Anlagenauslegung und beeinträchtigen wesentlich die Effizienz der Anlage!

Danach erfolgt die Ermittlung der spezifischen Entzugsleistung für eine Doppel-U-Rohr-Sonde (Durchmesser 32 bzw. 40 mm) anhand der in der SIA 384/6 abgebildeten Diagramme.¹³⁶ Dabei kann eine Leistungsanpassung für Einfach-U-Rohr-Sonden durch einen Korrekturfaktor (KF 1) implementiert werden, um den Leistungsunterschied dieser Sondenausführung mit Hilfe eines Längenzuschlages zu kompensieren. Ein weiterer Zuschlag auf die Sondenlänge entsteht durch die Abhängigkeit der Betriebsstunden zur Anordnung und Entfernung der Erdwärmesonden bei einer gewissen Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds. Dieser Zuschlag

¹³⁶ SCHWEIZERISCHER INGENIEUR- UND ARCHITEKTENVEREIN: SIA 384/6 - Erdwärmesonden. S. 43-51 (Figur 7-19).

wird ebenfalls durch einen Korrekturfaktor (KF 2) berücksichtigt. Nach Eingabe der Bodenoberflächentemperatur (beeinflusst die Entzugsleistung der Sonde), des Temperaturgradienten sowie der mittleren Auslegungstemperatur der Erdwärmesonden erfolgt eine iterative Berechnung der Sondenlänge. Diese Iteration wird so lange durchgeführt, bis sich die EWS-Länge gegenüber dem vorherigen Rechenschritt um nicht mehr als 5 m ändert.

Abschließend erfolgt eine hydraulische Bemessung für Doppel-U-Rohrsonden zur Unterscheidung von laminaren bzw. turbulenten Strömungsverhältnissen, da bei laminaren Strömungen im Rohrsystem die Solentemperatur etwa um 1,5 K absinkt und der Stromverbrauch der Wärme pumpe um ca. 4,5 % zunimmt.¹³⁷

Die folgende Abbildung stellt den Ablauf einer solchen Sondenbemessung dar. Zusätzlich wurde ein Vergleich zwischen Simplex- und Duplex-Sonden implementiert, um den Unterschied dieser Auslegungsvarianten im Hinblick auf die Sondenlänge zu veranschaulichen.

¹³⁷ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage, S. 58 bzw. Excel-Berechnungsblatt (Bemessung Erdwärmesonden – Stand Oktober 2010), Quelle: http://www.oewav.at/Page.aspx_param_target_is_65687.v.aspx.

| Sondenbemessung nach ÖWAV Regelblatt 207, Anhang 4 Bemessung von EWS in Anlehnung an SIA 384/6, 1. Auflage 11-2009 | | | | Eingabefeld |
|---|-----------------|-----------------------|-----------------------|--|
| Variantenvergleich: Doppel-U-Sonde (Duplex 32) zu Einfach-U-Sonde (Simplex 40) | | | | Autoberechnung |
| Bezeichnung: Gebäudefuden Heizen: siehe ÖWAV-Regelblatt 207, Pkt. 5.2.1 | Einheit: | Wert: 2-fach-U | Wert: 1-fach-U | Bemerkungen: |
| 1 beheizte Wohnfläche | [m²] | 200 | 200 | |
| 2 erforderliche Heizleistung | [kW] | 9,4 | 9,4 | ...Wert für Bemessung der WP, EWS |
| 3 spezifische Heizleistung | [W/m²] | 47 | 47 | aus Berechnung bzw. SIA 384/6, Fig. 10 |
| 4 Jahresbetriebsstunden Heizen | [h/Jahr] | 1.900 | 1.900 | ...1. Wert Energiebedarf |
| 5 erforderl. Jahresheizwärmebedarf | [kWh/Jahr] | 17.860 | 17.860 | |
| 6 Energiekennzahl | [kWh/(m² Jahr)] | 89 | 89 | |
| Warmwasserbereitung: sieh ÖWAV-Regelblatt 207, Pkt. 5.2.3 | | | | |
| 7 Einwohner | [E] | 4 | 4 | mind. 0,25 kW/E |
| 8 spez. Leistung Warmwasserbereitung mit WP | [kW/E] | 0,3 | 0,3 | ...Wert für Bemessung der WP, EWS |
| 9 Leistung Warmwasserbereitung mit WP | [kW] | 1,2 | 1,2 | 2-4 kWh/E, Tag bei durchschn. Benutzerverhalten |
| 10 spez. Energiebedarf Warmwasserbereitung | [kWh/(E*d)] | 3 | 3 | |
| 11 davon mit WP | [kWh/(E*d)] | 3 | 3 | |
| 12 davon elektrisch, mit Solaranlage, etc. | [kWh/(E*d)] | 0 | 0 | |
| 13 Energiebedarf Warmwasserbereitung mit WP | [kWh/Jahr] | 4.380 | 4.380 | ...2. Wert Energiebedarf |
| Sperrzeit: siehe ÖWAV-Regelblatt 207, Pkt. 5.2.1 | | | | |
| 14 Sperrzeit des EVU | [h] | 1 | 1 | ...Wert für Bemessung der WP, EWS |
| 15 Zuschlag für Sperrzeit des EVU | [kW] | 0,46 | 0,46 | |
| Gebäudefuden Kühlen: siehe ÖWAV-Regelblatt 207, Pkt. 5.2.2 | | | | |
| 16 erforderl. Kühlleistung: nur für freie Kühlung | [kW] | 2 | 2 | > aus ÖNORM EN 15255 oder ÖNORM H 6040 |
| 17 erforderl. Jahreskühlarbeit | [kWh/Jahr] | 1.000 | 1.000 | ...3. Wert Energiebedarf |
| Bemessung der Wärmepumpe | | | | |
| 18 erforderl. Leistung WP | [kW] | 11,06 | 11,06 | |
| 19 gewählte Heizleistung bei B0/W35 | [kW] | 11,00 | 11,00 | > aus ÖNORMEN EN 12831 und ÖN H7500 |
| 20 gew. Heizleistung bei B0/W50 (Warmwasser) | [kW] | 10,20 | 10,20 | aus Datenplatt der WP |
| 21 elektr. Leistungsaufnahme bei B0/W35 | [kW] | 2,40 | 2,40 | ...Wert zur Bestimmung der EWS-Länge |
| 22 Entzugsleistung aus EWS bei B0/W35 (EL 1) | [kW] | 8,60 | 8,60 | |
| Bemessung der Erdwärmesonden | | | | |
| 23 Energiebedarf Heizen und Warmwasserbereitung | [kWh/Jahr] | 21.240 | 21.240 | ...Energiebedarf abzüglich freier Kühlung |
| 24 Jahresbetriebsstunden WP Heizen und Kühlen | [h] | 1.533 | 1.533 | |
| 25 Jahresbetriebsstunden WP Warmwasser | [h] | 429 | 429 | |
| 26 Jahresbetriebsstunden WP Summe | [h] | 1962 | 1.962 | |
| 27 Wärmeleitfähigkeit | [W/m.K] | 2,5 | 2,5 | |
| 28 Sondenrohre | | Duplex 32 | Simplex 40 | |
| 29 spez. Entzugsleistung (EL 2) | [W/Bohrmeter] | 37,5 | 39,5 | Entzugsleistung der Duplex-Sonden! aus ÖWAV RB 207 bzw. SIA 384/6 Fig. 7 u. 8 |
| 30 Anzahl der EWS | [Stk.] | 2 | 2 | |
| 31 Sondenabstand | [m] | 10 | 10 | aus SIA 384/6, Fig.9 |
| 32 Korrekturfaktor (Zuschlag) für Simplex-EWS (KF 1) | [-] | 0,00 | 0,18 | aus SIA 384/6, Fig. 11 bis 19 |
| 33 Korrekturfaktor (Zuschlag) Jahresbetriebsstunden, Sondenabstand (KF 2) | [-] | 0,06 | 0,06 | ...1. EWS-Länge (EL1*KFen/EL2*EWS-Anz.) |
| 34 Sondenlänge (Vorbemessung) | L EWS 1 [m] | 122 | 136 | Regressionsgerade ZAMG - 0,5 K |
| 35 Höhe über Meer | [müA.] | 405 | 405 | |
| 36 Bodenoberflächentemperatur Heizen* | [°C] | 10,4 | 10,4 | |
| 37 Temperaturgradient | [K/m] | 0,030 | 0,030 | |
| 38 mittl. Auslegetemperatur EWS | [°C] | -1,5 | -1,5 | |
| 39 Bodentemperaturdifferenz | [K] | 13,7 | 13,9 | |
| 40 Sondenlänge | L EWS 2 [m] | 102 | 113 | |
| 41 Bodentemperaturdifferenz | [K] | 13,4 | 13,5 | |
| 42 Sondenlänge | L EWS 3 [m] | 104 | 116 | |
| 43 Bodentemperaturdifferenz | [K] | 13,4 | 13,6 | |
| 44 Sondenlänge mit Korrekturfaktoren | L EWS 4 [m] | 104 | 115 | |
| 45 spez. Entzugsleistung mit Korrekturfaktoren | [W/Bohrmeter] | 41 | 37 | |
| 46 spez. Entzugsarbeit ** | [kWh/(m² Jahr)] | 79 | 72 | 80 - 100 kWh/(m² Jahr) |
| Hydraulik für Duplex - EWS | | | | |
| spez. Wärmekapazität Frostschutz bei 0°C | [kJ/kg.K] | 4,04 | 3,86 | 3,88 |
| | [kJWh/kg^K] | 0,00112 | 0,00107 | 0,00108 |
| Dichte Frostschutz | [kg/m³] | 1.035 | 969 | 1.030 |
| Durchfluss bei Differenz von 3 K | [l/h] | 2.466 | 2.757 | 2.580 |
| Durchfluss je Sonde bei Parallelschaltung | [l/h] | 1.233 | 1.378 | 1.290 |
| kinematische Viskosität bei 0°C | [mm²/s] | 3,49 | 4,29 | 5,97 |
| kinematische Viskosität bei 5°C | [mm²/s] | 2,80 | 3,60 | 4,50 |
| Innendurchmesser Sondenrohre | [mm] | 24,6 | 24,6 | 24,6 |
| Strömungsgeschwindigkeit in Sondenrohren | [m/s] | 0,36 | 0,40 | 0,38 |
| Reynold-Zahl (Re krit. = 2320) | [-] | 2.541 | 2.311 | 1.554 |
| Strömungsverhältnisse bei 0°C*** | | Turbulent | Laminar | Laminar |
| | | | | Turbulent |

* berechnet mit Regressionsgerade der Datenreihen 1997 bis 2007 von ca. 150 österr. Bodentemperaturnmesstellen der ZAMG in Abhängigkeit von Höhe über Meer (Götzl,GBA, 2009). Wegen der geringen Streuung der Datenpunkte um die Regressionsgerade (Bestimmtheit

** 80 - 100 kWh/(m² Jahr): Technisches Merkblatt T1 AWP Schweiz

*** Strömungsverhältnisse sollen turbulent sein; SIA 384/6, D5: wenn laminar, wird Sole um 1,5 K kälter und Stromverbrauch der WP steigt um 4,5%

Der ÖWAV und die Verfasser übernehmen keine wie auch immer geartete Haftung für die Richtigkeit der Ergebnisse bei der Verwendung dieses Excel Spreadsheets

Abbildung 4.1: Sondenbemessung nach dem ÖWAV Regelblatt 207 (Vergleich Simplex/Duplex-Ausführung)¹³⁸

¹³⁸ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 58.

Der Vergleich der durchgeföhrten Auslegungsvarianten in der oben angeführten Abbildung zeigt den Unterschied zwischen Simplex- und Duplex-Sonden auf. Dabei ist erkennbar, dass die Doppel-U-Rohr-Ausführung (Durchmesser 32 mm) 11 m Sondenlänge pro Erdwärmesonde gegenüber der Einfach-U-Rohr-Variante (Durchmesser 40 mm) einspart. Bei zwei Tiefensonden ergibt sich daraus also eine Längersparnis von 22 m. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass sich turbulente Strömungsverhältnisse bei den gegebenen Randbedingungen der Wärmeträgermedien bei einer Doppel-U-Rohr-Ausführung nur mit dem Durchmesser 32 mm bei Ethylenglykol (20 %) sowie Wasser (5 °C) einstellen. Bei der Verwendung von Duplex-Sonden mit dem Durchmesser 40 mm ist überhaupt nur Wasser (5 °C) im Stande, turbulente Verhältnisse herzustellen.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass neben den Energiekennwerten eines Gebäudes, die richtige Ermittlung der Entzugsleistung und der Korrekturfaktoren (KF1 & KF2) bei der Bemessung von Erdwärmesonden nach dem ÖWAV-Berechnungsblatt eine maßgebende Rolle zuzuschreiben ist. Fehlerhafte Werte und Faktoren resultieren in einer zu kurzen Sondenlänge, wodurch Anlagenschäden und Effizienzminderungen hervorgerufen werden können.

5 Technische Ausführung von Erdwärmesonden

Dieses Kapitel stellt wichtige Erkenntnisse dar, die bei der technischen Realisierung einer geothermischen Sondenanlage für den häuslichen Gebrauch notwendig sind.

Zu Beginn wird auf allgemeine Grundlagen der Anlagenauslegung eingegangen. Der Hauptteil des Kapitels widmet sich schließlich der Bemessung sowie der Ausführung von Erdwärmesondenanlagen, um die Basis für eine technisch richtig ausgelegte Heizanlage mittels Tiefensonden zu gewährleisten.

5.1 Bohrverfahren

Die Bohrverfahren können grundsätzlich in Trockenbohrverfahren und Spülbohrverfahren (mittels Wasser oder Luft) unterteilt werden. Dabei kann die Bohrtiefe durch rammende, schlagende, drehende sowie dreh-schlagende Techniken erreicht werden. Je nach Standortbedingungen, geologischer Beschaffenheit des Untergrunds, Tiefe und Durchmesser der Bohrung, kommen verschiedene Bohrverfahren zur Anwendung.¹³⁹

Bei der Errichtung von Erdwärmesonden werden in erster Linie kleinkalibrige direkte Spülbohrverfahren mit einem Durchmesser von etwa 115 mm bis maximal 180 mm verwendet. Die wesentlichen Bohrtechniken bestehen einerseits aus dem Rotarybohren (drehendes Bohrwerkzeug, Austrag des Bohrgutes durch eine Wasser- und/oder Luftpulung) und andererseits aus der Imlochhammerbohrung (drehschlagendes Bohrwerkzeug, Austrag des Bohrgutes durch Luft). Die folgende Tabelle vermittelt einen Überblick über die wichtigsten Bohrtechniken bei der Herstellung von Erdwärmesonden.¹⁴⁰ Die angegebenen Bohrdurchmesser und Bohrtiefen dienen als Richtwerte, sie können bei leistungsfähigeren Geräten durchaus abweichen.

Tabelle 5.1: Bohrtechniken und Verfahren für Erdwärmebohrungen¹⁴¹

| Bohrtechnik: | Verfahren: | Durchmesser: | Tiefe: | Boden-/Gesteins-Beschaffenheit |
|-----------------|------------|--------------|-----------|--------------------------------|
| Schneckenbohren | drehend | 63 – 350 mm | 15 – 20 m | weich |
| Rammen | schlagend | bis 1000 mm | bis 20 m | weich |

¹³⁹ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 97 und 98.

¹⁴⁰ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 79 und 80.

¹⁴¹ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 79.

| | | | | |
|-----------------------------|---------------|---------------|-------------|---------------------|
| Rotarybohren (mobil) | drehend | 89 – 300 mm | 100 – 200 m | mittel bis hart |
| Imlochhammer | drehschlagend | 101 – 216 mm | bis > 100 m | mittelhart bis hart |
| Schlagbohren | schlagend | 76 – 115 mm | bis 70 m | sehr hart |
| Rotarybohren (stationär) | drehend | 300 – 1000 mm | bis > 1000m | mittel bis hart |

In Österreich besteht bezüglich der Herstellung von Erdwärmesondenbohrungen eine weite Verbreitung des Rotationsspülbohrverfahrens (bedingt durch behördliche Vorgaben) sowie des Imlochhammerbohrverfahrens. Aufgrund dieser Tatsache wird anschließend nur auf diese Abteufungsmethoden eingegangen. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass die derzeit eingesetzten Bohrgeräte in der Steiermark meist eine **Doppelkopfbohr-Geräteausstattung** aufweisen.

Dies hat den Vorteil, dass sowohl das Bohrgestänge als auch die Bohrlochverrohrung (auch Stütz- oder Schutzverrohrung genannt) unabhängig voneinander und gleichzeitig, in gegengesetzter Drehweise, abteufbar sind. Dadurch kann einerseits die angepeilte Bohrrichtung sehr genau gehalten werden sowie die Bohrlochwand vor dem Einstürzen (speziell bei Lockergesteinen -> Kiese) bewahrt werden. Ein weiterer Vorteil liegt beim Antreffen von artesischem Wasser, hier ist durch den Einbau einer Art Rückschlagventil in die Bohrlochverrohrung eine Kontrolle des anfallenden Wassers möglich.¹⁴²

5.1.1 Rotationsspülbohrung

Die Rotationsspülbohrung (Rotarybohrung) zählt zu den direkten Spülbohrverfahren, d.h. der flüssige Spülstrom wird mit Druck durch das Bohrgestänge und den Bohrkopf in die Bohrsohle geleitet und anschließend über den Ringraum zwischen Gestänge und Bohrlochwand mit dem gelösten Bohrgut an die Erdoberfläche in einen Spülteich gefördert. Anschließend erfolgt in einem geeigneten Auffangbecken die Sedimentation des Bohrgutes, sodass die „saubere“ Spülung wieder über eine Pumpe in das Bohrgestänge geleitet werden kann. Der Antrieb des Bohrwerkzeuges (i.d.R. ein Stufen- bzw. Rollenmeißel) erfolgt über einen sogenannten Kraftdrehkopf am Bohrgerät.¹⁴³

Diese Art des Bohrverfahrens kommt überwiegend bei Lockergesteinen, im Speziellen bei bindigen Böden zur Anwendung. Des Weiteren wird dieses Verfahren in Österreich vor allem in Gebieten mit gespannten-

¹⁴² Vgl. STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. S. 92.

¹⁴³ Vgl. STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. S. 90 bis 95.

und/oder artesisch gespannten Wässern vorgeschrieben. Durch den Druck der Bohrspülung lassen sich so viele schwache Arteser bzw. Grundwasserstockwerke mit leichtem hydraulischen Überdruck beherrschen. Die Spülung hat neben der Abdichtungswirkung aber auch andere Aufgaben, sie dient vor allem der Stabilisierung der Bohrlochwand, dem Austrag des Bohrgutes sowie der Reibungsminimierung von Bohrwerkzeug und Gestänge. Speziell die Stabilität des Bohrlochs ist entscheidend vom Spülungsüberdruck abhängig. Dieser ergibt sich aus der Differenz zwischen Spülungsspiegel und Wasserspiegel des Grundwasserkörpers. In einer Tiefe von 60 m ergeben sich daraus mit einer Spülungsdichte von etwa 1,1 t/m³ etwa 6,6 bar. Ein hier angetroffener Arteser mit einem Überdruck von 0,3 bar würde einen Druck von ca. 6,3 bar (60 m + 3 m) erzeugen. Die Druckdifferenz ergibt in weiterer Folge somit 0,3 bar (6,6 bar - 6,3 bar) Spülungsüberdruck. Bei der Spülung ist darauf zu achten, dass die Dichte durch geeignete **Zusätze** (Beschwerungsmittel) während des Bohrvorganges jederzeit erhöht werden kann, um Überdrücke beherrschen zu können. Weitere Spülungszusätze bilden Bentonite bzw. CMC-Produkte (Carboxy-Methyl-Cellulose). Diese Zusätze erhöhen die Viskosität der Spülung und bilden einen sogenannten **Filterkuchen** aus. Dadurch kann einerseits die Bohrgutaustragung unterstützt werden (speziell bei geringeren Aufstiegsgeschwindigkeiten), anderseits sorgt der Filterkuchen für eine gewisse abdichtende Funktion an der Bohrlochwand. Dies hat den Vorteil, dass das Eindringen von Bohrspülung, insbesondere bei grundwasserführenden Schichten im Lockergestein, verhindert wird. Des Weiteren unterbindet der Filterkuchen das Einfließen von Bohrlochwasser in durchbohrte Tonschichten, sodass das Aufquellen dieser Tone vermieden werden kann.¹⁴⁴ Die folgende Abbildung veranschaulicht das Schema eines direkten Spülbohrverfahrens.

¹⁴⁴ Vgl. STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. S. 90 bis 95.

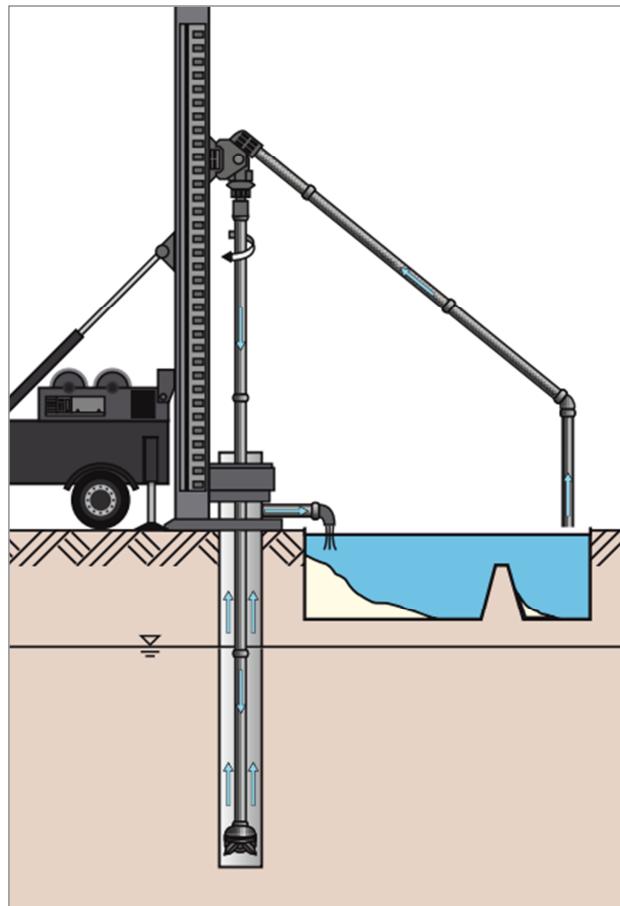


Abbildung 5.1: Schema des direkten Spülbohrverfahrens¹⁴⁵

¹⁴⁵ Quelle: STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. S. 92.

5.1.2 Imlochhammerbohrung

Das Imlochhammerverfahren ist eines der leistungsfähigsten Bohrverfahren im mittelharten bis harten Festgestein bzw. innerhalb der Bodenklassen 5, 6 sowie 7 und zeichnet sich durch eine hohe Bohrgeschwindigkeit aus. Es zählt zu den drehschlagenden direkten Spülbohrverfahren. Der Gesteinslöseprozess setzt sich dabei aus einem statischen und dynamischen Anteil zusammen, wobei letzterer etwa 90 % der Löseenergie aufbringt.¹⁴⁶

Bei der Bohrung dreht ein Kraftdrehkopf des Bohrgerätes über das Bohrgestänge den Imlochhammer an. Gleichzeitig wird dabei Luft über einen Kompressor bei Drücken zwischen 15 und 35 bar durch das Gestänge zum Imlochhammer geführt. Die Druckluft treibt einen Schlagkolben an, der in weiterer Folge den Bohrmeißel des Hammers mit bis zu 3000 Schlägen pro Minute auf die Bohrlochsohle schlagen lässt. Durch die am Hammerkopf austretende Luft erfolgt schließlich der Austrag des gelösten Bohrgutes über den Ringraum zwischen Bohrgestänge und Bohrlochwand zur Oberfläche. Da das Material mit Luft gefördert wird, ist das Bohrloch bis zu einer standfesten Gebirgsschicht mittels einer Verrohrung abzustützen. Das Imlochhammerverfahren bietet dabei den Vorteil, dass Wasserzutritte während der Bohrarbeiten sofort erkannt werden können.¹⁴⁷ Die oben angeführte Abbildung 5.1 kann dabei ebenfalls als beispielhaftes Schema einer Imlochhammerbohrung herangezogen werden. Der Spülstrom besteht hier im Unterschied zur Rotationsspülbohrung allerdings aus Luft und als Bohrwerkzeug wird ein Imlochhammer (siehe Abbildung 5.2¹⁴⁸) verwendet.



Abbildung 5.2:
Schema eines
Imlochhammers

5.1.3 Durchörterung von Druckwasserhorizonten

Im Zuge der Bohrarbeiten kann es durch die Durchörterung von mehreren grundwasserführenden Schichten zu hydraulischen Kurzschlüssen dieser Stockwerke kommen. Speziell bei artesischen Wässern können dadurch Probleme entstehen, da diese Schichten naturbedingt unter Druck stehen. Der Austritt von solchen gespannten und artesisch gespannten Grundwässern kann zu einem hydraulischen Grundbruch innerhalb des Bohrlochs und/oder im Bereich der Bohrung führen. Weitere Probleme können durch ausgetragenes Material entstehen. Dies führt im Besonderen untertägig zu Hohlraumbildungen und in weiterer Folge zu Setzungen. Diesem Risiko kann nur durch Setzen eines temporären Standrohrs, welches in den ersten Grundwasserstauer bzw. in den Fels

¹⁴⁶ Vgl. TUDESHKI, H.; HERTEL, H.: Die Methoden der bohrtechnischen Erkundung von Lagerstätten mineralsicher Rohstoffe. In: Advanced Mining Solutions, 2/2010. S. 4.

¹⁴⁷ Vgl. STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. S. 90 bis 96.

¹⁴⁸ Quelle: <http://www.sztribermy.com/hoch-tiefbau/verticalbohrung-rohrpressung/#tab-id-3>.

eingebunden ist, entgegengewirkt werden. Bei einem hydraulischen Kurzschluss von gespannten Wässern besteht die Möglichkeit, dass es dadurch zu einem Übertrag von unterschiedlich mineralisierten Flüssigkeiten aber auch zu Materialverlagerungen kommt, wodurch es wiederum zu Setzungerscheinungen kommen kann. Dementsprechend sind solche Prozesse möglichst zu vermeiden. Des Weiteren kann der Zutritt von Wasser in überlagernde Horizonte die hydrostatischen Druckverhältnisse beeinflussen. Werden dabei Gleit- oder Scherflächen aktiviert, könnte dies zu Bodenbewegungen führen. Der Austausch von Wässern zwischen benachbarten Stockwerken durch unterschiedliche Drücke ist eine Folge von aufsteigenden bzw. absteigenden Flüssigkeitsbewegungen (siehe Abbildung 5.3 – Fall a und b). Dadurch kann es in weiterer Folge zu einer Veränderung des Chemismus oder zu Schadstoffbeeinträchtigungen (Fall c) einer wasserführenden Schicht kommen. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Folgen von nicht abgedichteten Grundwasserstockwerken.¹⁴⁹

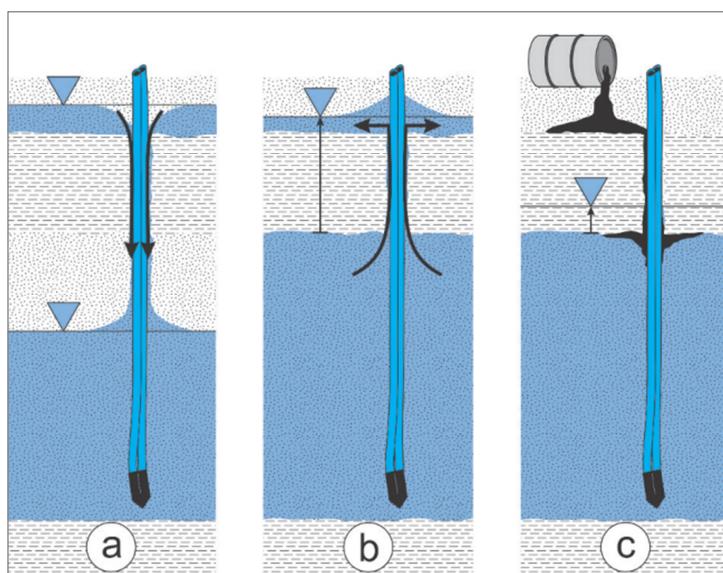


Abbildung 5.3: Verursachte Stockwerksverbindungen durch unzureichend abgedichtete Erdwärmesonden¹⁵⁰

¹⁴⁹ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 254 bis 256.

¹⁵⁰ Quelle: SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 255.

5.1.4 Weitere Risikopotenziale durch Bohrarbeiten

Die Abteufung von Bohrungen zur Nutzung des thermischen Potenzials in der Tiefe kann Gefahren bergen, die in weiterer Folge zu Schäden führen können. Bei sorgfältiger Vorerkundung sind diese Risiken jedoch auf ein Minimum reduzierbar.

Die Wahrscheinlichkeit eines Schadens im Bereich der Erdwärmesonden liegt nach Untersuchungen des Karlsruher Instituts für Technologie aus dem Jahr 2014 lediglich im Promillebereich (weniger als 0,002 % pro Jahr für das Bundesland Baden-Württemberg).¹⁵¹

Nach der 5-M-Methode ergeben sich die Risikofaktoren eines geothermischen Projekts aus dem Menschen, der Methode, dem Medium, der Maschinen sowie aus dem Material. Bei näherer Betrachtung kann allerdings festgestellt werden, dass vier dieser fünf Risikogruppen durch die Projektbeteiligten beeinflusst werden können. Lediglich der fünfte Faktor, das Medium Untergrund weist ein gewisses Restrisiko auf. Demzufolge ist die **Erkennung und Bewertung von Gefahrenpotenzialen aufgrund von Erkundungsergebnissen** von großer Bedeutung. Ein Verzicht von erkennbar risikominimierenden Maßnahmen aus Kostengründen kann für die handelnden Personen zu direkten Haftungsansprüchen führen. Des Weiteren ist eine Unterlassung einer solchen Maßnahme als fahrlässig zu interpretieren.¹⁵² Zur besseren Einschätzung werden mögliche Risikofaktoren nun aufgelistet und näher beschrieben.

1. Geologische Risiken:

- Quellfähige und setzungsempfindliche Gesteine:
mögliche Hebungserscheinungen durch quellfähige Tone, Umwandlungserscheinungen von Anhydrit zu Gips, Ausfällungen, Austrocknungen, eventuelle Baugrundhebungen sowie Volumenveränderungen
- Lösliche Gesteine:
durch Reaktionen mit dem Grundwasser (vor allem bei wechselnden hydrogeologischen Bedingungen); gefährdet sind grundsätzlich folgende Gesteine: Kalkstein, Dolomit, Gipsgesteine, anhydritführende Schichten, Salzgesteine

¹⁵¹ Vgl. GRIMM, M. et al.: Schadensfallanalyse von Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg. In: Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, 4/2014. S. 275 bis 286.

¹⁵² Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 245 bis 249.

- Massenbewegungen:
Scher-, Quetschungs- und Versetzungsschäden an den Sonden infolge Hangrutschungen sowie durch Kriechen und/oder Gleiten
- Gasaustritte:
Methan, Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Radon

2. Hydrogeologische Risiken:

- Gespannte und artesisch gespannte Grundwässer:
bilden bei unsachgemäßer Handhabung die Gefahr eines hydraulischen Kurzschlusses der Grundwasserstockwerke; können das hydrostatische Druckniveau beeinflussen
- Grundwasserstockwerke:
Gefahr der Vermischung von Wässern durch unterschiedliche Druckverhältnisse der Stockwerke -> Änderung des Chemismus, Schadstoffeinträge, etc.
- Hydrochemie:
durch Druck- und Temperaturänderungen in Brunnenanlagen kann es zu Ausfällungen von Eisen, Mangan sowie Kalk kommen
- Wasserqualität:
Schäden durch aggressive Wässer; auf bakteriologische und sonstige Verunreinigungen ist zu achten

3. Umwelttechnische Risiken:

- Altlasten und Ablagerungen:
Gefahren durch schädliche Ablagerungen jeglicher Art sowie durch gefährdende Altlasten (z.B. Sprengmittel, etc.)

4. Risiken durch den Sondeneinbau:

- Verkeilungerscheinungen:
durch zu große Bohrdurchmesser, Aussparungen im klüftigen Gebirge sowie durch ungeeignete Abstandhalter
- Einbaurisiken durch Einbrüche:
aufgrund mangelnder Bohrlochstabilität

5. Betriebsrisiken:

- Schäden am Verfüllbaustoff aufgrund wiederholter Tau-Gefrierwechsel:

durch übermäßige Inanspruchnahme der Erdwärmesondenanlage bzw. aufgrund falsch abgeglichener Sondenkreisläufe

- Mechanische Schäden an den Sonden bzw. den Rohrleitungen:
infolge von Bauwerkssetzungen bzw. durch Einwüchse (Wurzeldruck)¹⁵³

5.2 Bohrlochdurchmesser

Der Bohrlochdurchmesser von Erdwärmesonden ist in Abhängigkeit vom Durchmesser des Sondenbündels (Sondenrohre, Verpressschlauch inkl. etwaiger Abstandhalter) so groß zu wählen, dass eine ausreichende Hinterfüllung der Sonden gewährleistet werden kann. In Deutschland wird diesbezüglich in diversen Leitfäden für die Errichtung von Tiefensonden eine Ringraummantelung von **mindestens 30 mm** empfohlen.¹⁵⁴ Dabei ergibt sich nach Gleichung 5.1 folgender Bohrdurchmesser:

$$d_B \geq d_{So} + 60 \text{ mm [mm]}$$

[Gl. 5.1]¹⁵⁵

d_B Bohrdurchmesser
 d_{So} Durchmesser des Sondenbündels

Die in der Steiermark gebohrten Lochdurchmesser weisen für Einfamilienhäuser je nach Bohrtechnik einen üblichen Durchmesser von 115 bis 140 mm auf. Unter Verwendung des Imlochhammer-Bohrverfahrens entsteht dadurch ein Bohrlochquerschnitt von 140 mm, sofern die Stützverrohrung vollständig abgeteuft wurde. Bei Anwendung des Rotationsspülbohrverfahrens wird die Verrohrung meist nur einige Tiefenmeter (i.d.R. 30 bis 50 m) in den standfesten Untergrund bzw. in den Grundwasserstauer gebohrt, woraus sich ein Durchmesser von 140 mm ergibt. Hier wird das Bohrgut üblicherweise mittels Luftspülung an die Oberfläche gefördert. Im weiteren Verlauf wird auf eine Wasserspülung umgestellt und ohne Stützverrohrung mit einem Bohrwerkzeugdurchmesser von 115 mm bis zur Endtiefe abgeteuft.

¹⁵³ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 250 bis 260.

¹⁵⁴ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 156.

¹⁵⁵ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 156.

Infolgedessen kann festgestellt werden, dass die empfohlene Ringraumstärke von 30 mm, speziell bei der Rotationsspülbohrung ($d_B = 115 \text{ mm}$) nicht eingehalten werden kann. Bei 40 mm breiten Simplex-Sonden ergibt sich eine Ummantelung von ca. 17 mm, bei Duplex-Sonden mit 32 mm Durchmesser sind es nur mehr ca. 13 mm. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Bohrlochgeometrie bei Verwendung einer Einfach- sowie Doppel-U-Rohr-Ausführung beim Rotationsspülbohrverfahren.

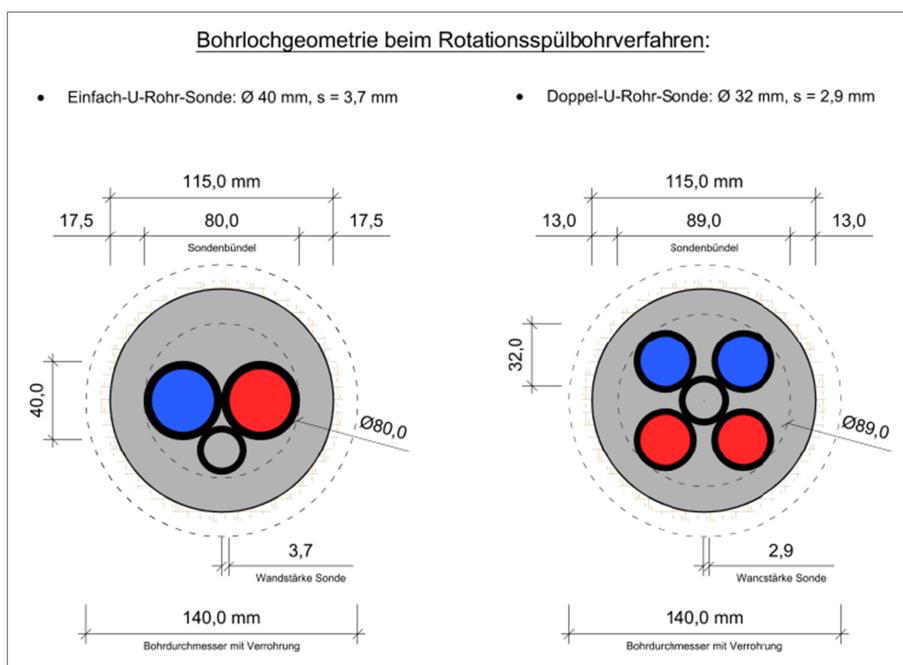


Abbildung 5.4: Bohrlochgeometrie beim Rotationsspülbohrverfahren - Einfach-U-Rohr, 40 mm sowie Doppel-U-Rohr, 32 mm¹⁵⁶

Im oberen Bereich der Erdwärmesonden ergibt sich durch die Mitführung der Stützverrohrung (i.d.R. 30 bis 50 m Tiefenmeter) bei der oben angeführten Simplex-Sonden-Ausführung eine Ringraumstärke von 30 mm. Dies entspricht genau dem empfohlenen Mindestmaß. Bei der Duplex-Variante beträgt dieser Abstand nur mehr ca. 25 mm.

5.2.1 Problematik Abstandhalter

Eine weitere empfohlene Maßnahme hinsichtlich der Qualitätssicherung von Erdwärmesonden stellt die Verwendung von Abstandhaltern und

¹⁵⁶ Quelle: Eigene Grafik

Rohrzentrierungen dar. Diese Variante führt allerdings wiederum zu einem größeren Bohrlochdurchmesser sowie zu einem erschwerten Einbau der Sonden. Aufgrund dieser Tatsache werden Abstandhalter nur sehr selten eingebaut.

Die Effizienzsteigerung einer Anlage durch die Verwendung von Innenabstandhalter liegt laut Rechenmodellen im Bereich von **5 bis 8 %**.¹⁵⁷

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht diese Problematik bei einer Duplex-Sonden-Ausführung mit 32 mm Durchmesser. Dabei wurde die mittlere Öffnung für den Verpressschlauch nach den Herstellerangaben des Abstandhalters mit 45 mm eingezeichnet. Bei einer Reduktion des Schlauchdurchmessers auf 25 mm könnten somit 2 cm Bohrdurchmesser eingespart werden.

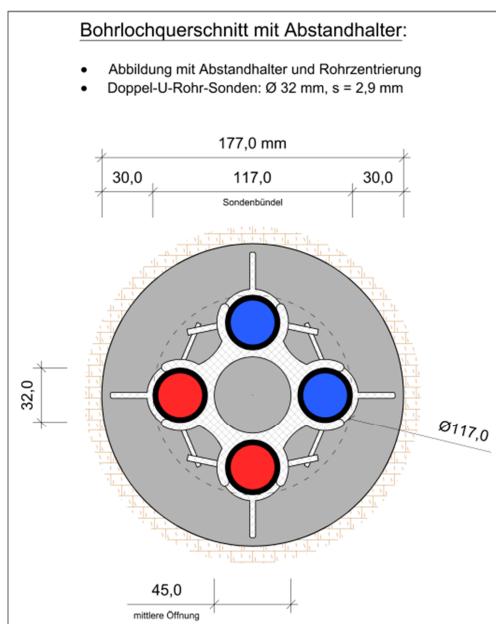


Abbildung 5.5: Bohrlochgeometrie bei Verwendung von Abstandhaltern - Doppel-U-Rohr-Ausführung, 32 mm¹⁵⁸

Der abgebildete Bohrlochdurchmesser beträgt 177 mm. Dadurch wird schnell ersichtlich, dass bei der Verwendung von Abstandhaltern eine Anpassung des Bohrdurchmessers erfolgen muss, um den Sondeneinbau gewährleisten zu können. Abschließend werden die Ergebnisse aus

¹⁵⁷ Vgl. BERGER, H.: Erdwärmesonden - Hauptprobleme durch Planung und Erstellung. In: Deutsche Brunnenbauertage 2009, 04/2009/2009. S. 17.

¹⁵⁸ Quelle: Eigene Grafik

der Betrachtung der Bohrlochgeometrie zusammengefasst und den Empfehlungen in Tabelle 5.2 gegenübergestellt.

Tabelle 5.2: Bohrlochdurchmesser und Ringraumstärke¹⁵⁹

| | IST-Durchmesser: | Empfehlung: | IST-Stärke-Ringraum | Empfehlung: |
|--|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|
| | verrohrt/unverrohrt [mm] | \varnothing Bohrloch [mm] | verrohrt/unverrohrt [mm] | Stärke Ringraum [mm] |
| ohne Abstandhalter: | | | | |
| Simplex-Sonde \varnothing 40 mm | 140 / 115 | ≥ 140 | 30 / 17,5 | 30 |
| Duplex-Sonde \varnothing 32 mm | 140 / 115 | ≥ 150 ¹⁶⁰ | 25,5 / 13 | 30 |
| mit Abstandhalter (Innenabstandhalter inkl. Rohrzentrierung): | | | | |
| Duplex-Sonde \varnothing 32 mm | - | ~ 180 | - | 30 |

5.3 Einbringen und Verpressen von Erdwärmesonden

Nachdem die Bohrlöcher abgeteuft wurden, erfolgen die vorbereitenden Maßnahmen für das Einbringen der Sonden. Erdwärmesonden für flüssige Wärmeträgermedien bestehen dabei aus dem Sondenfuß und den Sondenrohren (Simplex-/Duplex-/Koaxial-Rohre, etc.) in der jeweiligen Länge. Als Sondenmaterial ist zumindest die Güte PE-100 SDR-11 (PN 16) einzusetzen. Das Kürzel „SDR“ (Standard Dimension Ratio) gibt dabei das Verhältnis zwischen Außendurchmesser und Wandstärke der Sonde an, die Abkürzung „PN“ (Pressure Nominal) beschreibt den Nenndruck (in bar) der Rohre. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Einsatzgrenzen des Materials für den Bau- und Betriebszustand eingehalten werden. Darüber hinaus sind bei der Handhabung der Sonden mechanische Beschädigungen unbedingt zu vermeiden.¹⁶¹

Der Einbauvorgang gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

- Füllen der Sonden mit Wasser, um einerseits den Einbau zu erleichtern sowie andererseits beim Verpressvorgang ein Aufschwimmen zu verhindern.
- Anbringen eines Sondenfußes (verschiedene Gewichte und Durchmesser erhältlich).

¹⁵⁹ Eigene Zusammenstellung der Bohrlochdurchmesser aufgrund der o.a. Gl. 6.1.

¹⁶⁰ Vgl. BERGER, H.: Erdwärmesonden - Hauptprobleme durch Planung und Erstellung. In: Deutsche Brunnenbauertage 2009, 04/2009/2009. S. 18.

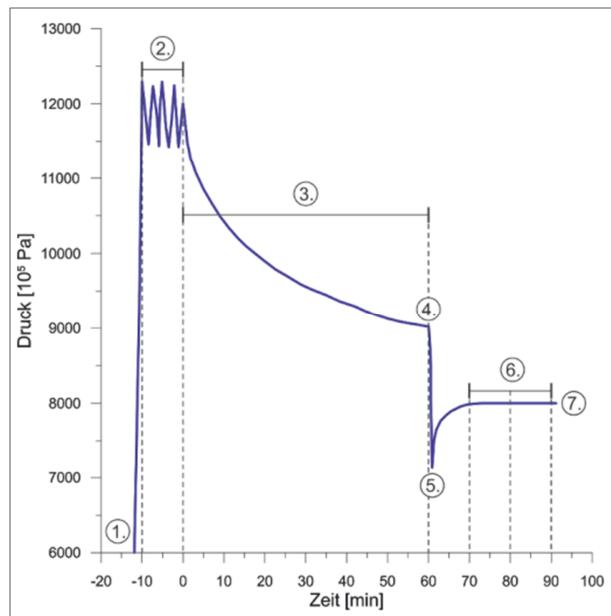
¹⁶¹ Vgl. ÖSTERRE. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 38.

- Einbringen der Sonden in das Bohrloch zusammen mit dem Verpressschlauch. Die Krafteinwirkung sollte dabei direkt über dem Sondenfuß stattfinden, um die Sonde dadurch gerade zu ziehen. Hinsichtlich der Qualitätssicherung sind die Druckverhältnisse während des Einbaus zu beobachten.
- Nach dem Einbringen ist der Ringraum lückenlos von unten nach oben vollständig bis zur Oberfläche zu verpressen. Der Verpressvorgang sollte nach Ausfließen der Suspension an der Bohrlochoberfläche auf jeden Fall weiter fortgesetzt werden, um eine vollständige Verdrängung der Bohrspülung gewährleisten zu können. Dabei ist darauf zu achten, dass die Sonden während des Verpressvorganges druckdicht verschlossen sind, um Beschädigungen durch Eindrücken zu vermeiden.
- Anschließend sind ein Durchflusstest sowie eine Druckprüfung der Sondenrohre mit Wasser (in Anlehnung an die EN 805) bei einem Druck von **12 bar** durchzuführen. Die dafür notwendigen Prüfprotokolle sind dem ÖWAV-Regelblatt 207 zu entnehmen. Bei der Druckprüfung sollte beachtet werden, dass diese entweder unmittelbar nach dem Verpressvorgang oder nach der Aushärtung der Suspension zu erfolgen hat, um den Verbleib eines Ringspaltes durch die Sondenausdehnung bei der Druckprüfung zu vermeiden. Eine Verwendung eines elektronischen Druckmessgerätes inkl. Protokollierung wird hierbei empfohlen.
- Abschließend sind die Sondenrohre bis zum Anschluss an die Zuleitungen dicht zu verschließen. Sämtliche Arbeitsschritte sind in einem Bautagesbericht zu vermerken.¹⁶²

5.3.1 Ablauf der Druckprüfung nach dem Einbringen der Sonden

Für die Durchführung der Druckprüfung ist ein Feinmessmanometer mit einer Genauigkeit von mindestens 0,1 bar einzusetzen. Die Prüfung ist gemäß dem unten angeführten Druckdiagramm auszuführen.

¹⁶² Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 38 und 39.

Abbildung 5.6: Druckdiagramm nach SIA 384/6¹⁶³

Zur Durchführung der Druckprüfung sind die folgenden Schritte einzuhalten und zu protokollieren. Dabei entsprechen die unten angeführten Punkte 1 bis 7 ebenfalls der Nummerierung des Prüfdiagramms.

1. Ruhezeit der Sondenrohre (nicht belasteter Zustand); Dauer: 1 Stunde
2. Prüfdruck aufbauen (**12 bar**) und 10 Minuten aufrechterhalten
3. Phase der Ruhezeit - Expansion der Sondenrohre (starke Ausdehnung) unter Prüfdruck; Druckabfall darf max. 30 % betragen; Dauer: 1 Stunde
4. Ende der Ruhezeit - Druckabsenkung um 2 bar; abgelassene Wassermenge notieren (zur Feststellung von Lufteinchlüssen)
5. Nach der Druckabsenkung erfolgt ein Druckanstieg bis zum Beginn des Punktes 6 (aufgrund Kontraktion der Sondenrohre)
6. Phase der Hauptprüfung - Druck darf während dieser Zeit nach Erreichen eines Maximums nicht um mehr als 0,1 bar sinken; 3 Messungen sind zu dokumentieren; Dauer: 30 Minuten¹⁶⁴

¹⁶³ Quelle: SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 198.

¹⁶⁴ Vgl. ÖSTERRE. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 59 und 60.

5.4 Anforderungen an die Ringraumverpressung von Erdwärmesonden

Die Ringraumverpressung stellt einen weiteren wichtigen Parameter der Qualitätssicherung von Erdwärmesonden dar, da diese das Bindeglied zwischen umgebenden Gebirge und den Sonden darstellt. Dabei muss der Verfüllbaustoff unter anderem folgende Funktionen übernehmen:

1. Schutz der Sondenrohre:

Die üblichen verwendeten Sondenrohre unterliegen einer relativ großen temperaturabhängigen Längsausdehnung von ca. $0,2 \text{ mm}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Bei 100 m tiefen Sonden würde dies im Jahresgang einer rechnerischen Ausdehnung von bis zu 20 cm entsprechen. Durch die Ringraumverpressung treten diese Längsausdehnungen i.d.R. nicht in diesem Maße auf, da der Verfüllbaustoff diese Reaktionskräfte aufnehmen kann. Grundvoraussetzung hierfür ist jedoch ein ausreichend dimensionierter Verpresskörper. Aus diesem Grund können zu dünnwandige Ringraumverpressungen die Aufnahme dieser Kräfte nicht gewährleisten. Des Weiteren kann nur eine dauerhafte, vollständige Ummantelung mit ausreichender Dicke, auftretende Punktlasten aufnehmen und von den Sondenrohren fernhalten.¹⁶⁵

2. Sicherstellung der thermischen Anbindung an das umgebende Gebirge:

Der Verfüllbaustoff gewährleistet den Wärmeßflusses zwischen umgebenden Gebirge und dem flüssigen Wärmeträgermedium. Dabei sollte die thermische Leitfähigkeit des Verpressmaterials mindestens auf dem Niveau des umgebenden Gebirges liegen, um nicht thermisch isolierend zu wirken. Fertigmischungen sind hier in der Lage, Wärmeleitfähigkeiten von über $2,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ zu erreichen, sofern die Herstellerangaben - insbesondere der angegebene Wassergehalt - eingehalten wird. Herkömmliche Baustellenmischungen liegen hier lediglich im Bereich von etwa $0,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Fertigmischungen weisen hier also wesentlich bessere Wärmeleitfähigkeiten auf (Faktor 2 – 3 möglich!). Leider muss hier festgestellt werden, dass vor allem für den privaten häuslichen Gebrauch, überwiegend Baustellenmischungen verwendet werden.¹⁶⁶

¹⁶⁵ Vgl. BERGER, H.: Erdwärmesonden - Hauptprobleme durch Planung und Erstellung. In: Deutsche Brunnenbauertage 2009, 04/2009/2009. S. 17 und 18.

¹⁶⁶ Vgl. BERGER, H.: Erdwärmesonden - Hauptprobleme durch Planung und Erstellung. In: Deutsche Brunnenbauertage 2009, 04/2009/2009. S. 17 und 18.

3. Abdichtung durcheufter Grundwasserschichten:

Eine optimale Hinterfüllung (ohne Lufteinschlüsse und Hohlräume) dichtet das Bohrloch ab, verhindert hydraulische Kurzschlüsse von Grundwasserstockwerken und vermeidet Schadstoffeinbräge.¹⁶⁷

4. Frost-Tau-Wechselbeständigkeit:

Das Hinterfüllmaterial muss ausreichend frost-tau-wechselbeständig ausgeführt werden, um Rissbildungen, welche zum Verlust der Festigkeitseigenschaften und der Abdichtungsfunktion führen, zu verhindern. Die Risse im Verfüllbaustoff entstehen dabei durch einen von innen nach außen fortschreitenden Gefrierprozess im Zuge einer zu großen Temperaturabsenkung um die Sonde.¹⁶⁸

5.4.1 Baustellenmischungen

Für die Verwendung einer Baustellenmischung als Sondenhinterfüllung wird ein Mischungsverhältnis von 142 kg Wasser, 10 kg Bentonit sowie 76 kg Zement empfohlen. Die Zemente müssen dabei der Festigkeitsklasse 32,5 oder 42,5 N/mm² in den Sorten CEM II/B-S (Portlandhüttenzement, Hauptbestandteil Hüttensand) bzw. CEM III/A oder B (Hochofenzement, Hauptbestandteil Hüttensand) entsprechen. Bei Grundwasser mit treibendem Angriff sind die o.a. Zementsorten mit dem Zusatz „C₃A-frei“ (Tricalcium-Aluminat) zu verwenden, da diese empfindlich auf sulfathältige Wässer reagieren. Des Weiteren ist eine Verwendung von zementstabilen, aktivierten Natrium-Bentoniten erforderlich. Die Suspension weist dabei eine Dichte von ca. 1,33 g/cm³ bei einer Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,8 W/(m·K) auf. Bei der Suspensionsherstellung ist darauf zu achten, dass das Bentonit mindestens 10 Minuten mit Wasser klumpenfrei anzurühren ist und erst dann der Zement beigegeben wird (Vermeidung niederviskoser Suspensionen mit generell schlechteren Eigenschaften). Um eine gleichbleibende Qualität gewährleisten zu können, ist eine chargenweise Herstellung der Verpresssuspension durchzuführen. Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass eine Dokumentation der Verpressung im Bautagesbericht vorgeschrieben ist. Dabei sind die Rezeptur, der Suspensionsverbrauch, die Dichte, der Verpressdruck

¹⁶⁷ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung, S. 166 und 167.

¹⁶⁸ SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung, S. 174 und 175.

sowie die Dichte der Suspension beim Austritt am Bohrlochmund zu dokumentieren.¹⁶⁹

5.4.2 Fertigmischungen

Der Einsatz von thermisch verbesserten Verpressmaterialien mittels Fertigprodukten wird in der gesamten deutschsprachigen Literatur durchweg empfohlen, da diese weitaus größere Wärmeleitfähigkeiten von bis zu **2,4 W/(m·K)**¹⁷⁰ aufweisen und somit den thermischen Bohrlochwiderstand erheblich reduzieren.

Im Vergleich dazu, begünstigen Mischungen mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit in Verbindung mit niedrigen Soletemperaturen das Einfrieren des Verfüllbaustoffes, da vom Untergrund nicht ausreichend Wärme durch das Verpressmaterial an das Sondenrohr nachgeliefert werden kann. Neben der Verschlechterung der Abdichtfunktion durch Frost-Tau-Schädigungen wird ebenso die Wirkeffizienz der gesamten Anlage herabgesetzt. Aus diesen Gründen sollten daher auf jeden Fall thermisch verbesserte Materialien verwendet werden.¹⁷¹

Allerdings muss hier auch angemerkt werden, dass einer Studie des Amtes der Oberösterreichischen Landesregierung im Jahr 2007 zufolge nur eine von sieben getesteten Fertigmischungen eine derart hohe Wärmeleitfähigkeit erreicht hatte. Fertigprodukte sind bezüglich ihrer Eignung und Frost-Tau-Wechselbeständigkeit jedenfalls durch ein Gutachten einer zertifizierten Prüfstelle in Anlehnung an die Studie „Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden“ nachzuweisen.¹⁷²

5.4.3 Schadhafte Verpresskörper

Zur Vermeidung von Schäden am Verpresskörper müssen Verfüllbaustoffe gewisse Eigenschaften besitzen, um dauerhaft und qualitativ hochwertig ihren Anforderungen entsprechen zu können. Die Hinterfüllung muss dabei rheologische (Fließeigenschaften), thermische, mechanische sowie hydraulische Kriterien erfüllen. Als Beispiel hierfür sind etwa die Druckfestigkeit, die Durchlässigkeit, die Wärmeleitfähigkeit, die

¹⁶⁹ Vgl. ÖSTERREICHISCHE WASSER- UND ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 39-40. sowie NIEDERBRUCKNER, R.; STEINBACHER, N.: Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden. S. 61.

¹⁷⁰ Vgl. NIEDERBRUCKNER, R.: Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren zur Optimierung der Entzugsleistung von Erdwärmesonden. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62/Juni 2010. S. 102.

¹⁷¹ Vgl. NIEDERBRUCKNER, R.: Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren zur Optimierung der Entzugsleistung von Erdwärmesonden. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62/Juni 2010. S. 104.

¹⁷² Vgl. NIEDERBRUCKNER, R.; STEINBACHER, N.: Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden. S. 47.

Schwindstabilität sowie der Frost-Tau-Widerstand des Ausbaumaterials zu nennen. Können diese Anforderungen an den Verfüllbaustoff nicht eingehalten werden, kann es infolgedessen zu Schäden kommen. Hohlräumbildungen um die Sondenrohre bzw. an der Bohrlochwand, Fehlstellen durch Bereiche unterschiedlicher Dichte, als auch Rissbildungen können die Folge sein.¹⁷³

¹⁷³ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 166 bis 176.

5.5 Sondenzuleitungen

Als Zuleitungen werden jene Verbindungsleitungen bezeichnet, die zwischen Sonde und Verteilerschacht oder Wärmepumpe verlegt werden. Als Material werden üblicherweise Rohre der Güte PE-HD 100 RC eingesetzt. Das Kürzel „HD“ (High Density) bezeichnet dabei die erhöhte Dichte des Rohrmaterials, die Abkürzung „RC“ (Resistance to Crack) beschreibt den Riss- bzw. Bruchwiderstand. Nicht zugängliche Rohrverbindungen sind als Muffenschweißung auszuführen und dürfen nur von Fachkräften mit einschlägiger Ausbildung sowie Prüfung durchgeführt werden. Die Rohreinbettung, als auch die zu verlegenden Krümmungsradien sind nach den Herstellerangaben anzufertigen. Des Weiteren ist zur Kennzeichnung der Rohrleitungen ein Warnband, etwa 0,5 m unter der Geländeoberfläche, einzulegen.¹⁷⁴

Bezüglich der Verlegungstiefe wird hier eine 1,0 bis 1,5 m starke Überdeckung empfohlen. Auf jeden Fall sind die Zuleitungen gegen Temperatureinflüsse (Gefahr des Einfrierens) und mechanische Beschädigungen zu schützen (siehe auch „ÖN B 2533 - Koordinierung unterirdischer Einbauten“).¹⁷⁵

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass am höchsten Punkt der Anlage - i.d.R. beim Verteilerschacht, eine **Entlüftungsvorrichtung** vorzusehen ist. Zuleitungen mit Steigungen von $\geq 1\%$ stellen hier übliche Orientierungswerte dar. Die einzelnen Solekreise (jede Sonde) sollten zusätzlich durch Ventile absperren- und regulierbar ausgeführt werden. Etwaige Längenunterschiede der Sondenleitungen sind aus rohrhydraulischen Überlegungen unbedingt zu beachten. Diesbezüglich ist der Einsatz von Durchflussregelungen für jede Sonde empfehlenswert.¹⁷⁶

5.5.1 Thermische Trennung von Zuleitungen

Da die Vor- und Rücklaufleitungen von Erdwärmesonden unterschiedliche Temperaturen aufweisen, ist bei der Verlegung darauf zu achten, dass diese räumlich voneinander getrennt sind, um thermische Beeinflussungen zu unterbinden.¹⁷⁷ Eine solche Trennung kann dabei auf verschiedene Arten erfolgen.

Bei der ersten Variante werden die nebeneinander liegenden Sondenzuleitungen der Vor- und Rücklaufrohre lediglich durch entsprechende Ab-

¹⁷⁴ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 41 und 42.

¹⁷⁵ Vgl. ÖSTERR. NORMUNGSIINSTITUT: ÖN B 2533: Koordinierung unterirdischer Einbauten - Planungsrichtlinien. S. 8.

¹⁷⁶ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 200 und 201.

¹⁷⁷ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 201.

ständen zueinander „thermisch“ getrennt. Diese Verlegeart stellt aus derzeitiger Sicht die wohl praktikabelste Lösung dar.

Die zweite Variante sieht eine übereinanderliegende Verlegung des Vor- und Rücklaufes vor. Dabei kann die thermische Trennung durch Einlegen von ca. 3 cm starken Dämmplatten (z.B. Foamglas) sichergestellt werden.¹⁷⁸ Die folgende Abbildung veranschaulicht das übereinander angeordnete Verlegeschema.

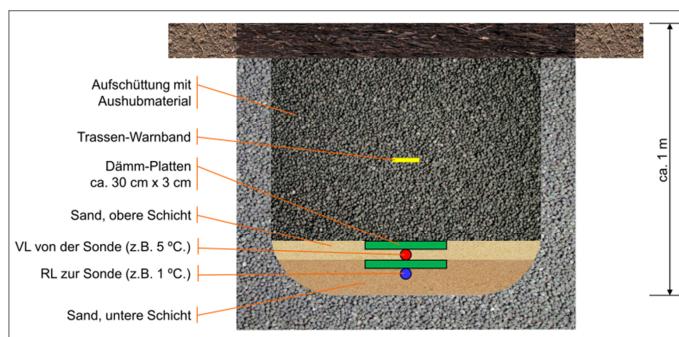


Abbildung 5.7: Trennung des Vor- und Rücklaufs¹⁷⁹

Eine weitere Lösungsmöglichkeit stellt die Verwendung einer Rohrdämmung dar. Hier werden die ersten 25 Tiefenmeter des Rücklaufs der Erdwärmesonde, als auch die horizontalen Rücklaufleitungen gedämmt. Dies führt nachweislich zu einer optimierten Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf, wodurch eine Wärmequellentemperatur von 5°C und mehr erreicht werden kann. Dadurch wird in weiterer Folge eine Steigerung der Gesamteffizienz der Anlage möglich, da weniger Energie beim Transport des Wärmeträgermediums verloren geht.¹⁸⁰ Die Abbildung 5.8¹⁸¹ veranschaulicht drei Erdwärmesonden mit gedämmten Rücklaufleitungen.

Allerdings muss hier auch angemerkt werden, dass die praktische Anwendbarkeit zu hinterfragen ist, zumal der Aufschubvorgang einer 25 m langen vertikalen Rohrdämmung als sehr schwierig erscheint und zudem bei äußerst begrenzten Platzverhältnissen stattfinden müsste.



Abbildung 5.8: Rücklaufdämmung bei Erdwärmesonden

¹⁷⁸ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennaher Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 201 und 202 sowie <http://www.erdsondenoptimierung.ch/themen/>. Datum des Zugriffs: 21.Oktobe.2015.

¹⁷⁹ Quelle: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften - Institut für Facility Management.

¹⁸⁰ Vgl. INSTITUT FÜR ANGEWANDTE BAUFORSCHUNG WEIMAR: Erdwärme-Studie belegt Vorteile durch Rücklaufdämmung. In: Geothermie, Bohr- und Brunnentechnik, A61029/2014. S. 21.

¹⁸¹ Quelle: INSTITUT FÜR ANGEWANDTE BAUFORSCHUNG WEIMAR: Erdwärme-Studie belegt Vorteile durch Rücklaufdämmung. In: Geothermie, Bohr- und Brunnentechnik, A61029/2014. S. 21.

5.5.2 Verteilerschacht

Der Einbau eines Verteilerschachtes empfiehlt sich ab einer Verwendung von drei Erdwärmesonden. Dadurch können die Zuleitungen der Sonden zusammengefasst und zu einem Vor- und Rücklauf gebündelt werden. Somit sind nur zwei Rohrdurchführungen bzw. Kernbohrungen in den Technikraum zur Wärmepumpe nötig.

Bei der Ausführung eines Verteilerschachtes ist darauf zu achten, dass dieser zugänglich ist sowie ausreichend entwässert werden kann. Die Sohle des Schachtes muss dabei nicht flüssigkeitsdicht ausgeführt sein.¹⁸²

5.6 Inbetriebnahme der Erdwärmesondenanlage

Vor der Inbetriebnahme einer Erdwärmesondenanlage ist das Gesamtsystem einem Durchflusstest sowie einer Druckprüfung mit Wasser bei einem Anfangsdruck von **12 bar** zu unterziehen. Danach wird das fertig angemischte Wärmeträgermedium in das System eingespült. Über ein offenes Gefäß ist dies solange im Kreislauf zu spülen, bis das flüssige Medium blasenfrei und vollständig entlüftet ist bzw. die gewünschte Konzentration an Frostschutz erreicht wurde. Hinsichtlich der Menge des Frostschutzkonzentrats sollte darauf geachtet werden, dass das verwendete Trägermedium bis zu einer Temperatur von mindestens 7 K unterhalb der Verdampfungstemperatur des Kältemittels einer Wärmepumpe nicht gefriert. Sowohl die berechnete- als auch die effektiv eingefüllte Menge des Wärmeträgermediums sind zusammen mit den Angaben zum Fabrikat und der gemessenen Frostschutzkonzentration zu protokollieren. Dabei sind die Ergebnisse für den Betreiber der Anlage in einem Inbetriebnahmeprotokoll darzulegen.¹⁸³

Die Grundlagen der Druckprüfung sind dem Punkt 5.3.1 zu entnehmen.

Des Weiteren ist die Erdwärmesondenanlage hydraulisch abzugleichen. Dabei ist die Umlözpumpe auf den maximalen geplanten Volumenstrom des Wärmeträgermediums auszulegen. Die Volumenströme sollten bei allen Sonden gleich groß sein, eine Differenz von $\pm 15\%$ darf hier nicht überschritten werden. Der Abgleich ist so zu gestalten, sodass ein optimales Verhältnis der angeglichenen Volumenströme bei möglichst geringem hydraulischen Gesamtwiderstand entsteht.¹⁸⁴

¹⁸² Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 42.

¹⁸³ Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 42 sowie SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 202 und 203.

¹⁸⁴ Vgl. SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. S. 203.

5.7 Optimierungspotenziale von Erdwärmesondenanlagen

Die effiziente Nutzung einer geothermischen Anlage mittels Tiefensonden hängt im Wesentlichen von vier Faktoren ab. Als erste Grundvoraussetzung ist zunächst auf eine gut gedämmte Gebäudehülle zu achten, welche den Energiebedarf des Objektes möglichst klein hält. Das zweite Kriterium setzt die Verwendung eines Wärmeabgabesystems mit möglichst niedrigen Vorlauftemperaturen voraus. Dies kann am besten mit einer Fußbodenheizung realisiert werden, jedoch sind auch Wandheizelemente sowie groß dimensionierte Heizkörper möglich. Weitere wichtige Komponenten (Faktoren drei und vier) stellen die Verwendung einer effizienten Wärmepumpe mit einer hohen Leistungs- und Arbeitszahl (COP bzw. JAZ) sowie die Herstellung von optimierten Erdwärmesonden dar.¹⁸⁵

Dabei können speziell im Hinblick auf eine Sondenoptimierung gewisse Maßnahmen gesetzt werden, die den Wirkungsgrad einer Erdwärmesonde entscheidend verbessern. Dazu zählen die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials, die Optimierung des Bohrlochdurchmessers und des Schenkelabstandes der Sondenrohre sowie die Wahl einer ausreichend hohen Fließgeschwindigkeit des Wärmeträgermediums.¹⁸⁶

5.7.1 Auslegung und Optimierung im Neubau

Die Auslegung im Neubau stellt im Hinblick auf eine optimierte Erdwärmesondenanlage den einfachsten Fall dar. Hier kann durch dementsprechende planerische und bauliche Maßnahmen eine effiziente Gebäudehülle nach dem jeweiligen gewünschten energetischen Standard (z.B. Niedrigenergiehaus, Passivhaus, Nullenergiehaus) erstellt werden. Die Wärmeabgabe erfolgt dabei durch ein Niedertemperatur-Heizsystem mit einer möglichst tiefen Vorlauftemperatur (30 bis 35 °C). Je niedriger diese Temperatur angesetzt werden kann, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe und umso geringer ist der Energieverbrauch der Anlage. Ein weiterer wichtiger Faktor stellt den Einsatz einer effizienten Wärme- und Umwälzpumpe dar, da dadurch der Strombedarf erheblich minimiert werden kann. Zusätzliche weitere Effizienzsteigerungen sind in Verbindung mit einer Photovoltaik- bzw. Solaranlage möglich.¹⁸⁷

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die möglichen Optimierungspotenziale von Erdwärmesondenanlagen im Neubau anhand der

¹⁸⁵ Vgl. <http://www.erdsondenoptimierung.ch/gesamtoptimierung/>. Datum des Zugriffs: 5.Oktober.2015.

¹⁸⁶ Vgl. EBERT, P. et al.: Optimierung von Erdwärmesonden - Abschlussbericht. S. 82.

¹⁸⁷ Vgl. <http://www.erdsondenoptimierung.ch/gesamtoptimierung/>. Datum des Zugriffs: 5.Oktober.2015.

von der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften aufgezeigten Punkte.

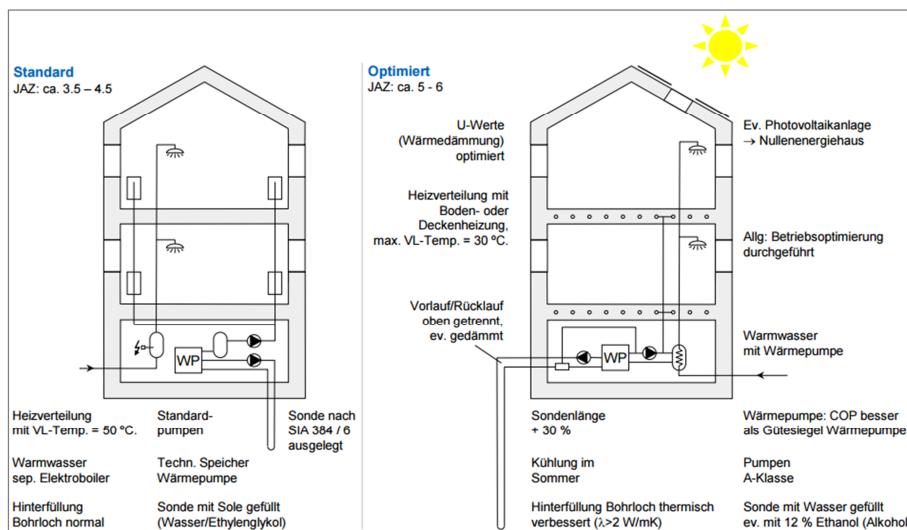


Abbildung 5.9: Gesamtoptimierung von EWS-Anlagen im Neubau¹⁸⁸

5.7.2 Auslegung und Optimierung im Bestand

Für Bestandsumbauten gelten grundsätzlich dieselben Voraussetzungen für einen sinnvollen Einsatz einer Erdwärmesondenanlage. Im Sanierungsfall ist im Besonderen darauf zu achten, die Gebäudehülle (Außenwände, Decken, Dach, Fenster, etc.) energetisch zu verbessern. Denn hier liegt i.d.R. das größte Potenzial, um die Energiekosten drastisch zu senken. Folgedessen ist auch eine effizientere Wärmeerzeugung bei geringeren Kosten möglich.¹⁸⁹

Anschließend müssen die **tatsächlich benötigte Vorlauftemperatur** der Heizanlage sowie die **erforderliche Leistung der Wärmeerzeugung** ermittelt werden. Um die Temperatur des Vorlaufs zu bestimmen, kann nach zwei Methoden vorgegangen werden. Zum einen kann der Wärmebedarf einzelner Räume über die Heizkörperleistung ermittelt werden, da diese in Abhängigkeit der Vor- und Rücklauftemperatur zu sehen ist. Somit kann in weiterer Folge mit Hilfe von Tabellen, die Wärmeleistung verschiedener Radiatoren festgelegt werden. Dabei wird der Wert der maximalen Vorlauftemperatur des gesamten Heizsystems von jenem Raum bestimmt, der die höchste Temperatur benötigt. Bei der zweiten Variante werden die Vor- und Rücklauftemperaturen der beste-

¹⁸⁸ Quelle: <http://www.erdsondenoptimierung.ch/gesamtoptimierung/>. Datum des Zugriffs: 5.Oktober.2015.

¹⁸⁹ Vgl. <http://www.erdsondenoptimierung.ch/gesamtoptimierung/>. Datum des Zugriffs: 5.Oktober.2015.

henden Anlage über eine Heizperiode aufgenommen. Dabei werden die Raumtemperaturen solange bei komplett geöffneten Ventilen abgesenkt, bis sich eine Temperatur von etwa 20 °C einstellt. Bei Erreichen dieses Niveaus werden die Vor- und Rücklauftemperaturen, als auch die Außentemperatur aufgezeichnet. Mit diesen Daten kann unter Zuhilfenahme eines Diagrammes, welche die Wärmeleistung verschiedener Radiatoren abbildet, das zugehörige Temperaturniveau abgelesen werden, wodurch sich die Verwendung einer Nieder-, Mittel- oder Hochtemperaturwärmpumpe ergibt.¹⁹⁰

Etwaige Sanierungsmaßnahmen stehen also in engem Bezug zur erzielbaren Vorlauftemperatur des Heizsystems. Beispielsweise würden zu hohe Temperaturen im Vorlauf von > 65 °C den gesamten Austausch- bzw. größere Anpassungen des Heizsystems nach sich ziehen. Aus diesem Grund sind genaue Überlegungen hinsichtlich der thermischen Sanierung sowie der Anlagenauslegung unabdingbar.¹⁹¹

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die möglichen Optimierungspotenziale von Erdwärmesondenanlagen bei Sanierungen anhand der von der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften aufgezeigten Punkte.

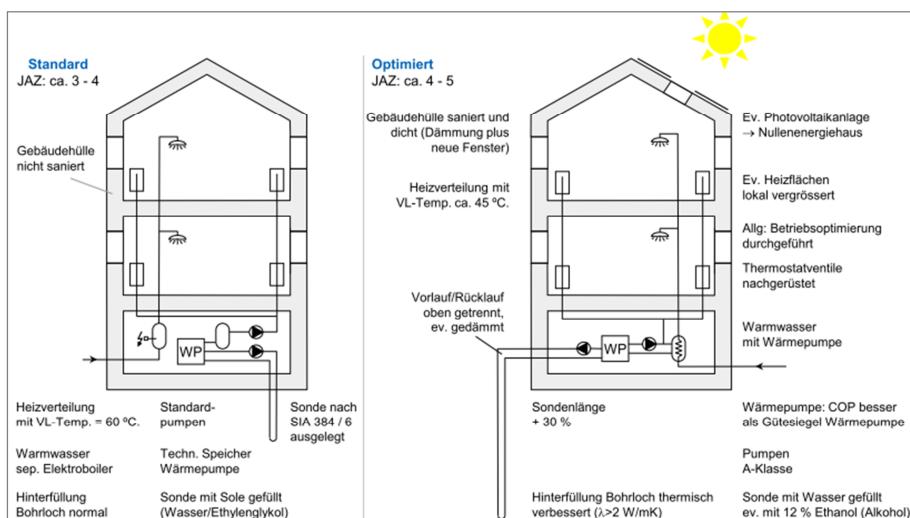


Abbildung 5.10: Gesamtoptimierung von EWS-Anlagen im Sanierungsfall¹⁹²

¹⁹⁰ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 98 bis 100.

¹⁹¹ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 98 bis 100.

¹⁹² Quelle: <http://www.erdsondenoptimierung.ch/gesamtoptimierung/>. Datum des Zugriffs: 5.Oktober.2015.

5.7.3 Zusammenfassung der Optimierungspotenziale von Erdwärmesondenanlagen

Der Optimierung von Erdwärmesondenanlagen ist ein großer Stellenwert zuzuschreiben, da diese Prozesse neben der Qualität vor allem die Effizienz einer Anlage zum Heizen und Kühlen steigern. Diesbezüglich werden derzeit folgende Faktoren als maßgebend erachtet:

1. Verbesserung der Wärmeträgerflüssigkeit in Bezug auf das hauptsächlich angewendete Wasser-Glykol-Gemisch
2. Verbesserung der Sondenhinterfüllung im Vergleich zur Zement-Bentonit-Suspension
3. Entwicklung hocheffizienter Umwälzpumpen
4. Sonden mit Wasser anstatt der üblichen Sole-Mischung
5. Tiefere Sonden
6. Aktive Regeneration in den Sommermonaten
7. Optimierung des Bohrlochdurchmessers¹⁹³

Andere Grundlagen und Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich der Wärmepumpen- sowie Heiztechnik wurden bereits im Kapitel 2 – „Oberflächennahe Geothermiesysteme“ behandelt und sind diesem zu entnehmen.

Abschließend wurden infolge der Literaturrecherche einige wichtige Optimierungspotenziale für Erdwärmesondenanlagen zusammengefasst:

- Bemessung von Erdwärmesonden:
 - Bei einer Auswertung der Betriebsdaten von Erdwärmesonden in Oberösterreich im Jahr 2008/2009 konnte eine starke Unterschätzung des Energieverbrauchs zum Heizen festgestellt werden. Daraus resultierten Anlagenunterdimensionierungen und hohe Jahresbetriebsstunden der Wärmepumpe. Der Medianwert der Betriebsstunden lag bei **2016 h/a**.¹⁹⁴
 - Bei der Sondenbemessung nach dem ÖWAV-Regelblatt 207 (RB_207_2_Bemessung_Erdwärmesonden.xls, Stand: Oktober 2010) ist unbedingt darauf zu achten, dass diese von

¹⁹³ Vgl. HUBBUCH, M.: Optimierung von Erdwärmesonden (Jahresbericht). S. 1/6.

¹⁹⁴ Vgl. ASCHAUER, J.: Auswertung der Betriebsdaten von Erdwärmesonden und Ableitung des Wärmeleistungskatasters Oberösterreich. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62/Juni 2010. S. 91.

einer fachkundigen Person durchgeführt wird. Des Weiteren sind **wichtige Parameter**, wie etwa die Wärmeleitfähigkeit, die Entzugsleistung sowie die richtige Wahl der Korrekturfaktoren (KF1 & KF2) auf Plausibilität und Richtigkeit zu überprüfen, da diese Faktoren wesentlich die Sondenlänge bzw. Anlagenleistung beeinflussen.

- Thermisch optimierte Verpresssuspensionen werden in Österreich noch nicht in ausreichendem Umfang verwendet:
 - Die Wärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials sollte jedoch dem Niveau des umgebenden Gebirges entsprechen, um nicht thermisch isolierend zu wirken.¹⁹⁵
 - Thermisch optimierte Suspensionen weisen i.d.R. wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeiten von **bis zu 2,4 W/(m*K)** auf, weshalb die Verwendung von thermisch verbesserten Materialen empfohlen wird.¹⁹⁶
 - Durch die Verwendung von Suspensionen mit einer Wärmeleitfähigkeit von 2,0 W/(m*K) kann der thermische Bohrlochwiderstand in Bezug auf Baustellenmischungen mit 0,8 W/(m*K) halbiert werden. Infolgedessen ergibt diese Maßnahme eine **etwa 2 C°** höhere Temperatur im Sondenfluid, wodurch auch die Jahresarbeitszahl um ca. 10 % angehoben werden kann.¹⁹⁷
- Die Sondenart (Simplex/Duplex) und der Sondendurchmesser beeinflussen die Entzugsleistung:
 - Simplex Sonden (\varnothing 40 mm) weisen gegenüber Duplex Sonden (\varnothing 32 mm) bei einer Spreize von 3 K eine um **13 bis 19 %** geringere Entzugsleistung auf.
 - Von der Errichtung von Simplex-Sonden wird abgeraten.¹⁹⁸

¹⁹⁵ Vgl. BERGER, H.: Erdwärmesonden - Hauptprobleme durch Planung und Erstellung. In: Deutsche Brunnenbauertage 2009, 04/2009/2009. S. 17 und 18.

¹⁹⁶ Vgl. NIEDERBRUCKNER, R.: Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren zur Optimierung der Entzugsleistung von Erdwärmesonden. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62/Juni 2010. S. 102 bis 104.

¹⁹⁷ Vgl. HUBBUCH, M.: Optimierung von Erdwärmesonden (Jahresbericht). S. 4/6.

¹⁹⁸ Vgl. ASCHAUER, J.: Auswertung der Betriebsdaten von Erdwärmesonden und Ableitung des Wärmeleitfähigkeitskatasters Oberösterreich. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62/Juni 2010. S. 93.

- Abstandhalter:
 - Rechenmodelle zeigen eine Effizienzsteigerung der Anlage durch den Einsatz von Innenabstandhalter um **ca. 5 bis 8 %.**¹⁹⁹
- Rohrhydraulik:
 - Eine laminare Strömung des Wärmeträgermediums führt zu einer Abkühlung der Soletemperatur um **1,5 K**. Dies führt wiederum zu einem erhöhten Stromverbrauch des Kompressors um etwa **4,5 %.**²⁰⁰
- Betriebsoptimierung:
 - Im ersten Jahr nach der Inbetriebnahme sollte eine Betriebsoptimierung wichtiger Bauteile (z.B. Wärmepumpe, Regler, etc.) stattfinden. Dadurch können Stromeinsparungen im Bereich von **10 bis 30 %** erreicht werden.²⁰¹

¹⁹⁹ Vgl. BERGER, H.: Erdwärmesonden - Hauptprobleme durch Planung und Erstellung. In: Deutsche Brunnenbauertage 2009, 04/2009/2009. S. 17.

²⁰⁰ Vgl. SCHWEIZERISCHER INGENIEUR- UND ARCHITEKTENVEREIN: SIA 384/6 - Erdwärmesonden. S. 56.

²⁰¹ Vgl. <http://www.erdsondenoptimierung.ch/gesamtoptimierung/>. Datum des Zugriffs: 5.Oktobe.2015.

6 Praxisbeispiel: Die Herstellung von Erdwärmesonden

Dieses Kapitel veranschaulicht die Realisierung einer Erdwärmesondenanlage anhand eines praktischen Beispiels. Zunächst erfolgt eine Einführung in das Projektvorhaben unter Beschreibung der wichtigsten Randbedingungen. Anschließend wird auf die Herstellung der Tiefensonden mittels Fotodokumentation eingegangen.

6.1 Projektbeschreibung

Die geplante Erdwärmesondenanlage befindet sich in Graz im Bezirk St. Peter. Dabei handelt es sich um ein Einfamilienhaus mit einer Brutto-Grundfläche von rund 499 m². Das Gebäude verfügt dabei über eine Tiefgarage, einen Keller mit Technikraum sowie über ein Schwimmbecken.

Für die Anlage ergab sich unter Berücksichtigung der Heizlastberechnung und der Warmwasseraufbereitung nach dem ÖWAV-Berechnungsblatt eine Sondengesamtlänge von 470 m, worauf 5 Simplex-Sonden (\varnothing 40 mm) mit je 100 m vorgesehen wurden. Die geplante Wärmepumpe sollte dabei im monovalenten Betrieb die Raumheizung sowie die Warmwasseraufbereitung inkl. der Aufheizung des Wassers für den Pool übernehmen.

6.1.1 Einreichunterlagen

Die für die Durchführung der Erdwärmesondenanlage notwendigen Bewilligungsunterlagen wurden in Form eines wasserrechtlichen Einreichprojekts zusammengefasst und aufbereitet. Zum Inhalt dieses Dokuments zählen der Technische Bericht, die fachtechnische Stellungnahme seitens der Geologie, die Heizlastberechnung und der Energieausweis, die Datenblätter der Wärmepumpenanlage, der Bohrmaßnahmen und der Erdwärmesonden sowie die Planbeilagen.

Aufgrund der Lage des Anlagenstandortes in der Zone des „Grazer und Leibnitzer Feld“ ist das Bauvorhaben anzugepflichtig. In diesen Bereichen ist bis ca. 100 m Tiefe mit einem Antreffen von gespanntem oder artesisch gespanntem Grundwasser nicht zu rechnen.

6.1.2 Geologische und Hydrogeologische Vorerkundung

Für den Projektstandort lagen seitens der Geologie keine detaillierten Bodenaufschlüsse vor. Jedoch konnte unter Berücksichtigung der geologischen Karte und den geomorphologischen Verhältnissen ein zu erwar-

tender Bodenaufbau bestimmt werden. Dem Untergrund wurden dabei folgende Schichten zugeordnet:

- mehrere Meter mächtige Decklehmschicht, gefolgt von quartär umgelagerten Hangsedimenten (Feinsanden)
- in weiterer Folge unterlagert von mächtigen neogenen Sedimenten (Wechselsequenz aus Tonen bis Tonmergeln, Schluffen, Sanden und Kiesen, welche teilweise lignitführend sein können)
- im Liegenden der neogenen Sedimentablagerungen folgen schließlich Bereiche des kristallinen Grundgebirges (Karbonate, Phyllite bis Grünschiefer)²⁰²

Im Zuge der Vorerkundung wurde durch den Geologen des Weiteren auf die Gefahr einer erhöhten Rutschneigung - auch flacherer Hänge - infolge erhöhter Wassersättigung hingewiesen, zumal sich eine solche Fläche in etwa 200 m Entfernung vom Anlagenstandort befindet. Ebenfalls konnte ein Austritt von brennbaren Gasen, vor allem innerhalb der neogenen Ablagerungen nicht ausgeschlossen werden.

Eine Existenz von wasserführenden Schichten wurde bei der hydrogeologischen Betrachtung anhand der Daten des geographischen Informationsdienstes (GIS) nicht festgestellt. Jedoch konnten anhand der geologischen Verhältnisse etwaige wasserführende Schichtbereiche, welche gespannt oder artesisch gespannte Wässer aufweisen können, nicht ausgeschlossen werden.

6.2 Herstellen der Erdwärmesondenbohrungen

Da im Zuge der Durchörterungen durch die Bohrarbeiten gespannte bis artesisch gespannte Grundwasserkörper nicht auszuschließen waren, wurde die Abteufung der Bohrungen an Auflagen geknüpft. Dabei sollte die Tiefenbohrung möglichst verrohrt mittels Rotationsspülbohrung niedergebracht werden. Diese Maßnahme dient der Vermeidung von Umläufigkeiten bzw. hydraulischen Kurzschlüssen von Grundwasserstockwerken. Des Weiteren sollte die Stützverrohrung in eine Tiefe von mindestens 30 m abgeteuft werden.

²⁰² Quelle: Fachtechnische Stellungnahme Geologie/Hydrologie der Geologie & Grundwasser GmbH. S. 5 bis 7.

Das Bohrgerät für die Erdwärmesonden ist mit einer Doppelkopfbohranlage ausgerüstet, wodurch sich das Bohrgestänge sowie die Schutzverrohrung gleichzeitig und gegendrehend abteufen lassen.

Die unten angeführten Abbildungen zeigen das Aufstellen der Bohranlage mit dem Bohrstrang (bestehend aus der Stützverrohrung und dem Bohrgestänge).



Abbildung 6.1: Aufstellen und einrichten des Bohrgeräts²⁰³

Nach dem Einrichten des Bohrgerätes konnte mit der Bohrung begonnen werden. In der ersten Phase wurde die Verrohrung auf 38 Tiefenmeter bei einem Durchmesser von 140 mm mitgeführt, da die grundwasserstauende Schicht bei etwa -31 m begann. Der Austrag des Bohrgutes an die Oberfläche erfolgte dabei zwischen Bohrgestänge und Stützrohr mittels Lufthebeverfahren. Die dafür notwendige Druckluft wurde mit Hilfe eines Kompressors, welcher maximal 25 bar leistet, bereitgestellt.

Die folgende Abbildung zeigt den Austrag des Bohrgutes durch das Lufthebeverfahren.

²⁰³ Quelle: Eigene Fotodokumentation eines EWS-Bauvorhabens (Fa. SCHLEICH GEO GmbH).

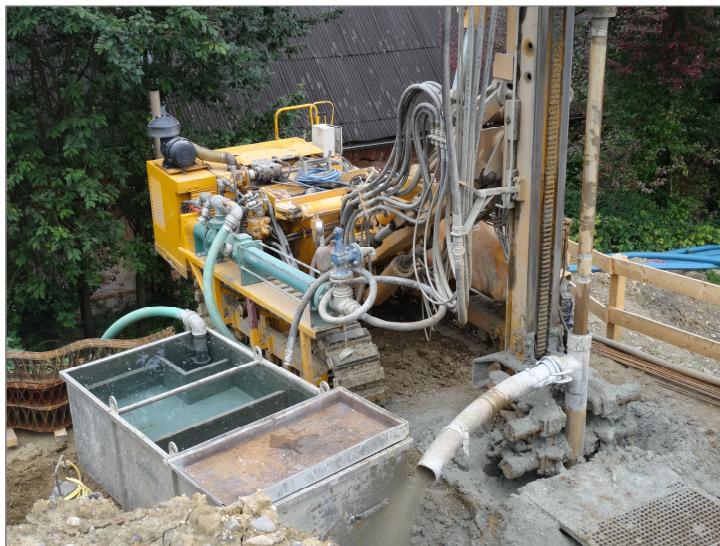


Abbildung 6.2: Austrag des Bohrgutes beim Lufthebeverfahren²⁰⁴

Nachdem eine Tiefe von 38 m erreicht war und die Stützverrohrung genügend in den Grundwasserstauer eingepresst wurde, erfolgte die Umstellung auf das Spülbohrverfahren. Dabei wird anstatt Luft, Wasser genutzt, um den Bohrgutaustrag zu gewährleisten. Der Spülstrom gelangt hier, wie beim Lufthebebohren, innerhalb des Gestänges zum Bohrwerkzeug (Stufenmeißel) und steigt danach über den Ringraum an die Oberfläche. Im Absetzbecken erfolgt schließlich die Sedimentation, wodurch die „saubere“ Suspension wieder dem Bohrkreislauf zugeführt werden kann.

In weiterer Folge wurde die Bohrung nur mittels Bohrgestänge, ohne Stützverrohrung, auf die Endtiefe von 100 m abgeteuft. Der Bohrlochdurchmesser betrug hier allerdings nur mehr 115 mm.

Das Spülbohrverfahren mit dem zwischengeschalteten Spülbecken kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

²⁰⁴ Quelle: Eigene Fotodokumentation eines EWS-Bauvorhabens (Fa. SCHLEICH GEO GmbH).



Abbildung 6.3: Austrag des Bohrgutes beim Spülbohrverfahren²⁰⁵

6.3 Einbringen und Verpressen der Sonden

Nach dem Erreichen der Endtiefen von 100 m wurde das Bohrgestänge ausgezogen und die Sondenniederbringung vorbereitet. Zu den vorbereitenden Maßnahmen zählten die Sichtprüfung der Sondenrohre auf Beschädigungen sowie das Füllen der Rohre mit Wasser, um ein Auftreiben zu verhindern. Anschließend wurden die Rohre auf eine Haspel aufgesetzt und am Sondenfuß ein Gewicht angebracht. Abschließend wurde unmittelbar über dem Fußstück das Verpressrohr angebracht. Da die Sonden nun zum Einbringen vorbereitet waren, begann man diese im Bohrloch abzusenken. Nach der Niederbringung wurden die Sondenleitungen sowie das Verpressrohr mit Klebeband verschlossen, um Einträge jeglicher Art zu verhindern.

Die weiteren Abbildungen geben dabei einen Überblick über diesen Vorgang.

²⁰⁵ Quelle: Eigene Fotodokumentation eines EWS-Bauvorhabens (Fa. SCHLEICH GEO GmbH).



Abbildung 6.4: Einbringen der Sonde mit Hilfe einer Haspel²⁰⁶

Nach dem Einbringen der Sonde zog man die Stützverrohrung wieder aus dem Untergrund und bereitete die Verpressung des Bohrlochs mittels Baustellenmischung vor. Dazu wurden die Sondenrohre entlüftet sowie druckdicht verschlossen. Die Baustellenmischung bereitete man chargenweise gemäß Rezeptur des ÖWAV-Regelblatts 207 in einem Mischbehältnis auf. Unmittelbar danach erfolgte schließlich die Verpressung des Bohrlochringraums von unten nach oben, wobei die Druckverhältnisse während des Einbaus beobachtet wurden. Der Verpressvorgang wurde nach austreten der Suspension noch weiter fortgeführt, um die vollständige Verdrängung der Bohrspülung gewährleisten zu können. Nach Beendigung der Bohrlochverpressung erfolgte unter Einhaltung der Ruhephase abschließend die Durchfluss- und Druckprüfung.

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über das Mischbehältnis mit dazugehöriger Verpresspumpe, die Verpressung des Bohrlochs nach Austritt der Hinterfüllsuspension sowie die letztendlich fertiggestellte Erdwärmesonde.

²⁰⁶ Quelle: Eigene Fotodokumentation eines EWS-Bauvorhabens (Fa. SCHLEICH GEO GmbH).



Abbildung 6.5: Veranschaulichung des Verpressvorgangs²⁰⁷

Die im Weiteren durchzuführenden Arbeiten zur Fertigstellung der Erdwärmesondenanlage umfassen die Herstellung der Sondenzuleitungen, des Verteilerschachtes zur Zusammenführung der fünf Sonden sowie die Anbindung an die Wärmepumpe im Gebäude. Aufgrund des Bauablaufs konnten diese Arbeitsschritte leider nicht mehr in die Arbeit aufgenommen werden.

Zusammenfassend wurden durch dieses Kapitel die wesentlichen Abläufe beschrieben, um eine Erdwärmesonde herzustellen. Bezuglich des Herstellungsprozesses ist im Besonderen auf eine ausreichende Qualifikation und Erfahrung des Bohrmeisters als auch des Hilfspersonals zu achten, da die Qualität der Sondenherstellung maßgeblich von diesen Personen abhängt.

²⁰⁷ Quelle: Eigene Fotodokumentation eines EWS-Bauvorhabens (Fa. SCHLEICH GEO GmbH).

7 Wirtschaftlichkeit

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die Methodik von Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Heizanlagen. Dementsprechend werden zunächst die wichtigsten Verfahren angeführt und in weiterer Folge die Annuitätenmethode näher erläutert, da diese in Österreich als auch in Deutschland zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit herangezogen wird. Zusätzlich wurde ein Heizanlagenvergleich von fünf verschiedenen Heizsystemen durchgeführt.

Das Ziel einer Wirtschaftlichkeitsberechnung ist die Einschätzung des geringsten finanziellen Risikos verschiedener Anlagenvarianten bezüglich ihres Kapitaleinsatzes (über einen gewissen zeitlichen Verlauf). Da eine wirtschaftliche Bewertung aber von sehr vielen Faktoren abhängt, genügt es nicht, sich ausschließlich auf die Anlagenkosten zu beziehen. Für eine ganzheitliche Betrachtung sind etwa die Kosten aus der geologischen Erschließung, der spezifischen Anlagenkonfiguration, der benötigten elektrischen Energie, der Instandhaltung sowie die Betriebskosten zu berücksichtigen.²⁰⁸

Aus diesem Grund erfolgt zu Beginn dieses Abschnitts eine Erläuterung der Grundlagen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Der Hauptteil dieses Kapitels widmet sich anschließend der Beschreibung des Berechnungsablaufs der Annuitätenmethode, welche die Grundlage für den Heizanlagenvergleich bildet. Dabei wurde eine Öl-, Pellet-, Gasheizanlage sowie eine Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage mit einer Erdwärmesondenanlage verglichen und ihre Wirtschaftlichkeit bewertet. Abschließend erfolgt die Beschreibung des Anlagenvergleichs mit Darstellung der Ergebnisse der verschiedenen Heizanlagen. Die vollständigen Berechnungsblätter dieses Kostenvergleichs sind dem Anhang 9.1 bis 9.8 am Ende der Arbeit zu entnehmen.

7.1 Berechnungsverfahren

Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit einer Investition dienen sowohl statische als auch dynamische Verfahren.²⁰⁹

Der Nachteil des **statischen Verfahrens** liegt jedoch darin, dass dieses lediglich die wirtschaftliche Situation einer Periode betrachtet, also nur eines Jahres. Zudem arbeitet diese Methode mit sehr vereinfachenden Annahmen, wie etwa einer mangelnden Beachtung des Zahlungszeitpunktes durch fehlende sachgerechte Verzinsung. Eine Übertragung der

²⁰⁸ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 115.

²⁰⁹ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 115.

Rechenergebnisse in die Praxis als Investitionsentscheidung ist damit an sich sehr gefährlich. Aus diesem Grund sollten statische Investitionsverfahren für bedeutende Investitionen mit relativ hohem Kapitaleinsatz nicht mehr herangezogen werden. Im Gegensatz zu den oben genannten Nachteilen, berücksichtigen **dynamische Verfahren** für die Bewertung von Investitionen den unterschiedlichen zeitlichen Anfall von Zahlungen (über den gesamten Betrachtungszeitraum) sowie ihre daraus entstehende Verzinsung anhand eines festgelegten Zinssatzes.²¹⁰

7.2 Kostenarten

Die Grundlage einer Wirtschaftlichkeitsberechnung ist eine detaillierte Erfassung der Gesamtkosten. Dabei können die Kosten in einmalige und laufende Zahlungen unterteilt werden. In weiterer Folge ergeben sich nach der VDI 2067 Blatt 1:2012 daraus

- kapitalgebundene,
- bedarfs-(verbrauchs-) gebundene,
- betriebsgebundene und
- sonstige Kosten.

Kapitalgebundene Kosten

Darunter versteht man Zahlungen, welche sich aus der Investitionstätigkeit der Anlage ergeben. Dazu zählen technische und bauliche Anlagen, Maßnahmen zum Schall- und Wärmeschutz sowie Anschlusskosten.

Bedarfs-(verbrauchs-) gebundene Kosten

Hierzu zählen alle Kosten, die notwendig sind um den Jahresenergiebedarf (Endenergie) eines Objektes vollständig zu decken. Dies sind in erster Linie die Energiekosten des jeweiligen Rohstoffs bzw. Energieträgers (inkl. Einbringung), die Kosten für die Hilfsenergie als auch für Betriebsmittel (Schmierstoffe, Additive, Chemikalien usw.).

Betriebsgebundene Kosten

Die betriebsgebundenen Kostenanteile bestehen im Wesentlichen aus den Kosten der Instandhaltung und dem Bedienen (Betätigen). Unter

²¹⁰ Vgl. POGGENSEE, K.: Investitionsrechnung - Grundlagen, Aufgaben, Lösungen; 2. Auflage. S. 38 und 39 sowie 106 bis 108.

Instandhaltung ist der Aufwand für die Instandsetzung, Wartung, Inspektion sowie für die Schwachstellenbeseitigung zu verstehen. Die Bedienung bezeichnet alle Arbeiten, die durch Personal für einen reibungslosen Betrieb der Anlage durchzuführen sind.

Sonstige Kosten

Hierzu zählen Kosten für die Planung, für Versicherungen und Steuern, allgemeine Abgaben, Verwaltungskosten sowie etwa Abbruch- und Entsorgungskosten.²¹¹

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die verschiedenen Kostengruppen und Kostenarten anhand einiger Beispiele.

Tabelle 7.1: Beispiele zu Kostengruppen und Kostenarten nach VDI 2067 Blatt 1:2012²¹²

| | Kapitalgebundene Kosten: | Bedarfsgebundene Kosten: | Betriebsgebundene Kosten: | Sonstige Kosten: |
|----------------------|---|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Kostengruppen | Anlagenkomponenten (z.B. Wärmeerzeuger, Verteilung, etc.) | Energiekosten | Instandsetzung | Planungskosten |
| | bauliche Anlagen (z.B. Heizräume, etc.) | Kosten für Hilfsenergie | Wartung u. Inspektion | Versicherungen und Steuern |
| | Anschlusskosten | Kosten für Betriebsstoffe | Bedienung | allg. Abgaben |
| | Kosten aus Schall- und Wärmeschutz | | Reinigen | anteilige Verwaltungskosten |
| | | | | Gewinn u. Verlust |
| | | | | Abbruch- u. Entsorgungskosten |

7.3 Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Infolge der bereits in Punkt 7.1 beschriebenen Vorteile soll hier näher auf die dynamische Investitionsrechnung eingegangen werden.

Die Wirtschaftlichkeit von Investitionen kann innerhalb des dynamischen Verfahrens durch verschiedene Methoden (z.B. durch den Kapitalwert, die Annuität, den interner Zinssatz, der Amortisation bzw. mit Hilfe eines

²¹¹ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 4 bis 16.

²¹² Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 21.

vollständigen Finanzplans) bestimmt werden.²¹³ In Österreich als auch in Deutschland erfolgt eine solche Wirtschaftlichkeitsbeurteilung verschiedener Heizsysteme unter anderem durch die **Annuitätenmethode**. Sie stellt das übliche Verfahren dar und hat den Vorteil, dass sämtliche Kostenarten übersichtlich ermittelt und deren periodische Anteile in einer Grafik zu Vergleichszwecken dargestellt werden können. Aufgrund dieser Tatsache wird hier im Besonderen dieses Verfahren erläutert und die Berechnung der Gesamtannuität zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Heizungsanlage schrittweise angeführt. Des Weiteren soll darauf hingewiesen werden, dass der Ermittlung der Gesamtannuität die Deutsche Richtlinie „**VDI 2067 Blatt 1:2012 Wirtschaftlichkeit gebäude-technischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung**“ zugrunde gelegt wird. Dieses Vorgehen ist einerseits in der in Deutschland weitaus größer zur Verfügung stehenden Datenlage zu Vergleichszwecken begründet und andererseits der Tatsache geschuldet, dass die Österreichische Berechnungssoftware „**Betriebswirtschaftliche Vergleichsrechnung für Energiesysteme nach ÖN M 7140 - Updateversion BVE 10.6:2015**“ die Richtwerte der VDI 2067 Blatt 1 verwendet.

7.3.1 Kapitalwertmethode

Da die Annuitätenmethode eine Variante der Kapitalwertmethode darstellt, wird hier zunächst auf das Kapitalwertverfahren näher eingegangen. Zusätzlich wird ein sehr vereinfachtes Rechenbeispiel vorgestellt, um einerseits den grundlegenden Ablauf der Ermittlung des Kapitalwertes zu veranschaulichen sowie andererseits die Verbindung zur Annuitätenmethode herzustellen.

Die Kapitalwertmethode stellt dabei das klassische dynamische Investitionsverfahren dar. Dadurch ist es möglich, **die zu verschiedenen Zeitpunkten anfallenden Ausgaben und Einnahmen** unterschiedlicher Anlagen miteinander zu vergleichen sowie herauszufinden, ob die Investition empfehlenswert ist. Der „Zielwert“ der Kapitalwertmethode ist der Kapitalwert, welcher mit C_0 aber auch durch KW abgekürzt und gekennzeichnet werden kann.²¹⁴ Er trifft eine Aussage über die Vorteilhaftigkeit eines Investitionsobjektes und wird als, **auf den Bezugszeitpunkt abgezinste Wert aller Einnahmen und Ausgaben** (Cash-Flow), definiert. Ist der Kapitalwert $C_0 > 0$, so gilt eine Investition als vorteilhaft.²¹⁵

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über den Berechnungsablauf zur Ermittlung des Kapitalwerts.

²¹³ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 16.

²¹⁴ Vgl. POGGENSEE, K.: Investitionsrechnung - Grundlagen, Aufgaben, Lösungen; 2. Auflage. S. 124.

²¹⁵ Vgl. BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. S. 41 (Kap. 7).

| Perioden Schema \ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
|----------------------|---|---|---|---|---|--|
| Einnahmen | | | | | | |
| - Ausgaben | | | | | | |
| = Zeitwert-CF | | | | | | |
| * Abzinsungsfkt. | | | | | | |
| = Barwert-CF | | | | | | |

**Summe d. Barwert-CF
= Kapitalwert**

Abbildung 7.1: Berechnungsschema des Kapitalwerts²¹⁶

Zum besseren Verständnis folgt nun ein Beispiel nach der oben angeführten Abbildung, um einen solchen Berechnungsablauf zu beschreiben. Als Ausgangsbasis wird dazu ein Investitionsbetrag in der Höhe von 30.000 Euro für ein fiktives Projektvorhaben bei einer Nutzungsdauer von 4 Jahren angenommen. Dieser Betrag ist somit dem Feld „Ausgaben“ zum Investitionszeitpunkt null in der ersten Spalte des Berechnungsschemas zuzurechnen. Des Weiteren wird festgelegt, dass durch das Projekt jährliche Erlöse (Einnahmen) in der Höhe von 12.000 Euro entstehen aber auch Ausgaben von 1.000 Euro zu tätigen sind. Dabei werden diese Zahlungsfolgen über die gesamte Projektdauer, also über 4 Jahre aufgetragen (siehe unten angeführte Tabelle).

Tabelle 7.2: Berechnungsbeispiel des Kapitalwerts²¹⁷

| Perioden Schema \ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
|--------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--|
| + Einnahmen | 0 | 12.000 | 12.000 | 12.000 | 12.000 | |
| - Ausgaben | 30.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | |
| = Zeitwert-CF | -30.000 | 11.000 | 11.000 | 11.000 | 11.000 | |
| * Abzinsungsfkt.: $(1+i)^{-n}$ | 1,000 | 0,952 | 0,907 | 0,864 | 0,823 | |
| = Barwert-CF | -30.000 | 10.476 | 9.977 | 9.502 | 9.050 | |

**Summe d. Barwert-CF
= Kapitalwert
9005 Euro**

gewählter Zinssatz: 5 %

Als Nächstes ist für jede Periode die Differenz aller Einnahmen und Ausgaben (Zeitwert-Cash-Flow genannt) zu bilden. Dadurch können diese Beträge in weiterer Folge mit den zugehörigen Abzinsungsfaktoren multipliziert werden. Die Berechnung der Faktoren erfolgt mit Hilfe des Abzinsungsfaktors $(1+i)^{-n}$, wobei i den Zinssatz und n die Anzahl der Zinsperioden bezeichnet. Somit können durch die Abzinsung (Diskontierung)

²¹⁶ Quelle: BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. S. 46 (Kap. 7).²¹⁷ Quelle: Eigene Tabelle nach BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. S. 46 (Kap. 7).

zukünftige Zahlungen auf ihren heutigen Wert (Bezugszeitpunkt null) umgerechnet werden. Die dadurch errechneten Barwerte (Barwert-Cash-Flow genannt), also jene Werte einer Zahlung, die auf ihren Bezugszeitpunkt auf- bzw. abgezinst wurden, bilden bei ihrer Aufsummierung schließlich den Kapitalwert.²¹⁸ Dieser entsteht also aus der Summe aller abgezinsten (diskontierten) Zahlungen über die gesamte Laufzeit von 4 Jahren abzüglich des Investitionsbetrages und beträgt in diesem Beispiel 9005 Euro. Vereinfacht ausgedrückt entspricht der Kapitalwert somit jener Geldmenge, die man zum Zeitpunkt null **mehr** zur Verfügung hat, wenn man in das Projekt investiert.

Im Gegensatz zur Kapitalwertmethode verteilt die Annuitätenmethode den Kapitalwert mittels Annuitätenfaktor a gleichmäßig auf die Zinsperioden bzw. die Nutzungsdauer. Sie vergleicht also die durchschnittlichen Einnahmen und Ausgaben, wobei die Grundlagen der Kapitalwertmethode herangezogen werden. Dadurch wird als Ergebnis nicht der Gesamterfolg der Investition festgestellt, sondern ihr Periodenerfolg ermittelt.²¹⁹ Die folgende Grafik veranschaulicht das vereinfachte dargestellte Schema der Annuitätenmethode.

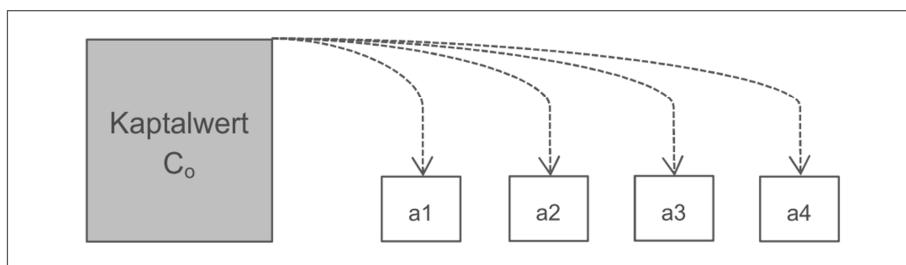


Abbildung 7.2: Vereinfachtes Schema der Annuitätenmethode²²⁰

Die Abbildung zeigt die Verteilung des Kapitalwerts C_0 anhand der Annuitäten a auf die entsprechenden Perioden. Beide Methoden führen unter gleichen Annahmen zu selben Ergebnissen.

7.3.2 Annuitätenmethode

Wie bereits erläutert wurde, transformiert die Annuitätenmethode nicht periodische und periodische Zahlungen mit veränderlichen Beträgen (während eines Betrachtungszeitraums) in **periodische konstante Zahlungen**.

²¹⁸ Vgl. BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. S. 35 bis 47 (Kap. 7).

²¹⁹ Vgl. BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. S. 50 (Kap. 7).

²²⁰ Vgl. POGGENSEE, K.: Investitionsrechnung - Grundlagen, Aufgaben, Lösungen; 2. Auflage. S. 146.

lungen. Dabei werden die während dieser Betrachtung auftretenden Zins- und Preisänderungseffekte ebenfalls berücksichtigt.

Dieses Verfahren gestattet es also, die zu verschiedenen Zeitpunkten (Perioden) anfallenden Zahlungsarten unmittelbar aufzusummen. Dadurch ist es möglich, Investitionsbeträge und laufende Zahlungen, die Änderungen unterworfen sind, mit Hilfe des s.g. **Annuitätenfaktors a** in durchschnittliche Zahlungsbeträge innerhalb eines Betrachtungszeitraums T umzurechnen.²²¹ Die **Annuität** kann dabei als jährlich gleichbleibender Zahlungsrückfluss (bestehend aus einem Zins- und Tilgungsanteil) einer Schuld verstanden werden.²²²

Die Differenz aus der Annuität der Erlöse und der Summe der Teilannuitäten (kapital-, bedarfs-(verbrauchs-) und betriebsgebundene sowie sonstige Kosten) bildet die Gesamtannuität A_N . Aufgrund des Entfalls von Erlösen durch Mieteinnahmen bzw. den Energieverkauf (Wärme, Kälte, Strom usw.) ist das Ergebnis der Aufsummierung aller Annuitäten bei privaten Heizanlagen immer negativ. Dies bedeutet, dass die günstigste Anlage jene ist, bei der die geringsten (negativen) Kosten entstehen.²²³

7.4 Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätenmethode anhand der VDI 2067 Blatt 1:2012

Die folgenden Seiten dienen der Erläuterung des Berechnungsablaufs für die Ermittlung aller relevanten Kosten eines Heizsystems anhand der Annuitätenmethode nach der VDI 2067 Blatt 1:2012. Diese Vorgehensweise wird in weiterer Folge ebenfalls für das Berechnungsbeispiel (siehe Anhang) verwendet.

Der hier beschriebene Ablauf der Berechnungen kann zur besseren Übersicht in folgende Punkte unterteilt werden:

1. Ermittlung der Finanzierungsdaten (siehe Punkt 7.4.1):

- Zinsfaktor
- Preisänderungsfaktoren
- preisdynamische Barwertfaktoren
- Kapitalwiedergewinnungsfaktor (Annuitätenfaktor)

²²¹ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. S. 39.

²²² Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 4.

²²³ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 20.

2. Ermittlung der kapital- und betriebsgebundenen Kosten (siehe Punkt 7.4.2):

- Investitionskosten
- Instandhaltungskosten
- Kosten aus dem Bedienaufwand

3. Ermittlung der bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten (siehe Punkt 7.4.3):

- Rohstoffpreis
- Energiepreis
- Gebühren, Abgaben, Pauschalen
- Nutzungsgrade bzw. Jahresarbeitszahlen

4. Ermittlung der sonstigen Kosten (siehe Punkt 7.4.4):

- Versicherungen
- Steuern und allgemeine Abgaben

5. Berechnung der Gesamtannuität (siehe Punkt 7.4.5):

- Aufsummierung aller Annuitäten der Kostenarten

7.4.1 Ermittlung der Finanzierungsdaten

Das Berechnungsverfahren nach der VDI 2067 Blatt 1:2012 bietet die Möglichkeit der **Berücksichtigung von Zins- und Preisänderungen innerhalb eines Betrachtungszeitraums**. Dies ist vor allem für große Betrachtungszeiträume von Bedeutung, da in der Regel unterschiedliche Änderungsraten für Investitions-, Instandhaltungs-, Personal- sowie für Energiekosten anzusetzen sind. Werden solche Zins- und Preisänderungen nicht mit dem Auftraggeber vereinbart, können diese Änderungsraten anhand der langjährigen statistischen Preisindizes ermittelt werden.²²⁴

Zu beachten ist allerdings, dass der Betrachtungszeitraum der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auch nicht zu hoch angesetzt werden sollte. Denn einerseits steigt die Unsicherheit der Schätzung der Zahlungsänderungen und andererseits kann es zu unrealistisch hohen Beträgen aufgrund des exponentiellen Kostenverlaufs kommen.²²⁵

²²⁴ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 12.

²²⁵ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. S. 11.

7.4.1.1 Zinsfaktor q

Möchte man Geldbeträge, die zu verschiedenen Zeitpunkten anfallen, vergleichbar machen, muss der Einfluss von Zinsen (durch Auf- bzw. Abzinsung) berücksichtigt werden.²²⁶ Dieser „Zeitwert“ des Geldes kann durch den Zinsfaktor q berechnet werden (siehe Gl. 7.1).

$$q = (1+i) \text{ [%]} \text{ mit: } i = \frac{p}{100} \quad [\text{Gl. 7.1}]^{227}$$

| | |
|-----|---|
| q | Zinsfaktor in % |
| i | Kalkulationszinssatz als Dezimalzahl in % |
| p | Nominalzins pro Jahr in % |

7.4.1.2 Preisänderungsfaktoren r_x

Preisänderungen von Investitions-, Instandhaltungs-, Personal- sowie Energiekosten können durch die Preisänderungsfaktoren r_x berücksichtigt werden (siehe Gl. 7.2). Dieser gibt an um wie viel Prozent eine Zahlung in der Folgeperiode höher oder niedriger ausfällt, als in der Periode zuvor. Die Höhe dieser Änderungsraten sind bei exakter Betrachtung den statistischen Diensten der jeweiligen Länder zu entnehmen. Dabei ist zu beachten, dass die Raten aufgrund des exponentiellen Kostenverlaufs sehr sorgfältig angesetzt werden müssen. Denn je größer der Be trachtungszeitraum ist, desto unsicherer wird deren Abschätzung in Be zug auf ihr Eintreten. Zu hohe Werte würden somit unrealistisch hohe Beträge hervorrufen.²²⁸

$$r_x = 1 + \frac{j_x}{100} \text{ [%]} \quad [\text{Gl. 7.2}]^{229}$$

| | |
|-------|--|
| r_x | Preisänderungsfaktor in % |
| j_x | Zahlungsänderungssatz als Dezimalzahl in % |

²²⁶ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. S. 149.

²²⁷ Vgl. BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. S. 35 (Kap. 7).

²²⁸ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. S. 11.

²²⁹ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 130.

7.4.1.3 Preisdynamische Barwertfaktoren b_x

Unter dem Barwert versteht man den Wert einer Zahlung, die auf den Bezugszeitpunkt (heute -> t_0) auf- bzw. abgezinst wird.²³⁰ Er ist also **je-ner Wert, den zukünftige Zahlungen in der Gegenwart besitzen** (Berücksichtigung des Zeitwerts des Geldes). Aus diesem Grund wird der Barwert auch „Gegenstandswert bzw. Present Value“ genannt.²³¹ Sind die Kosten preisdynamischen Änderungen unterworfen, errechnet sich der Barwert nach Gl. 7.3 zu:

$$b_x = \frac{1 - \left(\frac{r_x}{q}\right)^T}{q - r_x} [-] \text{ für } r = q \text{ gilt } b = T/q \quad [\text{Gl. 7.3}]^{232}$$

| | |
|-------|--------------------------------|
| b_x | Barwertfaktor |
| r_x | Preisänderungsfaktor in % |
| q | Zinsfaktor in % |
| T | Betrachtungszeitraum in Jahren |

7.4.1.4 Kapitalwiedergewinnungsfaktor (Annuitätenfaktor)

Wie bereits bei der Annuitätenmethode unter Punkt 7.3.2 erklärt wurde, lässt sich mit Hilfe des Kapitalwiedergewinnungsfaktors bzw. des Annuitätenfaktors die Rückzahlungsrate eines Kreditbetrages anhand eines festgelegten Zinssatzes und der zugehörigen Laufzeit berechnen (siehe Gl. 7.4). Er dient also zur Umrechnung von Barwerten (von Ausgaben und/oder Einnahmen) in jährlich gleichbleibende Beträge („Annuitäten“) unter Berücksichtigung von Zins- und Tilgungsanteilen.²³³

$$a = \frac{(1+i)^T \cdot i}{[(1+i)^T - 1]} [-] \quad [\text{Gl. 7.4}]^{234}$$

| | |
|-----|---|
| a | Kapitalwiedergewinnungsfaktor bzw. Annuitätenfaktor |
| i | Zinssatz (Kalkulationszinssatz) in % |
| T | Betrachtungszeitraum in Jahren |

²³⁰ Vgl. BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. S. 41 (Kap. 7).

²³¹ Vgl. <http://welt-der-bwl.de/Barwert>. Datum des Zugriffs: 25.August.2015.

²³² Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 17.

²³³ Vgl. BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. S. 40 bis 42 (Kap. 7).

²³⁴ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 17.

7.4.2 Ermittlung der kapital- und betriebsgebundenen Kosten

Unter den **kapitalgebundenen Kostenanteilen** versteht man alle Investitionen, die der betriebstechnischen Anlage eines Heizsystems inklusive zugehöriger Bauteile zuzurechnen sind. Diese Kosten werden entweder aus Kostenberechnungen, Abschätzungen oder aufgrund der Ausschreibungsunterlagen ermittelt.

In weiterer Folge ist ein Betrachtungszeitraum „T“ festzulegen und für die einzelnen Anlagenkomponenten der Restwert zu ermitteln. Bei größeren Zeiträumen sind, entsprechend den Tabellenwerken nach VDI 2067 Blatt 1:2012 (Tabellen A1 bis A6), die entsprechenden Werte für die Ersatzbeschaffung zu berücksichtigen. Die Annuität der kapitalgebundenen Kosten ergibt sich nach Gl. 7.5 zu:²³⁵

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n - R_W) * a \quad [\text{€/Periode}]$$

[Gl. 7.5]²³⁶

| | |
|-----------------|---|
| $A_{N,K}$ | Annuität der kapitalgebundenen Kosten in €/Periode |
| A_0 | Investitionsbetrag in € |
| $A_1 \dots A_n$ | Barwert der ersten bis n-ten Ersatzbeschaffung in € |
| a | Kapitalwiedergewinnungsfaktor bzw. Annuitätenfaktor |

Die **Barwerte der Ersatzbeschaffungen** ergeben sich aus den folgenden Gleichungen zu:

$$A_1 = A_0 * \frac{r^{1+T_N}}{q^{1+T_N}} \quad [\text{€/Periode}]$$

$$A_n = A_0 * \frac{r^{n+T_N}}{q^{n+T_N}} \quad [\text{€/Periode}]$$

[Gl. 7.6]²³⁷

²³⁵ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 13 bis 17.

²³⁶ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 16.

²³⁷ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 17.

| | |
|-----------------|--|
| $A_1 \dots A_n$ | Barwert der ersten bis n-ten Ersatzbeschaffung in €/Periode |
| A_0 | Investitionsbetrag in € |
| r | Preisänderungsfaktor in % |
| n | Anzahl der Ersatzbeschaffungen innerhalb des Betrachtungszeitraums |
| T_N | Nutzungsdauer der Anlagenkomponente in Jahren |
| q | Zinsfaktor in % |

Die letzte Komponente zur Ermittlung der Annuität der kapitalgebundenen Kosten wird als **Restwert** bezeichnet (siehe Gl. 7.7).

„Er wird durch lineare Abschreibung des Investitionsbetrags bis zum Ende des Betrachtungszeitraums und Abzinsung auf den Beginn des Betrachtungszeitraums ermittelt. Übersteigt der Betrachtungszeitraum T die Nutzungsdauer T_N der betrachteten Komponente, wird nicht der (Anfangs-) Investitionsbetrag linear abgeschrieben, sondern die Ersatzinvestition.“²³⁸

$$R_W = A_0 * r^{n+T_N} * \frac{[(n+1) * T_N - T]}{T_N} * \frac{1}{q^T} \quad [\text{€/Periode}] \quad [\text{Gl. 7.7}]^{239}$$

| | |
|-------|--|
| R_W | Restwert in €/Periode |
| A_0 | Investitionsbetrag in € |
| r | Preisänderungsfaktor in % |
| n | Anzahl der Ersatzbeschaffungen innerhalb des Betrachtungszeitraums |
| T_N | Nutzungsdauer der Anlagenkomponente in Jahren |
| T | Betrachtungszeitraum in Jahren |
| q | Zinsfaktor in % |

Zu den **betriebsgebundenen Kosten** einer Heizanlage gehören im Wesentlichen die Kostenanteile für Instandhaltung und Bedienung der Anlage. Unter Instandhaltung versteht man diesbezüglich den Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Inspektion sowie die Schwachstellenbeseitigung. Die Bedienung wiederum bezeichnet alle Arbeiten, die durch

²³⁸ VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 17.

²³⁹ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 17.

Personal für einen reibungslosen Betrieb der Anlage durchzuführen sind.²⁴⁰

Betriebsgebundene Zahlungen sind entweder aus Einzelbeträgen, aus prozentualen Anteilen der Investitionsbeträge oder als Summe beider Beträge zu ermitteln.²⁴¹ Die Annuität der betriebsgebundenen Kosten errechnet sich nach Gl. 7.8 zu:

$$A_{N,B} = (A_B * b_B + A_{IN} * b_{IN}) * a \text{ [€/Periode]}$$

[Gl. 7.8]²⁴²

| | |
|-----------|---|
| $A_{N,B}$ | Annuität der betriebsgebundenen Kosten in €/Periode |
| A_B | betriebsgebundene Kosten im ersten Jahr aufgrund des Bedienungsaufwands in € |
| b_B | preisdyn. Barwertfaktor für betriebsge- bundene Kosten |
| A_{IN} | betriebsgebundene Kosten im ersten Jahr aufgrund Instandhaltung in € |
| b_{IN} | preisdyn. Barwertfaktor für Instandhaltung |
| a | Kapitalwiedergewinnungsfaktor bzw. An- nuitätenfaktor |

Die **prozentuellen Anteile** für die Instandhaltung und Bedienung sowie die rechnerische Nutzungsdauer für die einzelnen Anlagenkomponenten können anhand der Tabellen A1 bis A6 der VDI 2067 Blatt 1:2012 abgelesen und für die Ermittlung der betriebsgebundenen Kosten herangezogen werden. Die folgende Abbildung gibt dabei einen beispielhaften Überblick dieser Angaben anhand der Tabelle A2.

²⁴⁰ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 4 und 16.

²⁴¹ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. S. 5.

²⁴² Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 19.

Tabelle 7.3: Rechnerische Nutzungsdauer sowie Aufwand für Instandhaltung und Bedienung von Heizanlagen (Tabelle A2)²⁴³

| Anlagenkomponente | Rechn. Nutzungsdauer | Aufwand für Instandsetzung f_{inst} | Aufwand für Wartung und Inspektion f_{W+Insp} | Aufwand für Bedienen |
|---|----------------------|---------------------------------------|---|------------------------|
| Einheiten | Jahre | % | % | Stunden pro Jahr (h/a) |
| 1.2.4 Mess- und Regelgeräte | 15 | 1,5 | 1,5 | 0 |
| 1.2.5 Wärmedämmung von Rohrleitungen | 25 | 1 | 0 | 0 |
| 1.2.6 Rohrleitung aus gezogenem oder gewalztem Stahl | | | | |
| Warmwasser-Heizung | 40 | 1 | 0 | 0 |
| Dampf | 40 | 1 | 0 | 0 |
| Kondensat | 8 | 5 | 0 | 0 |
| Gas | 40 | 1 | 0 | 0 |
| 1.2.7 Rohrleitungen aus Kupfer | 35 | 0,5 | 0 | 0 |
| 1.2.8 Rohrleitungen aus Kunststoff | 30 | 0,5 | 0 | 0 |
| 1.3 Erzeugung | | | | |
| 1.3.1 Wärmeerzeuger | | | | |
| 1.3.1.1 Gasteuerstätte mit Brenner ohne Gebläse | | | | |
| Umlauf-Gaswasserheizer | 18 | 2 | 1,5 | 5 |
| Vorrats-Gaswasserheizer | 15 | 2 | 1,5 | 5 |
| Gas-Brennwertkessel, wandhängend, unter 100 kW | 18 | 1,5 | 1,5 | 10 |
| Gas-Brennwertkessel, bodenstehend, unter 200 kW | 20 | 1 | 1,5 | 20 |
| Gas-Brennwertkessel, bodenstehend, über 200 kW mit Neutralisationsanlage | 20 | 1 | 2 | 20 |
| 1.3.1.2 Spezialkessel für Öl- und Gasfeuerung | | | | |
| Spezialkessel für Öl- und Gasfeuerung, unter 120 kW | 20 | 2 | 1,5 | 10 |
| Kessel über 120 kW als Spezialkessel für Öl- und Gasfeuerung als Guss- oder Stahlkessel | 20 | 2 | 2 | 10 |
| 1.3.1.3 Heizkessel für Festbrennstoffe | | | | |
| Gusseiserne Gliederkessel, nur für Heizung ohne Rücklauftemperaturanhebung | 20 | 3 | 2,5 | 10 |
| Stahlkessel ähnlicher Bauart nur für Heizung ohne Rücklauftemperaturanhebung im Einfamilienhaus | 15 | 2 | 2,5 | 20 |
| Holzpellet-Heizkessel | 15 | 3 | 3 | 15 |
| Hackschnitzel-Heizkessel | 15 | 3 | 3 | 20 |
| 1.3.1.4 Schneldampferzeuger | 10 | 4 | 1,5 | 50 |
| 1.3.1.5 Großwässerraumkessel und Wasserrohrkessel > 1 MW | 25 | 2 | 1,5 | 80 |
| 1.3.1.6 Brenner | | | | |
| Gasbrenner ohne Gebläse | 20 | 1 | 2 | 0 |
| Gasbrenner mit Gebläse und Zubehör | 16 | 2 | 10 | 0 |
| Ölbrenner mit Gebläse und Zubehör | 12 | 2 | 10 | 0 |
| 1.3.1.7 Elektrische Heizung | | | | |
| Elektro-Zentralspeicher | 20 | 1 | 2 | 5 |
| 1.3.1.8 Wärme pumpen | | | | |
| Luft/Wasser (Elektro) | 18 | 1 | 1,5 | 5 |
| Sole/Wasser, Wasser/Wasser (Elektro) | 20 | 1 | 1,5 | 5 |
| Gas | 15 | 3 | 1,5 | 40 |
| 1.3.1.9 Blockheizkraftwerke | 15 | 6 | 2 | 100 |

7.4.3 Ermittlung der bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten

Darunter sind alle Zahlungen zu verstehen, welche sich aus dem Jahresenergieverbrauch aller Verbrauchsstellen einer Heizanlage ergeben. Es sind die Kosten aus dem Energie- und Hilfsenergieverbrauch sowie für sonstige Betriebsstoffverbräuche (siehe Gl. 7.9).²⁴⁴

²⁴³ VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 22.

²⁴⁴ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. S. 5.

$$A_V = \sum(k_Q * Q + k_B * B) [\text{€}/\text{Periode}]$$

[Gl. 7.9]²⁴⁵

| | |
|-------|---|
| A_V | Bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten in €/Periode |
| k_Q | Energiepreis in €/kWh |
| Q | Energieverbrauch in kWh/Periode |
| k_B | Betriebsstoffpreis in €/Einheit |
| B | Betriebsstoffverbrauch in Einheit/Periode |

In weiterer Folge ergibt sich die Annuität der bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten nach folgender Gleichung zu:

$$A_{N,V} = A_V * b_V * a [\text{€}/\text{Periode}]$$

[Gl. 3.10]²⁴⁶

| | |
|-----------|---|
| $A_{N,V}$ | Annuität der bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten in €/Periode |
| A_V | Bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten im ersten Jahr in € |
| b_V | preisdyn. Barwertfaktor für bedarfs-(verbrauchs-) gebundene Kosten |
| a | Kapitalwiedergewinnungsfaktor bzw. Annuitäten- faktor |

7.4.4 Sonstige Kosten

Diese Zahlungen berücksichtigen jene Kostenanteile, die durch die kapital-, bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten nicht aufgelistet wurden. Darunter fallen u.a. Aufwendungen für Versicherungen und Steuerausgaben sowie allgemeine Abgaben.²⁴⁷ Da diese Kostenanteile in der Planungsphase zumeist nicht bekannt sind, finden diese in der Beispielerchnung keine Berücksichtigung. Die Berechnung der Annuität der sonstigen Kosten erfolgt entsprechend des vorangegangenen Ansatzes zu:

²⁴⁵ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. S. 5.

²⁴⁶ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 18.

²⁴⁷ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. S. 6.

$$A_{N,S} = A_S * b_S * a \text{ [€/Periode]}$$

[Gl. 7.11]²⁴⁸

| | |
|-----------|---|
| $A_{N,V}$ | Annuität der bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten in €/Periode |
| A_S | Sonstige Kosten im ersten Jahr in € |
| b_S | preisdyn. Barwertfaktor für sonstige Kosten |
| a | Kapitalwiedergewinnungsfaktor bzw. Annuitätenfaktor |

7.4.5 Ermittlung der Gesamtannuität

Wie bereits bei der Annuitätenmethode unter Punkt 3.3.1 erläutert, folgt aus der Aufsummierung der Teilannuitäten der kapital-, betriebs-, bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen und sonstigen Kosten die Gesamtannuität (siehe Gl. 3.12). Der Entfall von Erlösen (Einnahmen) führt bei privaten Heizanlagen stets zu einem negativen Wert der Gesamtannuität.

Die Vorteilhaftigkeit einer Investition liegt schließlich bei derjenigen Heizanlage, die am wenigsten (negative) Kosten verursacht.²⁴⁹

$$A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,B} + A_{N,V} + A_{N,S}) \text{ [€/Periode]}$$

[Gl. 3.12]²⁵⁰

| | |
|-----------|---|
| A_N | Gesamtannuität in €/Periode |
| $A_{N,E}$ | Annuität der Erlöse in €/Periode |
| $A_{N,K}$ | Annuität der kapitalgebundenen Kosten in €/Periode |
| $A_{N,B}$ | Annuität der betriebsgebundenen Kosten in €/Periode |
| $A_{N,V}$ | Annuität der bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten in €/Periode |
| $A_{N,S}$ | Annuität der sonstigen Kosten in €/Periode |

²⁴⁸ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, S. 18.

²⁴⁹ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, S. 20.

²⁵⁰ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, S. 20.

7.5 Beschreibung des Heizanlagenvergleichs

Um die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung abschließend zu vervollständigen, wurde ein Vergleich verschiedener Heizanlagen nach der im Punkt 7.4 beschriebenen Grundlagen implementiert. Dazu wurde eine Öl-, Pellet-, Gasheizanlage sowie eine Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage mit einer Erdwärmesondenanlage verglichen und ihre Wirtschaftlichkeit anhand der Annuitätenmethode bewertet. Die Berechnungsblätter, als auch die Kostenaufstellungen sind dem Anhang, Punkt 9.1 bis 9.8 zu entnehmen.

7.5.1 Gebäudedaten

Zu Beginn wurden die Basisdaten für den Gesamtkostenvergleich zusammengetragen. Hierfür wurde zunächst ein fiktives Gebäude mit einer Brutto-Grundfläche von **225 m²** (180 m² Netto-Grundfläche) für den Anlagenvergleich gewählt, da dies ein durchschnittliches Einfamilienhaus darstellt.

Des Weiteren ist für das Objekt ein Heizwärmebedarf von **50 kWh/m²·a** (Klasse B der OIB-Richtlinie 6, Stand: 2011) für die Betriebsart Heizen angenommen worden. Dieser Wert bildet die Höchstgrenze eines „idealen“ Wärmebedarfs und entspricht in weiterer Folge auch der Grenze für die Empfehlung einer Erdwärmesondenanlage.²⁵¹ Für die Warmwasserbereitung wurde eine tägliche Energiemenge von **3 kWh/E·d** bei vier Einwohnern gewählt. Mit der Hilfe von 2 bis 4 kWh können beispielsweise 38 bis 76 Liter Wasser/(E·d) von 10 °C auf 55 °C erwärmt werden.²⁵² Somit ergab sich aus den Verbräuchen eine Energiemenge von **15.630 kWh/a**, bestehend aus dem Jahreswärmebedarf und dem Jahreswarmwasserbedarf.

Die Auflistung der Gebäudedaten können der unten angeführten Tabelle entnommen werden.

²⁵¹ Vgl. SCHLADER, W. et al.: Richtig heizen mit Erdwärme (Informationsbroschüre). S. 6.

²⁵² Vgl. ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. S. 20.

Tabelle 7.4: Gebäudedaten für den Heizanlagenvergleich²⁵³

| | | |
|--|------------------|-----------------------|
| Zu beheizende Fläche (BGF): | 225,00 | m ² |
| Netto-Heizfläche (Faktor 0,8): | 180,00 | m ² |
| Heizwärmebedarf HWB: | 50,00 | kWh/m ² *a |
| Jahreswärmeverbrauch JWB: | 11.250,00 | kWh |
| Betriebsstunden: | 1.800,00 | h |
| Heizleistung: | 6,25 | kW |
| Warmwasseraufbereitung: (0,35 kW/E * 4 E = 1,40 kW) | 1,40 | kW |
| Jahreswarmwasserbedarf: (3 kWh/E*d * 4 E * 365 d = 4380 kWh) | 4.380,00 | kWh |
| Jahresleistung: | 7,65 | kW |
| Jahres-Nutzwärmeverbrauch gesamt: | 15.630,00 | kWh |

7.5.2 Finanzierungsdaten und Energiepreise

Um den Einfluss von Zins- und Preisänderungen innerhalb eines Betrachtungszeitraums berücksichtigen zu können, wurden die einzelnen Kostenarten im Anlagenvergleich sowohl einem Kalkulationszinssatz, als auch Preisänderungsfaktoren unterworfen. Dabei sind der Zinssatz mit 4,5 % und die Preisänderungsfaktoren für betriebsgebundene sowie sonstige Kosten mit 2 % angenommen worden. Für die kapital-, verbrauchs-(bedarfs-) gebundenen Kosten als auch für die Kostenanteile aus Instandhaltung und Bedienung sowie für eventuelle Erlöse wurden 3 % veranschlagt. Der Betrachtungszeitraum für den Vergleich beträgt 30 Jahre. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Berechnung des Zinsfaktors, der preisdynamischen Barwertfaktoren sowie des Annuitätenfaktors.

Tabelle 7.5: Berechnung der Finanzierungsdaten²⁵⁴

| Betrachtungszeitraum in Jahren: T 30 | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------|----------------------------------|---------------------|-----------------|
| Zins [%] | Aufzinsungsfaktor q = 1 + i | q | 1,045 | Barwertfaktoren b _x : | Annuitätenfaktor a: | |
| 4,5 | | | | | 30 Jahre | 0,0614 |
| 3 | kapitalgebundenen Kosten | r _K | 1,03 | b _K | 23,461 | |
| 3 | bedarfs- (verbrauchs-) geb. Kosten | r _V | 1,03 | b _V | 23,461 | 20 Jahre 0,0769 |
| 2 | betriebsgebundenen Kosten | r _B | 1,02 | b _B | 20,655 | 15 Jahre 0,0931 |
| 2 | sonstige Kosten | r _S | 1,02 | b _S | 20,655 | |
| 3 | Kosten für Instandhaltung/Bedienung | r _{IN} | 1,03 | b _{IN} | 23,461 | |
| 3 | Erlöse | r _E | 1,03 | b _E | 23,461 | |

- Berechnung der Preisänderungsfaktoren:

$$r_x = 1 + \frac{j_x}{100}$$

- Berechnung der Barwertfaktoren:

$$b_x = \frac{1 - \left(\frac{r_x}{q}\right)^T}{q - r_x}$$

- Berechnung des Annuitätenfaktors:

$$a = \frac{i * (1 + i)^T}{[(1 + i)^T - 1]}$$

²⁵³ Quelle: Eigene Tabelle für den Wirtschaftlichkeitsvergleich nach der VDI 2067 Blatt 1:2012.

²⁵⁴ Vgl. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 39.

In weiterer Folge wurden die Energiepreise für die verschiedenen Heizanlagen zusammengestellt. Die Ermittlung der Daten erfolgte nach einschlägigen Energieportalen inkl. Steuern und Abgaben für den Grazer Raum.

7.5.3 Zusammenstellung der Heizanlagen und der Preisermittlung

Die Anlagenkomponenten der verschiedenen Heizsysteme wurden zunächst in die Bereiche Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung, Warmwasseraufbereitung sowie in sonstige Einbauten unterteilt. Dabei unterscheiden sich die Anlagen einerseits natürlich durch ihre Wärmequelle und der dafür notwendigen Bauteile, wie z.B. der Schneckenförderereinrichtung für eine Pelletanlage oder etwa den Erdwärmesondenrohren für eine Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage. Auf der anderen Seite wurden die Öl-, Pellet- sowie Gas-Zentralheizung mit Hochtemperatursystemen, also Radiatoren ausgestattet. Dementgegen erfolgte eine Verwendung von Niedertemperatursystemen (Fußbodenheizung) für die Wärmepumpensysteme aufgrund ihrer systembedingten Anforderungen (niedrige Vorlauftemperatur). Zusätzliche Optimierungskomponenten wie Solarkollektoren bzw. Photovoltaikanlagen wurden in die Betrachtung nicht mit einbezogen, da diese Kosten zu gleichen Teilen jedem Heizsystem zugerechnen sind und somit keinen monetären Unterschied ergeben würden. Dabei ist zu beachten, dass solche Systeme die Leistung einer Heizanlage positiv beeinflussen, wodurch die Anlageneffizienz gesteigert wird. Somit müsste die Wirtschaftlichkeit neu betrachtet werden, da beispielsweise die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpenanlage erhöht werden könnte.

Die Preisermittlung der Heizanlagenkomponenten als Ausgangsbasis für den Wirtschaftlichkeitsvergleich wurde hauptsächlich durch den BKI-Band „Objektdaten – Technische Gebäudeausrüstung G4 (Stand: 2015)“ sichergestellt.²⁵⁵ Dieser enthält die Kosten für technische Anlagen von 58 abgerechneten Bauwerken für z.B. Wärmepumpen, Sonden, Pelletanlagen, etc.. Als Ergänzung und zur Stützung der Kostenaufstellung nach dem Band G4 wurde auch der Band G3 mit weiteren 54 Gebäuden („Objektdaten – Technische Gebäudeausrüstung G3“) als Anhalt herangezogen. Ebenfalls sind vereinzelt Preise aus der Internetrecherche verwendet worden. Dabei wurden die Preisangaben unter Beachtung der Umrechnung der Mehrwertsteuer, der Indexanpassung sowie des Regionalfaktors für die Steiermark ermittelt (siehe Anhang, Punkt 9.7). Zusätzlich erfolgte eine Berücksichtigung der Investitionskosten für die Heiz- und Lagerräume mit Hilfe der BKI-Bände „Baukosten Gebäude und

²⁵⁵ RUF, H.-U. et al.: Objektdaten Technische Gebäudeausrüstung G4 (Kosten abgerechneter Bauwerke). S. 1 bis 1088 (G4).

Bauelemente – Statistische Kostenkennwerte (Stand: 2014)“.²⁵⁶ Hier erfolgte die Preisermittlung nur durch Anpassung der Mehrwertsteuer, da sich durch die Berücksichtigung der Indexanpassung sowie des Regionalfaktors lediglich marginale Preisunterschiede ergeben (siehe Anhang, Punkt 9.8).

7.5.4 Randbedingungen des Heizanlagenvergleichs

Darunter sind alle für den Wirtschaftlichkeitsvergleich notwendigen Eingangsdaten für die Berechnung der Gesamtannuität zu verstehen. Die Randbedingungen setzen sich dabei aus folgenden Parametern zusammen:

- **Gebäudedaten (siehe Tabelle 7.4):**
Diese umfassen im Wesentlichen den für den Heizanlagenvergleich ermittelten Energieverbrauch des Gebäudes für den Heizbetrieb sowie für die Warmwasseraufbereitung.
- **Finanzierungsdaten (siehe Tabelle 7.5):**
Die Daten der Finanzierung beinhalten neben dem Betrachtungszeitraum die Berechnungen des Zins- und Annuitätenfaktors sowie die Berechnung der Preisänderungs- und Barwertfaktoren.
- **Heizanlagenkomponenten** der fünf verglichenen Heizsysteme mit ihren Aufwänden für Instandhaltung, Bedienung sowie die Nutzungsdauer der einzelnen Bauteile (**siehe Berechnungsblätter im Anhang, Punkt 9.3**)
- **Kosten der Energieträger (Öl, Pellets, Gas, Strom)** sowie die gewählten Leistungskennziffern (z.B. die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpenanlagen) der einzelnen Heizsysteme (**siehe Berechnungsblätter im Anhang, Punkt 9.4**)

Dabei ist festzuhalten, dass diese Randbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Gesamtannuität eines Heizsystems ausüben.

7.5.5 Ergebnisse und Interpretation der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dieser Heizanlagen nach der Annuitätenmethode mit Berücksichtigung der Zinsentwicklung und der preisdynamischen Änderungsraten stellt eine Möglichkeit dar, um deren Vorteil-

²⁵⁶ RUF, H.-U. et al.: Baukosten Gebäude Teil1 und Bauelemente Teil2 (Statistische Kostenkennwerte). S. 296 (Teil 1) und S. 146 (Teil2).

haftigkeit gegenüber anderen Systemen abbilden zu können. **Als Grundlage hierfür gilt jedoch eine lückenlose Auflistung aller dafür notwendigen Positionen bzw. Kostenstellen**, damit ein solcher Anlagenvergleich eine seriöse Aussagekraft entwickeln kann. Da der hier durchgeführte Vergleich maßgebend mit Hilfe der BKI-Bände²⁵⁷ erstellt und für die Heizsysteme keine Angebote des fiktiven Bauvorhabens mit dementsprechender Leistungs- und Preisbasis bei ausführenden Firmen eingeholt wurden, ist diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lediglich als Hilfestellung bzw. als Einschätzung für eine Heizsystemwahl zu betrachten, zumal die zugrunde gelegten Preise einer Bandbreite unterliegen.

Allerdings konnte infolge des Kostenvergleichs bei den gegebenen Randbedingungen festgestellt werden, dass trotz des momentan sehr niedrigen Preisniveaus der Energieträger, konventionelle Heizsysteme wie die Öl- bzw. Pelletanlagen aufgrund der Summe ihrer kapital-, bedarfs-(verbrauchs-), betriebsgebundenen- und sonstigen Kosten als grundsätzlich unvorteilhafter zu bewerten sind. Gasbetriebene Heizanlagen sowie die untersuchten Wärmepumpentechniken (Sole-Wasser- bzw. das Luft-Wasser-System) weisen in etwa vergleichbare Gesamtannuitäten auf, wodurch sich keines dieser Systeme als deutlich wirtschaftlicher darstellt. Jedoch ist hier zu beachten, dass sich die Wirtschaftlichkeit eines Heizsystems, je nach verwendeten Anlagenkomponenten sowie durch die geforderte Heiz- bzw. Kühlleistung, unterschiedlich darstellen kann. Wärmepumpensysteme haben den großen Vorteil, dass sie ihre Energie entweder direkt aus dem Untergrund oder aus der Luft beziehen können. Somit sind solche Anlagen unabhängig von einer Rohstoffversorgung und der damit verbundenen Netzanbindung, wie etwa Gas- bzw. Fernwärmeanlagen.

Die Ergebnisse des Heizanlagenvergleichs können unter Darstellung der kapital-, bedarfs-(verbrauchs-) sowie betriebsgebundenen Kosten der nachfolgenden Abbildung entnommen werden. Die Vorteilhaftigkeit eines Systems hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit liegt dabei bei jener Heizanlage, die die geringsten negativen Gesamtannuitäten verursacht.

7.5.6 Die Heizsysteme im Vergleich

Das wirtschaftlichste System ist die **Erdwärmesondenanlage** mit der Sole-Wasser-Wärmepumpe, da diese mit **-4.486 €/Jahr** die geringste Gesamtannuität aufweist. Für die weitere Betrachtung stellt dieser Wert 100 % dar, um die anderen Heizanlagen in Relation zur wirtschaftlichsten Variante abbilden zu können. Die größte Differenz weist diesbezüglich die Pelletanlage auf, da ihre Gesamtannuität mit **-6.953 €/Jahr**

²⁵⁷ RUF, H.-U. et al.: Objektdaten Technische Gebäudeausrüstung G4 (Kosten abgerechneter Bauwerke). S. 1 bis 1088 (G4) sowie RUF, H.-U. et al.: Baukosten Gebäude Teil1 und Bauelemente Teil2 (Statistische Kostenkenntwerte). S. 296 (Teil 1) und S. 146 (Teil2).

(+55 %) über jener der Sondenanlage liegt. Dadurch stellt sich diese Anlagenart als deutlich unwirtschaftlichste dar. Die Gründe dafür sind in den sehr hohen kapital- und betriebsgebundenen Annuitäten zu finden. Mit 41.576 € weist die Pelletanlage ebenfalls die höchsten Investitionskosten aller betrachteten Heizsysteme auf. Der Vergleich mit dem günstigsten System, der Luft-Wasser-Wärmepumpe mit 27.319 € ergibt um 52 % höhere Investitionskosten. Dies ist vor allem durch die sehr kostenintensiven Heiz- und Lagerräume wie auch durch teure Anlagenkomponenten wie etwa den Schneckenantrieb für die Pelletförderung zu erklären. Zusätzlich weist die Pelletanlage die größten betriebsgebundenen Annuitäten auf, was wiederum auf den sehr großen Instandhaltungsaufwand (Instandsetzung, Wartung und Inspektion sowie Schwachstellenbeseitigung) zurückzuführen ist. Ebenfalls zeigt die ölbefeuerte Heizanlage mit -5.555 €/Jahr (+23,8 %) eine höhere Gesamtannuität als die Sole-Wasser-Wärmepumpenanlage. Dieser Nachteil entsteht im Wesentlichen durch die größeren betriebs- und bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Annuitäten. Als Gründe dafür sind maßgeblich der höhere Instandhaltungsaufwand sowie die höheren Heizkosten anzuführen. Besonders erwähnenswert ist hierbei die Tatsache, dass der momentane Heizölpreis mit 6,10 Cent/kWh (Dezember 2015) etwa 39 % unter dem Höchststand aus dem Jahr 2012 liegt (vgl. Abbildung 1.11) aber trotzdem zu hohen bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Annuitäten führt. Die Gasheizung sowie die Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage zeigen bezüglich ihrer Gesamtannuitäten im Vergleich zur Erdwärmesondenanlage (Sole-Wasser-Wärmepumpe), welche -4.486 €/Jahr aufweist, nur geringfügige Unterschiede. Für die gasbetriebene Anlage ergibt sich mit -4.614 €/Jahr (102,9 %) eine um 2,9 % höhere Gesamtannuität. Die Luft-Wasser-Wärmepumpe liegt mit -4.489 €/Jahr (100,1 %) lediglich um 0,1 % über der Erdwärmesondenanlage. Der Hintergrund dieser nahezu auf demselben Niveau liegenden Gesamtannuitäten lässt sich im Wesentlichen durch die niedrigeren kapitalgebundenen Annuitäten der Gasheizung (-22 %) sowie der Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage (-27 %) erklären.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht nun diese angeführten Zusammenhänge.

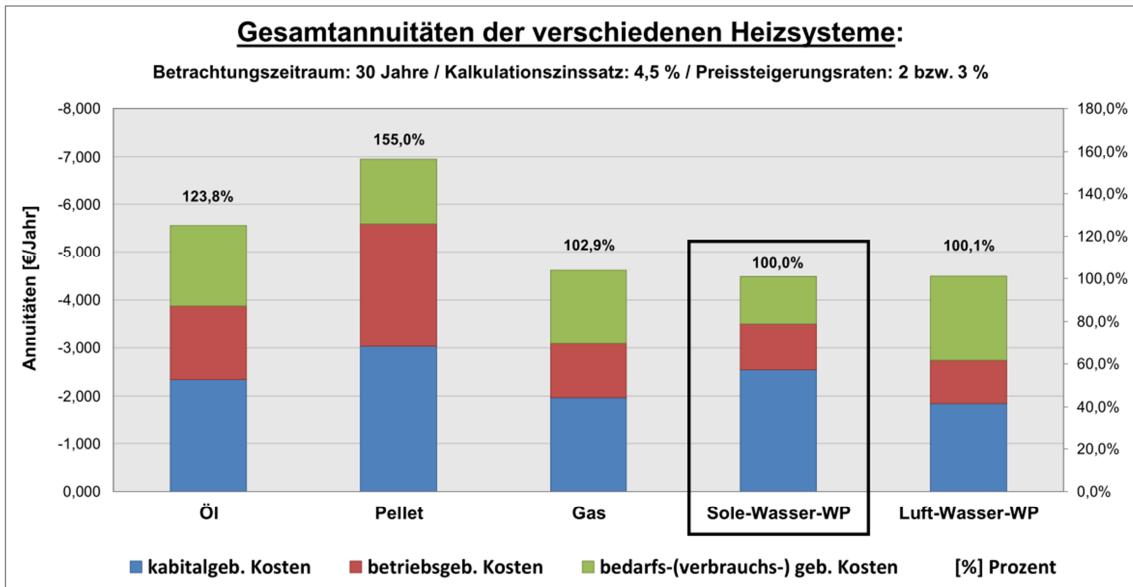


Abbildung 7.3: Ergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mittels Annuitätenmethode²⁵⁸

Wie bereits angeführt, zeigt die Abbildung 7.3 die berechneten Gesamtannuitäten der beschriebenen Öl-, Pellet- und Gasheizanlage sowie der Sole-Wasser- als auch Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage anhand ihrer Kostenarten in Form eines Säulendiagramms. Zusätzlich wurden die Heizsysteme mittels Prozentwerten mit der vorteilhaftesten Anlage (Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Tiefensonden) verglichen. Allerdings muss hier festgehalten werden, dass diese Ergebnisse mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten sind. Denn würde sich der Energiebedarf höher, als hier für die Berechnung angenommen darstellen, müsste man bei den verglichenen Heizsystemen mit zusätzlichen Leistungsanpassungen rechnen. Somit wären beispielsweise bei der Erdwärmesondenanlage weitere Sondenmeter und bei einer zusätzlichen Sonde der Einbau eines Sonden-Verteilerschachtes notwendig, wodurch sich die kapitalgebundenen Kosten weiter erhöhen würden und die Anlage im Hinblick auf die Gesamtannuität neu zu bewerten ist.

Bezüglich der bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Annuitäten weist die Erdwärmesondenanlage jedoch die größten Vorteile im Vergleich zu den anderen verglichenen Heizanlagen auf. Um dies zu verdeutlichen, wurde diese Kostenart in der Abbildung 7.4 explizit dargestellt. Vor allem unter der Berücksichtigung von steigenden Energiepreisen bieten erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen aufgrund ihrer hohen erzielbaren Jahresarbeitszahlen (vor allem Sonden- u. Brunnenanlagen) die größten Einsparungspotenziale, wenngleich ihre Errichtungskosten höher ausfallen. Die

²⁵⁸ Vgl. Berechnungsergebnisse des Wirtschaftlichkeitsvergleichs nach der VDI 2067 Blatt 1: 2012 (Zusammenfassung und Darstellung der Ergebnisse, Punkt 9.6).

Erdwärmesondenanlage (Sole-Wasser-Wärmepumpe) weist mit -977 €/Jahr die geringsten Annuitäten bezüglich ihres Verbrauchs auf. Dieser Wert stellt somit 100 % dar, um in weiterer Folge die anderen Heizsysteme in Relation setzen zu können. Die höchsten bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Annuitäten werden von der Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage mit -1.751 €/Jahr (+79,2 %) gebildet. Dies ist einerseits der Tatsache geschuldet, dass diese Wärmepumpenart das Medium Luft nützt und somit in der kalten Jahreszeit die schlechtesten Betriebsbedingungen für den Temperaturhub der Wärmepumpe herrschen. Des Weiteren ist eine vollständige Abdeckung der Warmwasserbereitung in den meisten Fällen ebenfalls nicht möglich, wodurch der Strombedarf weiter ansteigt. Auch die Öl- und Gasheizung zeigen in Bezug auf die Erdwärmesondenanlage mit -1.674 €/Jahr (+71,3 %) bzw. -1.532 €/Jahr (+56,8 %) deutlich höhere verbrauchsgebundene Annuitäten, was auf ihre fossile Energieversorgung zurückzuführen ist. Die Pelletanlage weist mit -1.367 €/Jahr nach der Sole-Wasser-Wärmepumpenanlage den zweitniedrigsten Wert auf. Allerdings liegt diese immer noch mit 39,9 % über jener Annuität der Sondenanlage. Die folgende Abbildung zeigt diese Zusammenhänge.

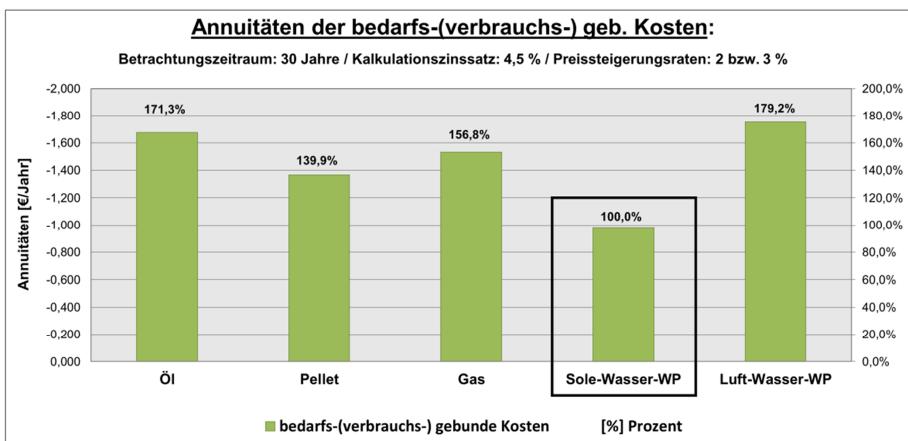


Abbildung 7.4: Darstellung der bedarfs-(verbrauchs-) geb. Kosten²⁵⁹

²⁵⁹ Vgl. Berechnungsergebnisse des Wirtschaftlichkeitsvergleichs nach der VDI 2067 Blatt 1: 2012 (Zusammenfassung und Darstellung der Ergebnisse, Punkt 9.6).

8 Zusammenfassung

Zu Beginn der Arbeit erfolgte eine Auseinandersetzung mit den Grundlagen der Oberflächennahen Geothermie. Hier wurden die wesentlichen Mechanismen und Funktionsprinzipien aufbauend erläutert. Im Weiteren wurde die Abgrenzung von der Oberflächennahen- zur Tiefengeothermie hergestellt. In Österreich wird diese Grenztiefe entgegen der Deutschen und Schweizer Auffassung bei 300 m gezogen. Anschließend folgte ein Überblick über das Potenzial der Erdwärmespeicherung nach globalen als auch nationalen Gesichtspunkten. Durch die Betrachtung der österreichischen Marktanteile konnte auf die ansteigende Nachfrage der Luft-Wasser-Wärmepumpenanlagen hingewiesen werden. Im Weiteren wurden die allgemeinen Vor- und Nachteile von oberflächennahen Systemen dargelegt, ohne vorerst speziell auf einzelne Auslegungsvarianten einzugehen, da auf diese erst im Kapitel 2 im Detail eingegangen wurde. Ein weiteres wichtiges Themengebiet stellte die Betrachtung der Energiebilanz der verschiedenen Heizsysteme dar. Hier wurden die Vorteile der Wärmepumpentechnik bezüglich ihres Primärenergieverbrauchs aber auch hinsichtlich ihrer Schadstoffemissionen verdeutlicht.

Das zweite Kapitel widmete sich den verschiedenen Systemen zur Nutzung der Oberflächennahen Geothermie, um die gesamte Bandbreite in diesem Bereich aufzuzeigen. Dabei wurden unterschiedliche Anlagenkonzepte vorgestellt und infolgedessen ihre Stärken sowie Schwächen dargestellt. Aufgrund der Schwerpunktsetzung im Bereich der Tiefensohlen wurde im Besonderen auf diese Technik eingegangen. Im Weiteren erfolgte eine Beschreibung der Wärmepumpentechnik, da diese einen wichtigen Bestandteil im Gesamtkonzept von geothermischen Anlagen darstellt. Neben der Betriebsart und der Betriebsvariante von erdglockperten Wärmepumpen ist besonders der Vorlauftemperatur des Heizsystems Beachtung zu schenken, da sie maßgeblich die Effektivität einer Wärmepumpenanlage beeinflusst.

Im Zuge des dritten Kapitels wurden die Planungsgrundlagen ausgearbeitet. Dazu erfolgte zu Beginn die Aufbereitung der rechtlichen Grundlagen und Anforderungen. Dabei wurde nicht nur auf das Wasserrechtsgebot eingegangen, sondern unter anderem auch auf die Besonderheiten in der Steiermark hingewiesen. Zusätzlich wurden die Grundlagen der Planung und Einreichung erläutert. Der Schlussteil des Kapitels widmete sich schließlich der Beurteilung eines Anlagenstandorts im Hinblick auf seine geothermische Ergiebigkeit. Dabei erfolgte sowohl eine Beschreibung des geologischen Vorprofils für kleine Anlagen bis 15 kW Leistung sowie für größere Anlagenauslegungen ab 15 kW. Abschließend wurden die Response-Verfahren (GRT bzw. EGRT) zur Feststellung der thermophysikalischen Untergrundparameter erläutert.

Die Bemessung von Erdwärmesondenanlagen wurde durch das vierte Kapitel behandelt. Zu Beginn erfolgte eine Darlegung der wichtigsten Grundlagen im Zusammenhang mit der Sondenauslegung. Dabei ist un-

ter anderem der Ermittlung des Energiebedarfs eines Gebäudes, der Einhaltung der Grenztemperaturen der mittleren Wärmeträgerflüssigkeit sowie der maximalen Entzugsleistung große Bedeutung zu schenken. Danach wurden die verschiedenen Bemessungsmethoden nach dem ÖWAV-Regelblatt 207 erläutert. Sie bilden vor allem für kleinere Anlagen die Basis für die Sondenbemessung. Abschließend wurde dieser Berechnungsablauf beschrieben und anhand des ÖWAV-Excel-Berechnungsblattes ein Variantenvergleich einer Simplex-Sonde ($\varnothing 40$ mm) zu einer Duplex-Sonde ($\varnothing 32$ mm) hergestellt, um den Längenunterschied der Varianten aufzeigen zu können.

Das fünfte Kapitel widmete sich der technischen Ausführung von Erdwärmesonden. Hier wurden wichtige und für den Errichtungsprozess notwendige Themengebiete, beginnend von der Sondenbohrung bis hin zur Inbetriebnahme der Anlage, erörtert. Des Weiteren folgte am Ende des Kapitels eine Betrachtung der Optimierungspotenziale von Erdwärmesonden. Dabei wurde sowohl auf die Auslegung und Optimierung im Neubau, als auch im Bestand eingegangen.

Durch das sechste Kapitel wurde der Herstellungsprozess einer Erdwärmesonde anhand eines durchgeführten Erdwärmeprojekts in Graz dokumentiert und beschrieben, um den Ablauf der Arbeiten zu verdeutlichen. Dazu wurde die Anlage zunächst beschrieben und des Weiteren auf örtliche geologische sowie hydrogeologische Bedingungen hingewiesen. Abschließend folgte die Beschreibung der Arbeitsabläufe für die Sondenherstellung.

Im abschließenden Kapitel 7 wurden Grundlagen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Heizsystemen erarbeitet. Dafür erfolgte zunächst eine Betrachtung der maßgebenden Berechnungsverfahren, wobei hier im Besonderen auf die Vorteile der dynamischen Investitionsrechnung eingegangen wurde. Somit wird eine Berücksichtigung von Zahlungen und der daraus entstehenden Verzinsung, die zu verschiedenen Zeitpunkten anfallen, möglich. Im Anschluss daran wurde der Berechnungsablauf für die Wirtschaftlichkeitsberechnung anhand der Annuitätenmethode nach der VDI 2067 Blatt 1:2012 – „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ dargestellt, als auch beschrieben. Dieses Vorgehen bildete die Grundlage für den Wirtschaftlichkeitsvergleich von verschiedenen Heizsystemen. Des Weiteren erfolgte eine Beschreibung der maßgebenden Parameter für den Kostenvergleich, um die Vorgehensweise zu erläutern. Abschließend wurden die Ergebnisse dargestellt, interpretiert und deren Aussagekraft bewertet.

8.1 Persönliches Schlusswort

Die Wahl eines geeigneten Heizsystems stellt bei der Realisierung von Gebäuden einen wichtigen Baustein im Gesamtkonzept dar, da ökonomische und ökologische Gesichtspunkte immer stärker in den Fokus treten. Eine Minimierung des Rohstoffverbrauchs und in weiterer Folge die Sicherstellung der Verfügbarkeit dieser Energieträger bilden bereits heute enorme Herausforderungen.

Die Nutzung von geothermischer Energie durch Erdwärmesonden weist diesbezüglich große Potenziale auf, um konventionelle Energieträger – im Besonderen fossile Wärmequellen wie Öl und Gas – zu verdrängen. Dies gilt vor allem für kleine dezentrale Heizanlagen, wie etwa Einfamilienhäuser, die aufgrund ihres Standortes keinen Zugang zu Versorgungsnetzen, wie z.B. Gas oder Fernwärme aufweisen. Durch die Wärmepumpentechnik können in Verbindung mit Tiefensonden speziell bei Neubauten sehr hohe Jahresarbeitszahlen, also eine sehr gute Anlageneffizienz erreicht werden, da der niedrige energetische Wärmebedarf der Gebäudehülle sehr gute Voraussetzungen zur Nutzung dieser Technik bietet. Kombiniert man solche Anlagen mit weiteren Optimierungs-komponenten, wie etwa einer Photovoltaikanlage, so ist ein autarker Betrieb der Heizanlage möglich. Ein weiterer entscheidender Vorteil von Erdwärmesonden besteht in der Möglichkeit, dass dieses System nicht nur kostengünstig zum Heizen, sondern auch zum Kühlen verwendet werden kann. Denn die Kühlung von Gebäuden gewinnt unter Berücksichtigung von steigenden Temperaturen, bedingt durch die Klimaerwärmung, ebenfalls immer mehr an Bedeutung.

Zwar ist eine **Erdwärmesondenanlage** nach dem durchgeföhrten Heizanlagenvergleich für ein Einfamilienhaus bezüglich ihrer Herstellungs-kosten mit 40.344 € im Vergleich zum günstigsten System, der Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage mit 27.319 € um rund 48 % teurer, jedoch kann dieser Nachteil durch Einsparungen im Bereich der geringeren Be-triebs- und Verbrauchskosten bei einer Nutzungsdauer von 30 Jahren zu einem kleinen Vorteil umgewandelt werden. Die Betrachtung der Ge-samtannuität dieser beiden Systeme weist dabei nur einen Unterschied von 0,1 % zugunsten der Sondenanlage auf (-4.486 €/Jahr zu -4.489 €/Jahr). Allerdings ist hier zu beachten, dass die Erdwärmesondenanla-ge ab einer Nutzungsdauer von 30 Jahren durch ihre geringeren be-triebs- und verbrauchsgebundenen Annuitäten, welche 35,9 % unter je-nen des Luft-Wassersystems liegen, das wirtschaftlichere Anlagenkon-zept darstellt. Berücksichtigt man zukünftige Preissteigerungen im Be-reich des Stromsektors, so entwickelt die Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Tiefensonden aufgrund ihrer systembedingten höheren Jahresarbeits-zahl gegenüber der Luft-Wasser-Wärmepumpentechnologie weitere Vor-teile. Des Weiteren bietet eine Sondenanlage zusätzlich sehr gute Vo-raussetzungen, um ein Gebäude in den Sommermonaten kostengünstig zu kühlern. Auch hier ist das Luft-Wasser-System in Bezug auf den dazu

notwendigen Stromverbrauch der Wärmepumpe mit Nachteilen behaftet, wodurch sich erneut höhere Kostenanteile ergeben.

Der weitere Vergleich der Gesamtannuitäten der Sondenanlage (-4.486 €/Jahr) mit jener der Pellet- und Ölheizung ergab mit -6.953 €/Jahr (+55 %) sowie mit -5.555 €/Jahr (+238 %) klar höhere Kosten, wodurch sich diese Anlagenkonzepte als deutlich unwirtschaftlicher darstellen. Lediglich die Gasheizung zeigte mit -4.614 €/Jahr eine um nur 2,9 % größere Gesamtannuität. Allerdings ist hier anzumerken, dass ein solches System natürlich an ein dementsprechendes Versorgungsnetz gebunden ist und somit nicht überall realisiert werden kann. Dies gilt insbesondere für kleine dezentrale Anlagen wie Einfamilienhäuser, die aufgrund ihres Standortes diese Art der Wärmebereitstellung nicht nutzen können.

Abschließend wird auf bedeutende Faktoren der Anlagenauslegung sowie Sondenoptimierung zur Steigerung der Leistungsausbeute hingewiesen. Diesbezüglich sind folgende Punkte von besonderer Bedeutung, um einen effizienten Anlagenbetrieb zu gewährleisten:

1. Sicherstellung einer bedarfsgerechten Ermittlung des Energieverbrauchs (Heizen und/oder Kühlen) sowie des Warmwasserverbrauchs. Dabei sind idealerweise etwaige Sicherheitsaufschläge auf die Energiemengen zu empfehlen.
2. Bei der Sondenbemessung ist vor allem auf korrekte Berechnungsparameter wie etwa die Entzugsleistung, die Wärmeleitfähigkeit sowie auf richtig angesetzte Korrekturfaktoren zu achten, da diese die Sondenlänge und in weiterer Folge die Leistung beeinflussen. Anlagenunterdimensionierungen führen zu Schäden an den Sonden und mindern wesentlich die Effizienz einer Erdwärmesondenanlage.
3. Eine Verwendung von thermisch verbesserten Verfüllbaustoffen wird außdrücklich empfohlen. Dadurch kann die Wärmeleitfähigkeit der Sondenhinterfüllung auf das Niveau des umgebenden Gebirges angehoben werden. Somit wird sichergestellt, dass die Sonde bezüglich ihres Wärmeaufnahme- und Abgabevermögens nicht thermisch isolierend wirkt. Im Weiteren gilt diese Maßnahme als Grundvoraussetzung für die Anwendung der Tabellenwerte zur Festlegung der Entzugsleistung einer Sonde nach der „VDI 4640 – Thermische Nutzung des Untergrunds“.
4. Die Nutzung einer effizienten Wärme- und Umwälzpumpe minimiert den Strombedarf der Anlage und verbessert ihre Effizienz. Zusätzlich ist eine Anlagenoptimierung im ersten Betriebsjahr sehr empfehlenswert, da hier Stromeinsparungen bis zu 30 % möglich sind.

5. Für die Planung und Ausführung sind ausschließlich qualifizierte Personen und Firmen mit dementsprechenden Referenzprojekten und vor allem Berechtigungen heranzuziehen.

9 Anhang

Die Inhalte des Anhangs beziehen sich ausschließlich auf den Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener Heizanlagen aus dem Kapitel 7.

Dabei wurden die Berechnungsblätter nach der unten angeführten Reihenfolge eingefügt:

- Basisdaten des Heizanlagenvergleichs (siehe Punkt 9.1)
- Finanzierungsdaten (siehe Punkt 9.2)
- Berechnungsblätter der kapital- und betriebsgebundenen Kosten (siehe Punkt 9.3)
- Berechnungsblätter der bedarfs-(verbrauchs-) gebunden Kosten (siehe Punkt 9.4)
- Berechnungsblätter zur Ermittlung der Gesamtannuität der einzelnen Heizanlagen (siehe Punkt 9.5)
- Zusammenfassung und Darstellung der Ergebnisse der Gesamtannuitäten (siehe Punkt 9.6) in der folgenden Abfolge:
 - Darstellung der Gesamtannuitäten als Excel-Tabelle
 - Säulendiagramm der Gesamtannuitäten
 - Säulendiagramm der betriebs- und bedarfs-(verbrauchs-) gebunden Annuitäten
 - Säulendiagramm der bedarfs-(verbrauchs-) gebunden Annuitäten
- Preisermittlung der Heizanlagenkomponenten (siehe Punkt 9.7)
- Preisermittlung der Heiz- und Lagerräume (siehe Punkt 9.8)

9.1 Basisdaten des Wirtschaftlichkeitsvergleichs

1. Gebäudedaten:

| | | |
|--|------------------|------------------------|
| Zu beheizende Fläche (BGF): | 225,00 | m ² |
| Netto-Heizfläche (Faktor 0,8): | 180,00 | m ² |
| Heizwärmebedarf HWB: | 50,00 | kWh/m ² * a |
| Jahreswärmeverbrauch JWB: | 11.250,00 | kWh |
| Betriebsstunden: | 1.800,00 | h |
| Heizleistung: | 6,25 | kW |
| Warmwasseraufbereitung: (0,35 kWh/E * 4 E = 1,40 kW) | 1,40 | kW |
| Jahreswarmwasserbedarf: (3 kWh/E*d * 4 E * 365 d = 4380 kWh) | 4.380,00 | kWh |
| Jahresleistung: | 7,65 | kW |
| Jahres-Nutzwärmebedarf gesamt: | 15.630,00 | kWh |

2. Finanzierungsdaten:

| | | |
|----------------------------|----------|---|
| Kalkulationszinssatz: | 4,50 | % |
| Zahlungsänderungsindex j:z | 2 bzw. 3 | % |

3. Energiepreise:

| | | |
|-------------------------|-------|-----------|
| Heizöl: | 0,61 | €/Liter |
| Annahme für Berechnung: | 10,00 | kWh/Liter |
| entspricht weiters: | 6,10 | ct/kWh |
| 2x Abfüllpauschale: | 80,00 | € |

Quellenangabe vom 04.12.2015:

<http://www.fastenergy.at/heizoelpreise.htm>

| | | |
|----------------------|--------|--------|
| Erdgas: | 3,18 | ct/kWh |
| Grundgebühr: | 24,00 | € |
| Netzgebühren: | 396,78 | € |
| Steuern und Abgaben: | 109,94 | € |

Quellenangabe vom 04.12.2015:

<https://durchblicker.at/gas/vergleich/ergebnis/aktionen#txid=38f3bab66240ee00f26741f1c48bb3e5879d90d2>

| | | |
|---------------------|-------|--------|
| Pellets: | 4,70 | ct/kWh |
| 2x Abfüllpauschale: | 80,00 | € |

Quellenangabe vom 04.12.2015:

<http://www.propellets.at/de/pelletpreise/>

| | | |
|---|--------|--------|
| Wärmepumpenstrom Erdsonden (60 % Tag, 40 % Nacht): | 5,40 | ct/kWh |
| Grundgebühr: | 30,00 | € |
| Netzgebühren: | 242,43 | € |
| Steuern und Abgaben: | 194,99 | € |

Quellenangabe vom 04.12.2015:

<https://durchblicker.at/strom/vergleich/ergebnis/aktionen#txid=54917c28510a969b255e9310764c86a81670d765>

| | | |
|---|--------|--------|
| Luft-Wasser-Wärmepumpenstrom (60 % Tag, 40 % Nacht): | 5,40 | ct/kWh |
| Grundgebühr: | 30,00 | € |
| Netzgebühren: | 284,50 | € |
| Steuern und Abgaben: | 230,56 | € |

Quellenangabe vom 04.12.2015:

<https://durchblicker.at/strom/vergleich/ergebnis/aktionen#txid=71b48cc40587216c0db368833621529819d49ff7>

| | | |
|---|-------|--------|
| Strompreis für Privatkunden - Heizung: | | |
| Verbrauchspreis HT | 17,22 | ct/kWh |
| Verbrauchspreis NT | 12,44 | ct/kWh |
| Mischpreis (60% Tag, 40% Nacht): | 15,31 | ct/kWh |

9.2 Berechnung der Finanzierungsdaten

| Betrachtungszeitraum in Jahren: | | T | 30 | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|-------------------------|----------|---------------------|--|
| Zins [%] | Aufzinsungsfaktor $q = 1 + i$ | q | 1,045 | Barwertfaktoren b_x : | | Annuitätenfaktor a: | |
| 3 kapitalgebundenen Kosten | r_K | 1,03 | b _K | 23,461 | 30 Jahre | 0,0614 | |
| 3 bedarfs- (verbrauchs-) geb. Kosten | r_V | 1,03 | b _V | 23,461 | 20 Jahre | 0,0769 | |
| 2 betriebsgebundenen Kosten | r_B | 1,02 | b _B | 20,655 | 15 Jahre | 0,0931 | |
| 2 sonstige Kosten | r_S | 1,02 | b _S | 20,655 | | | |
| 3 Kosten für Instandhaltung/Bedienung | r_{IN} | 1,03 | b _{IN} | 23,461 | | | |
| 3 Erlöse | r_E | 1,03 | b _E | 23,461 | | | |

• Berechnung der Preisänderungsfaktoren:

$$r_x = 1 + \frac{j_x}{100}$$

• Berechnung der Barwertfaktoren:

$$b_x = \frac{1 - \left(\frac{r_x}{q}\right)^T}{q - rx}$$

• Berechnung des Anuitätenfaktors:

$$a = \frac{i * (1 + i)^T}{[(1 + i)^T - 1]}$$

9.3 Ermittlung der kapital- und betriebsgebundenen Kosten nach der VDI 2067 Blatt 1: 2012

* Der Stundensatz für die Bedienung wird mit 30 Euro/h angenommen

| 2a. Pellet-Zentralheizung: | | | | | | |
|----------------------------|----------------|---|--------------------|--|----------------------|---------------------------------------|
| Nr.: | ND: | Faktor Instandhaltung: | Ersatz-häufigkeit: | Bezeichnung des Bauteils: | Investitions-kosten: | betriebsgeb. Kosten - Instandhaltung: |
| | T _N | f _k = (f _{inst} + f _{w+insp})...[%] | n | | A ₀ | A _{IN} |
| 1 | 15 | 6,0 | 1 | Pellet-Heizkessel inkl. Zubehör | 8000,06 | 480,00 |
| 2 | 20 | 4,0 | 1 | Schneckenentnahme (Lagerraum -> Heizkessel) | 2500,00 | 100,00 |
| 3 | 20 | 2,0 | 0 | Pufferspeicher (800 Liter) | 1178,58 | 23,57 |
| 4 | 50 | 2,0 | 0 | Pellet-Heizraum (6,7 m ² NGF) | 6079,00 | 121,58 |
| 5 | 50 | 2,0 | 0 | Pellet-Lagerraum (6,0 m ² NGF) | 5788,00 | 115,76 |
| 6 | 10 | 3,0 | 2 | Umwälzpumpe | 296,00 | 8,88 |
| 7 | 15 | 2,0 | 1 | Ausdehnungsgefäß | 230,00 | 4,60 |
| 8 | 40 | 1,0 | 0 | Rohrleitungen inkl. Dämmung (120 m) | 3439,00 | 34,39 |
| 9 | 50 | 1,0 | 0 | Radiatoren (12 Stk.) | 5732,00 | 57,32 |
| 10 | 15 | 1,5 | 1 | Ventile Radiatoren | 246,00 | 3,69 |
| 11 | 20 | 2,0 | 0 | Warmwasserspeicher (200 Liter) | 1384,65 | 27,69 |
| 12 | 10 | 3,0 | 2 | Zirkulationspumpe | 287,00 | 8,61 |
| 13 | 30 | 2,0 | 0 | Leitungen Zirkulation (100 m) | 1843,00 | 36,86 |
| 14 | 20 | 1,0 | 1 | Dämmung Leitungen (90 m) | 1023,00 | 10,23 |
| 15 | 15 | 2,0 | 1 | Armaturen | 100,00 | 2,00 |
| 16 | 0 | 0,0 | 0 | Planung | 800,00 | 0,00 |
| 17 | 50 | 3,0 | 0 | Schornstein, Edelstahl | 2500,00 | 75,00 |
| 18 | 12 | 2,5 | 2 | Fernbedienung und Raumtemperaturaufschaltung | 150,00 | 3,75 |
| 19 | 0 | 0,0 | 0 | | | |
| | | | | | 11872,51 | 410,56 |
| | | | | | | 750,- |

* Der Stundensatz für die Bedienung wird mit 30 Euro/h angenommen

* Der Stundensatz für die Bedienung wird mit 30 Euro/h angenommen

* Der Stundensatz für die Bedienung wird mit 30 Euro/h angenommen.

* Der Stundensatz für die Bedienung wird mit 30 Euro/h angenommen.

9.4 Ermittlung der bedarfs-(verbrauchs-) gebundenen Kosten

1b. Ölzentralheizung:

| | | |
|---|----------------|--------|
| • Ölpreis | 6,10 | ct/kWh |
| • Abfüllpauschale (2x) | 80,00 | €/a |
| • Jahres-Nutzwärmebedarf (Heizen u. Warmwasser) | 15630,00 | kWh |
| • Jahresnutzungsgrad | 0,90 | - |
| • Jahresarbeitskosten (Heizen u. Warmwasser) | 1059,37 | €/a |
| • Hilfsenergiekosten für 150 kWh/a | 22,96 | €/a |
| | 1162,33 | €/a |

2b. Pellets-Zentralheizung:

| | | |
|---|---------------|--------|
| • Pelletpreis | 4,70 | ct/kWh |
| • Abfüllpauschale (2x) | 80,00 | €/a |
| • Jahres-Nutzwärmebedarf (Heizen u. Warmwasser) | 15630,00 | kWh |
| • Jahresnutzungsgrad | 0,80 | - |
| • Jahresarbeitskosten (Heizen u. Warmwasser) | 918,26 | €/a |
| • Hilfsenergiekosten für 200 kWh/a | 30,62 | €/a |
| | 948,88 | €/a |

3b. Erdgas-Zentralheizung:

| | | |
|---|----------------|--------|
| • Gaspreis | 3,18 | ct/kWh |
| • Grundgebühr | 24,00 | €/a |
| • Netzgebühren | 396,78 | €/a |
| • Steuern und Abgaben | 109,94 | €/a |
| • Jahres-Nutzwärmebedarf (Heizen u. Warmwasser) | 15630,00 | kWh |
| • Jahresnutzungsgrad | 0,96 | - |
| • Jahresarbeitskosten (Heizen u. Warmwasser) | 517,74 | €/a |
| • Hilfsenergiekosten für 100 kWh/a | 15,31 | €/a |
| | 1063,77 | €/a |

4b. Erdwärmesonden-Anlage:

| | | |
|--|---------------|--------|
| • Wärmepumpenstrom | 5,40 | ct/kWh |
| • Grundgebühr | 30,00 | €/a |
| • Netzgebühren | 242,43 | €/a |
| • Steuern und Abgaben | 194,99 | €/a |
| • Jahres-Nutzwärmebedarf (Heizen u. Warmwasser); JAZ = 4 | 3907,50 | kWh |
| • Jahresnutzungsgrad | 1,00 | - |
| • Jahresarbeitskosten der Wärmepumpe | 211,01 | €/a |
| | 678,43 | €/a |

5b. Luft-Wasser-Wärmepumpen-Anlage:

| | | |
|---|----------------|--------|
| • Wärmepumpenstrom | 5,40 | ct/kWh |
| • Sonstiger Strom (60 % Tag, 40 % Nacht) | 5,90 | ct/kWh |
| • Grundgebühr | 30,00 | €/a |
| • Netzgebühren | 394,94 | €/a |
| • Steuern und Abgaben | 327,57 | €/a |
| • Jahres-Nutzwärmebedarf (Annahme: Abdeckung Heizlast zu 100 % mit WP (davon 25 % Heizstabunterstützung), Warmwasser zu 75 % mit WP); JAZ = 3,4 | 7385,29 | kWh |
| • Rest-Warmwasserbedarf (25 %) | 1095,00 | kWh |
| • Jahresnutzungsgrad | 1,00 | - |
| • Jahresarbeitskosten der Wärmepumpe | 398,81 | €/a |
| • Jahresarbeitskosten der Warmwasserbereitung | 64,65 | €/a |
| | 1215,96 | €/a |

9.5 Ermittlung der Gesamtannuität nach der VDI 2067 Blatt 1: 2012

Ermittlung der Gesamtanuität A_N - Heizöl:

nach VDI 2067 Blatt 1:2012

1c. Öl-Zentralheizung:

| Komponenten-Nr.: | Barwert der Ersatzinvestitionen: | | | Barwert des Restwerts: | Summe der Barwerte: | Summe der Barwerte * a; (Annuität) der kapitalgeb. Kosten: | Barwert Instandhaltungskosten: | Annuität der Instandhaltungskosten: |
|------------------|----------------------------------|----------------|----------------|------------------------|--|---|---|--|
| # | A ₁ | A ₂ | A ₃ | R _W | A ₀ +A ₁ +...+A ₄ -R _W | A _{NK} = (A ₀ +A ₁ +...+A ₄ -R _W) * a | f _K *A ₀ *b _{IN} | A _{IN} = f _K *A ₀ *b _{IN} *a |
| 1 | 1.497,78 | 0,00 | 0,00 | 482,23 | 3.015,55 | 185,13 | 1.642,30 | 100,82 |
| 2 | 1.681,44 | 1.413,62 | 0,00 | 542,76 | 4.552,30 | 279,47 | 5.630,73 | 345,68 |
| 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | 1.045,00 | 0,00 | 0,00 | 670,85 | 1.874,15 | 115,06 | 527,88 | 32,41 |
| 5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.042,37 | 8.717,63 | 535,19 | 4.579,66 | 281,15 |
| 6 | 256,15 | 221,67 | 0,00 | 0,00 | 773,83 | 47,51 | 208,34 | 12,79 |
| 7 | 185,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 415,16 | 25,49 | 107,92 | 6,63 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 229,55 | 3.209,45 | 197,03 | 806,84 | 49,53 |
| 9 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5.732,00 | 351,90 | 1.344,81 | 82,56 |
| 10 | 198,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 444,04 | 27,26 | 86,57 | 5,31 |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -184,85 | 1.569,50 | 96,35 | 649,71 | 39,89 |
| 12 | 248,37 | 214,93 | 0,00 | 0,00 | 750,30 | 46,06 | 202,00 | 12,40 |
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.843,00 | 113,14 | 864,79 | 53,09 |
| 14 | 766,12 | 0,00 | 0,00 | 246,66 | 1.542,45 | 94,69 | 240,01 | 14,73 |
| 15 | 80,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 180,50 | 11,08 | 46,92 | 2,88 |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 800,00 | 49,11 | 0,00 | 0,00 |
| 17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 283,13 | 2.367,87 | 145,37 | 1.865,88 | 114,55 |
| 18 | 126,11 | 106,02 | 0,00 | 40,71 | 341,42 | 20,96 | 87,98 | 5,40 |
| 19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 6.084,66 | 1.956,24 | 0,00 | 3.353,40 | 38.129,15 | 2.340,81 | 18.892,35 | 1.159,83 |

Gesamtanuität A_N - Öl-Zentralheizung:

| | | | | |
|----|---|---|-----------|------|
| 1. | Kapitalgebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der kapitalgebundenen Kosten: | A _{NK} = (A ₀ +A ₁ +...+A ₄ -R _W) * a | 2.340,81 | |
| 2. | Bedarfs-(verbrauchs-) gebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten: | A _{N,V} = A _V * b _V * a | 1.674,14 | |
| 3. | Betriebsgebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der betriebsgebundenen Kosten: | A _{N,B} = (A _B * b _B + A _{IN} * b _{IN}) * a | 1.540,24 | |
| 4. | Sonstigen Kosten: | | | |
| + | • Annuität der sonstigen Kosten: | A _{N,S} = A _S * b _S * a | 0,00 | |
| 5. | Erlöse: | | | |
| | • Anuität der Erlöse: | A _{N,E} = A _E * b _E * a | 0,00 | |
| = | Gesamtanuität | A _N = A _{N,E} - (A _{N,K} + A _{N,V} + A _{N,B} + A _{N,S} + A _{N,E}) | -5.555,18 | Euro |

Ermittlung der Gesamtanuität A_N - Pellet-Zentralheizung:

nach VDI 2067 Blatt 1:2012

2c. Pellet-Zentralheizung:

| Komponenten-Nr.: | Barwert der Ersatzinvestitionen: | | | Barwert des Restwerts: | Summe der Barwerte: | Summe der Barwerte * a; (Annuität) der kapitalgeb. Kosten: | Barwert Instandhaltungskosten: | Annuität der Instandhaltungskosten: |
|------------------|----------------------------------|----------------|----------------|------------------------|--|---|---|--|
| # | A ₁ | A ₂ | A ₃ | R _W | A ₀ +A ₁ +...+A ₄ -R _W | A _{NK} = (A ₀ +A ₁ +...+A ₄ -R _W)*a | f _K *A ₀ *b _{IN} | A _{IN} = f _K *A ₀ *b _{IN} *a |
| 1 | 6.440,32 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 14.440,39 | 886,52 | 11.261,56 | 691,36 |
| 2 | 1.872,23 | 0,00 | 0,00 | 602,79 | 3.769,44 | 231,41 | 2.346,14 | 144,03 |
| 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -157,34 | 1.335,92 | 82,01 | 553,02 | 33,95 |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 649,24 | 5.429,76 | 333,34 | 2.852,44 | 175,12 |
| 5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 618,16 | 5.169,84 | 317,38 | 2.715,89 | 166,73 |
| 6 | 256,15 | 221,67 | 0,00 | 0,00 | 773,83 | 47,51 | 208,34 | 12,79 |
| 7 | 185,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 415,16 | 25,49 | 107,92 | 6,63 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 229,55 | 3.209,45 | 197,03 | 806,84 | 49,53 |
| 9 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 612,18 | 5.119,82 | 314,31 | 1.344,81 | 82,56 |
| 10 | 198,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 444,04 | 27,26 | 86,57 | 5,31 |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -184,85 | 1.569,50 | 96,35 | 649,71 | 39,89 |
| 12 | 248,37 | 214,93 | 0,00 | 0,00 | 750,30 | 46,06 | 202,00 | 12,40 |
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.843,00 | 113,14 | 864,79 | 53,09 |
| 14 | 766,12 | 0,00 | 0,00 | 246,66 | 1.542,45 | 94,69 | 240,01 | 14,73 |
| 15 | 80,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 180,50 | 11,08 | 46,92 | 2,88 |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 800,00 | 49,11 | 0,00 | 0,00 |
| 17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 267,00 | 2.233,00 | 137,09 | 1.759,60 | 108,02 |
| 18 | 126,11 | 106,02 | 0,00 | 40,71 | 341,42 | 20,96 | 87,98 | 5,40 |
| 19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 10.172,99 | 542,62 | 0,00 | 2.924,09 | 49.367,82 | 3.030,77 | 26.134,55 | 1.604,44 |

Gesamtanuität A_N - Pellet-Zentralheizung:

| | | | | |
|----|--|---|-----------|----------|
| 1. | Kapitalgebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der kapitalgebundenen Kosten: | A _{N,K} = (A ₀ + A ₁ + ... + A ₄ - R _W) * a | | 3.030,77 |
| 2. | Bedarfs-(verbrauchs-) gebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten: | A _{N,V} = A _V * b _V * a | | 1.366,70 |
| 3. | Betriebsgebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der betriebsgebundenen Kosten: | A _{N,B} = (A _B * b _B + A _{IN} * b _{IN}) * a | | 2.555,46 |
| 4. | Sonstigen Kosten: | | | |
| + | • Annuität der sonstigen Kosten: | A _{N,S} = A _S * b _S * a | | 0,00 |
| 5. | Erlöse: | | | |
| | • Anuität der Erlöse: | A _{N,E} = A _E * b _E * a | | 0,00 |
| = | Gesamtanuität | A _N = A _{N,E} - (A _{N,K} + A _{N,V} + A _{N,B} + A _{N,S} + A _{N,E}) | -6.952,92 | Euro |

Ermittlung der Gesamtanuität A_N - Erdgas-Zentralheizung:

nach VDI 2067 Blatt 1:2012

3c. Erdgas-Zentralheizung:

| Komponenten-Nr.: | Barwert der Ersatzinvestitionen: | | | Barwert des Restwerts: | Summe der Barwerte: | Summe der Barwerte * a; (Annuität) der kapitalgeb. Kosten: | Barwert Instandhaltungskosten: | Annuität der Instandhaltungskosten: |
|------------------|----------------------------------|----------------|----------------|------------------------|--|---|---|--|
| # | A ₁ | A ₂ | A ₃ | R _W | A ₀ +A ₁ +...+A ₄ -R _W | A _{NK} = (A ₀ +A ₁ +...+A ₄ -R _W)*a | f _K *A ₀ *b _{IN} | A _{IN} = f _K *A ₀ *b _{IN} *a |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -740,66 | 4.901,66 | 300,92 | 2.928,69 | 179,80 |
| 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2.500,00 | 153,48 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -157,34 | 1.335,92 | 82,01 | 553,02 | 33,95 |
| 5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 446,73 | 3.736,14 | 229,37 | 1.962,72 | 120,49 |
| 6 | 256,15 | 221,67 | 0,00 | 0,00 | 773,83 | 47,51 | 208,34 | 12,79 |
| 7 | 185,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 415,16 | 25,49 | 107,92 | 6,63 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 229,55 | 3.209,45 | 197,03 | 806,84 | 49,53 |
| 9 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5.732,00 | 351,90 | 1.344,81 | 82,56 |
| 10 | 198,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 444,04 | 27,26 | 86,57 | 5,31 |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -184,85 | 1.569,50 | 96,35 | 649,71 | 39,89 |
| 12 | 248,37 | 214,93 | 0,00 | 0,00 | 750,30 | 46,06 | 202,00 | 12,40 |
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.843,00 | 113,14 | 864,79 | 53,09 |
| 14 | 766,12 | 0,00 | 0,00 | 246,66 | 1.542,45 | 94,69 | 240,01 | 14,73 |
| 15 | 80,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 180,50 | 11,08 | 46,92 | 2,88 |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 650,00 | 39,90 | 0,00 | 0,00 |
| 17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 267,00 | 2.233,00 | 137,09 | 1.759,60 | 108,02 |
| 18 | 126,11 | 106,02 | 0,00 | 40,71 | 341,42 | 20,96 | 87,98 | 5,40 |
| 19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | | | | | | | | |
| | 1.860,44 | 542,62 | 0,00 | 147,80 | 32.158,36 | 1.974,25 | 11.849,92 | 727,49 |

Gesamtanuität A_N - Erdgas-Zentralheizung:

| | | | | |
|----|---|---|-----------|----------|
| 1. | Kapitalgebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der kapitalgebundenen Kosten: | A _{NK} = (A ₀ +A ₁ +...+A ₄ -R _W) * a | | 1.974,25 |
| 2. | Bedarfs-(verbrauchs-) gebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten: | A _{N,V} = A _V * b _V * a | | 1.532,18 |
| 3. | Betriebsgebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der betriebsgebundenen Kosten: | A _{N,B} = (A _B * b _B + A _{IN} * b _{IN}) * a | | 1.107,89 |
| 4. | Sonstigen Kosten: | | | |
| + | • Annuität der sonstigen Kosten: | A _{N,S} = A _S * b _S * a | | 0,00 |
| 5. | Erlöse: | | | |
| | • Anuität der Erlöse: | A _{N,E} = A _E * b _E * a | | 0,00 |
| = | Gesamtanuität | A _N = A _{N,E} - (A _{N,K} + A _{N,V} + A _{N,B} + A _{N,S} + A _{N,E}) | -4.614,33 | Euro |

Ermittlung der Gesamtanuität A_N - Erdwärmesonden-Anlage:

nach VDI 2067 Blatt 1:2012

4c. Sole-Wasser-Wärmepumpenanlage (Erdwärmesonden):

| Komponenten-Nr.: | Barwert der Ersatzinvestitionen: | | | Barwert des Restwerts: | Summe der Barwerte: | Summe der Barwerte * a; (Annuität) der kapitalgeb. Kosten: | Barwert Instandhaltungskosten: | Annuität der Instandhaltungskosten: |
|------------------|----------------------------------|----------------|----------------|------------------------|--|---|---|--|
| # | A ₁ | A ₂ | A ₃ | R _W | A ₀ +A ₁ +...+A ₄ -R _W | A _{NK} = (A ₀ +A ₁ +...+A ₄ -R _W)*a | f _K *A ₀ *b _{IN} | A _{IN} = f _K *A ₀ *b _{IN} *a |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -994,58 | 8.444,58 | 518,43 | 4.369,68 | 268,26 |
| 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.149,60 | 9.614,40 | 590,24 | 1.262,69 | 77,52 |
| 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.915,20 | 117,58 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -190,72 | 1.619,30 | 99,41 | 670,33 | 41,15 |
| 5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 446,73 | 3.736,14 | 229,37 | 1.962,72 | 120,49 |
| 6 | 256,15 | 221,67 | 0,00 | 0,00 | 773,83 | 47,51 | 208,34 | 12,79 |
| 7 | 185,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 415,16 | 25,49 | 107,92 | 6,63 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 9 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 785,62 | 6.570,38 | 403,37 | 1.725,82 | 105,95 |
| 10 | 198,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 444,04 | 27,26 | 86,57 | 5,31 |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -211,55 | 1.796,20 | 110,27 | 743,56 | 45,65 |
| 12 | 248,37 | 214,93 | 0,00 | 0,00 | 750,30 | 46,06 | 202,00 | 12,40 |
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.843,00 | 113,14 | 864,79 | 53,09 |
| 14 | 766,12 | 0,00 | 0,00 | 246,66 | 1.542,45 | 94,69 | 240,01 | 14,73 |
| 15 | 80,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 180,50 | 11,08 | 46,92 | 2,88 |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.488,00 | 91,35 | 0,00 | 0,00 |
| 17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 18 | 126,11 | 106,02 | 0,00 | 40,71 | 341,42 | 20,96 | 87,98 | 5,40 |
| 19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 1.860,44 | 542,62 | 0,00 | 1.272,47 | 41.474,89 | 2.546,21 | 12.579,34 | 772,27 |

Gesamtanuität A_N - Erdwärmesonden-Anlage:

| | | | | |
|----|--|---|--|-----------|
| 1. | Kapitalgebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der kapitalgebundenen Kosten: | $A_{N,K} = (A_0 + A_1 + \dots + A_4 - R_W) * a$ | | 2.546,21 |
| 2. | Bedarfs-(verbrauchs-) gebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten: | $A_{N,V} = A_V * b_V * a$ | | 977,16 |
| 3. | Betriebsgebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der betriebsgebundenen Kosten: | $A_{N,B} = (A_B * b_B + A_{IN} * b_{IN}) * a$ | | 962,47 |
| 4. | Sonstigen Kosten: | | | |
| + | • Annuität der sonstigen Kosten: | $A_{N,S} = A_S * b_S * a$ | | 0,00 |
| 5. | Erlöse: | | | |
| | • Anuität der Erlöse: | $A_{N,E} = A_E * b_E * a$ | | 0,00 |
| = | Gesamtanuität | $A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S} + A_{N,E})$ | | -4.485,83 |
| | | | | Euro |

Ermittlung der Gesamtanuität A_N - Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage:

nach VDI 2067 Blatt 1:2012

5c. Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage:

| Kompo- nen- ten- Nr.: | Barwert der Ersatzinvestitionen: | | | Barwert des Restwerts: | Summe der Barwerte: | Summe der Barwerte * a; (Annuität) der kapitalgeb. Kosten: | Barwert Instandhaltungs- kosten: | Annuität der Instandhaltungs- kosten: |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------|-------------|---------------------------|---------------------------------|--|--|---|
| # | A_1 | A_2 | A_3 | R_w | $A_0 + A_1 + \dots + A_4 - R_w$ | $A_{NK} = (A_0 + A_1 + \dots + A_4 - R_w) * a$ | $f_K * A_0 * b_{IN}$ | $A_{IN} = f_K * A_0 * b_{IN} * a$ |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -1.306,34 | 8.645,34 | 530,75 | 4.304,58 | 264,26 |
| 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -190,72 | 1.619,30 | 99,41 | 670,33 | 41,15 |
| 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -213,60 | 1.813,60 | 111,34 | 375,38 | 23,05 |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 372,27 | 3.113,45 | 191,14 | 1.635,60 | 100,41 |
| 6 | 256,15 | 221,67 | 0,00 | 0,00 | 773,83 | 47,51 | 208,34 | 12,79 |
| 7 | 185,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 415,16 | 25,49 | 107,92 | 6,63 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 9 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 785,62 | 6.570,38 | 403,37 | 1.725,82 | 105,95 |
| 10 | 198,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 444,04 | 27,26 | 86,57 | 5,31 |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -211,55 | 1.796,20 | 110,27 | 743,56 | 45,65 |
| 12 | 248,37 | 214,93 | 0,00 | 0,00 | 750,30 | 46,06 | 202,00 | 12,40 |
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.843,00 | 113,14 | 864,79 | 53,09 |
| 14 | 766,12 | 0,00 | 0,00 | 246,66 | 1.542,45 | 94,69 | 240,01 | 14,73 |
| 15 | 80,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 180,50 | 11,08 | 46,92 | 2,88 |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 350,00 | 21,49 | 0,00 | 0,00 |
| 17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 18 | 126,11 | 106,02 | 0,00 | 40,71 | 341,42 | 20,96 | 87,98 | 5,40 |
| 19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 1.860,44 | 542,62 | 0,00 | -476,94 | 30.198,96 | 1.853,96 | 11.299,80 | 693,71 |

Gesamtanuität A_N - Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage:

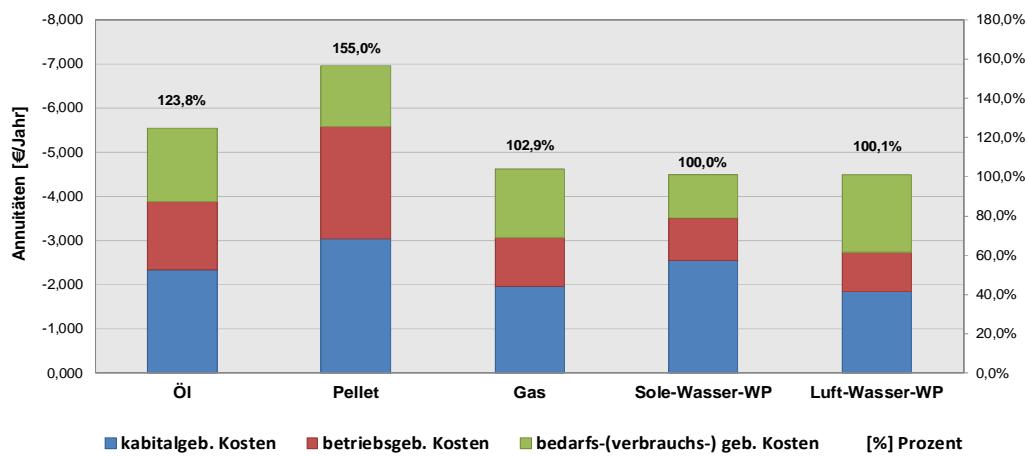
| | | | | |
|----|--|---|--|-----------------------|
| 1. | Kapitalgebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der kapitalgebundenen Kosten: | $A_{NK} = (A_0 + A_1 + \dots + A_4 - R_w) * a$ | | 1.853,96 |
| 2. | Bedarfs-(verbrauchs-) gebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten: | $A_{NV} = A_V * b_V * a$ | | 1.751,39 |
| 3. | Betriebsgebundene Kosten: | | | |
| + | • Annuität der betriebsgebundenen Kosten: | $A_{NB} = (A_B * b_B + A_{IN} * b_{IN}) * a$ | | 883,92 |
| 4. | Sonstigen Kosten: | | | |
| + | • Annuität der sonstigen Kosten: | $A_{NS} = A_S * b_S * a$ | | 0,00 |
| 5. | Erlöse: | | | |
| + | • Anuität der Erlöse: | $A_{NE} = A_E * b_E * a$ | | 0,00 |
| = | Gesamtanuität | $A_N = A_{NE} - (A_{NK} + A_{NV} + A_{NB} + A_{NS} + A_{NE})$ | | -4.489,27 Euro |

9.6 Zusammenfassung und Darstellung der Ergebnisse des Wirtschaftlichkeitsvergleichs

| Kostenart: | Öl | Pellet | Gas | Sole-Wasser-WP | Luft-Wasser-WP |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Kapitalgebundene Kosten: | -2.340,81 | -3.030,77 | -1.974,25 | -2.546,21 | -1.853,96 |
| Betriebsgebundene Kosten: | -1.540,24 | -2.555,46 | -1.107,89 | -962,47 | -883,92 |
| Bedarfs-(verbrauchs-) gebundene Kosten: | -1.674,14 | -1.366,70 | -1.532,18 | -977,16 | -1.751,39 |
| Gesamtanuität: | -5.555,18 | -6.952,92 | -4.614,33 | -4.485,83 | -4.489,27 |
| Prozent: | 123,8% | 155,0% | 102,9% | 100,0% | 100,1% |

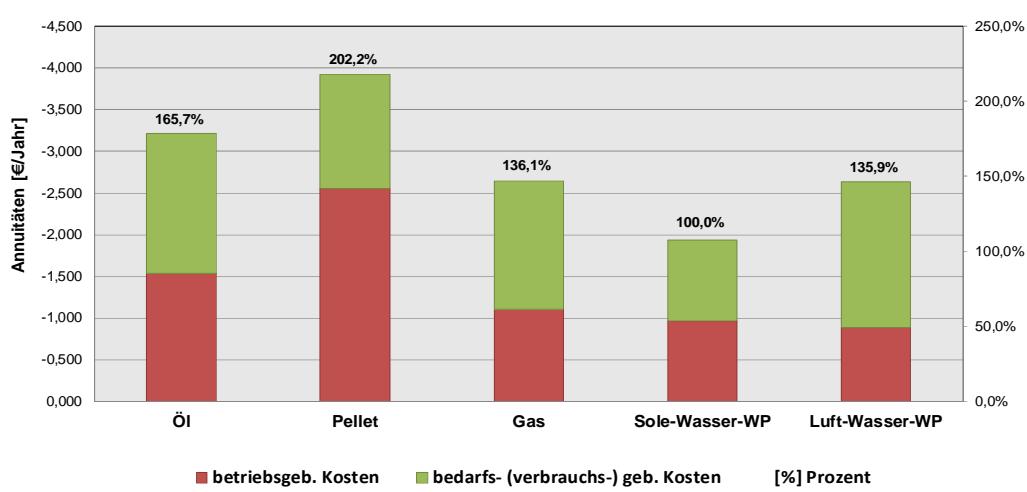
Gesamtannuitäten der verschiedenen Heizsysteme:

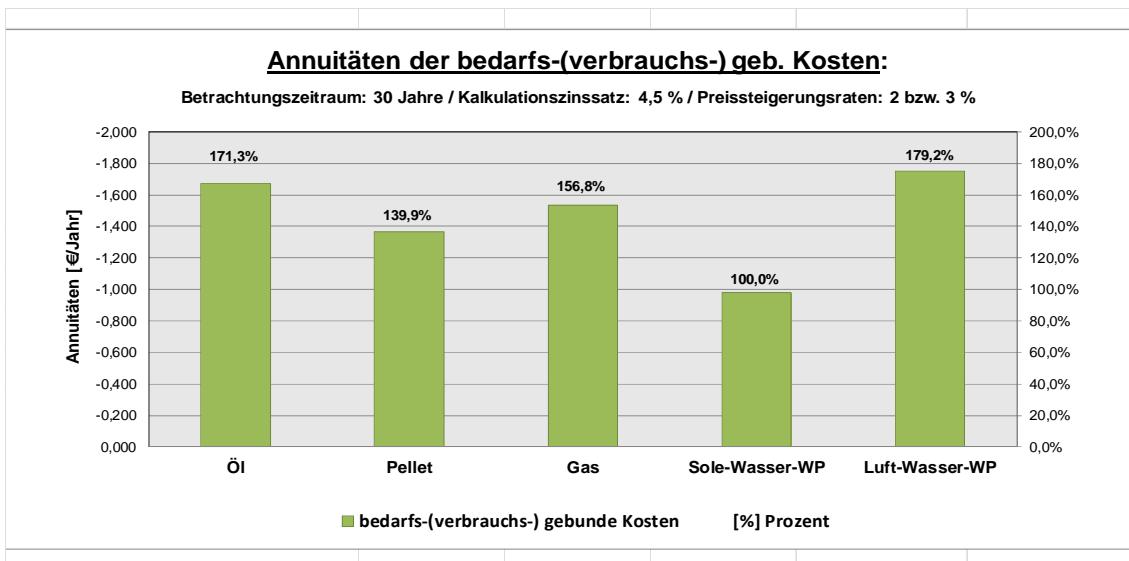
Betrachtungszeitraum: 30 Jahre / Kalkulationszinssatz: 4,5 % / Preissteigerungsraten: 2 bzw. 3 %



Annuitäten der betriebs- und bedarfs-(verbrauchs-) geb. Kosten:

Betrachtungszeitraum: 30 Jahre / Kalkulationszinssatz: 4,5 % / Preissteigerungsraten: 2 bzw. 3 %





9.7 Preisermittlung der Heizanlagenkomponenten

| | |
|-------------------|--|
| • Datengrundlage: | Baukosteninformationszentrum BKI - Technische Gebäudeausstattung G4 (2015) |
| • Kostenstand: | 4. Quartal 2014 |
| • Gebäudeart: | Ein- und Zweifamilienhäuser, unterkellert, mittlerer Standard |
| • Kostenart: | Kosten nach der 4. Ebene (DIN 276), Teil C des BKI Positionssätze für Neubauten, Teil F des BKI |
| • Regionalfaktor: | 0,937 |

Kosten der 4. Ebene nach Teil C des BKI:

| KG: | Nr.: | Kostengruppe (KG): | Seite BKI: | Bandbreite der Preise: | | gewählt: [€/Einheit] inkl. Montage inkl. 19% MwSt. | Umrechnung: [€/Einheit] | Regionalfaktor: [%] | Index: [Stk./m²] | Menge: [€] | Preis: inkl. MwSt. |
|--------|------|--|------------|------------------------|-------------------|--|----------------------------|------------------------|---------------------|---------------|-----------------------|
| | | | | [€/Einheit] | [€/Einheit] | | | | | | |
| | | | | 20% MwSt. | Steiermark: 0,937 | | | | | | |
| 400 | | • Bauwerk - Technische Anlagen | | | | | | | | | |
| 412.43 | | Warmwasserleitungen, Warmwasser/Zirkulation: | | | | | | | | | |
| | | Warmwasserleitungen, Formstücke, Rohrdämmung (100 m) | 700 | 28,83 | 44,35 | 30 | 30,25 | 28,35 | 28,81 | 100 lfm | 2881 |
| 412.44 | | Verteiler, Warmwasser/Zirkulation: | | | | | | | | | |
| | | Zirkulationspumpe | 701 | 181,05 | 378,63 | 300 | 302,52 | 283,46 | 288,12 | 1 Stk. | 288 |
| 421.31 | | Heizkesselanlagen, gasförmige/flüssige Brennstoffe: | | | | | | | | | |
| | | Gastrenzwerkkessel (3,8 - 13 kW) | 727 | 345,81 | 699,17 | 525 | 529,41 | 496,06 | 504,21 | 8 kW | 4034 |
| 421.32 | | Heizkesselanlagen, feste Brennstoffe: | | | | | | | | | |
| | | Holz-Pellet-Anlage (ca. 10 kW) inkl. Pufferspeicher (800 l); Restliche Komponenten fehlen! | 728 | 1182,26 | - | 1182,26 | 1192,19 | 1117,09 | 1135,43 | 8 kW | 9083 |
| 421.41 | | Wärmeppumpenanlagen: | | | | | | | | | |
| | | Sole-Wasser-Wärmeppumpe (4,98 - 21,1 kW) inkl. Bohrung, Sonde, Zuleitung, Umwälzpumpe, Ausdehnungsgefäß, Zubehör, (inkl. teilweise Kühlaustrüstung sowie Pufferspeicher) | 728 | 2067,12 | 4276,85 | 3150 | 3176,47 | 2976,35 | 3025,23 | 8 kW | 24202 |
| 421.51 | | Solaranlage inkl. Ausdehnungsgefähle, Solarleitungen, Dämmung | 728 | 660,77 | 1204,91 | 800 | 806,72 | 755,90 | 768,31 | 8 m² | 6147 |
| 421.61 | | Warmwasserspeicher 200 - 400 Liter, isoliert | 729 | 608,88 | 5336,63 | 1650 | 1663,87 | 1559,04 | 1584,65 | 1 Stk. | 1585 |
| 421.71 | | Mess-, Steuer- und Regelanlagen | 731 | 41,61 | 2228,5 | 350 | 352,94 | 330,71 | 336,14 | 1 Stk. | 336 |
| 422.11 | | Umwälzpumpe | 732 | 108,27 | 771,74 | 310 | 312,61 | 292,91 | 297,72 | 1 Stk. | 298 |
| 422.21 | | Rohrleitungen für Raumheizflächen inkl. Verbindungsstücke, Ventile, Rohrdämmung (120 m) | 734 | 8,89 | 97,89 | 30 | 30,25 | 28,35 | 28,81 | 120 lfm | 3457 |
| 423.11 | | Radiatoren (12 Stk.) | 738 | 195,71 | 1050,85 | 500 | 504,20 | 472,44 | 480,20 | 12 Stk. | 5762 |
| 423.21 | | Fußbodenheizung, PE-Xa/PE-Xc bzw. Mehrschichtverbundrohr (ca. 1200 m), Noppenplatte, Dämmung, Heizungsverteiler, Stellantriebe, Thermostate | 742 | 33,13 | 100,54 | 55 | 55,46 | 51,97 | 52,82 | 140 m² | 7395 |
| 429.12 | | Schornsteine, Edelstahl | 744 | 1005,52 | 4540,66 | 2600 | 2621,85 | 2456,67 | 2497,02 | 1 Stk. | 2497 |

Statistische Kostenkennwerte für Gebäudetechnik nach Teil F des BKI sowie Preise lt. Internetrecherche:

| LB: | Nr.: | Langtext entsprechend Nummerierung.: | Seite BKI: | Bandbreite der Preise: | | gewählt: [€/Einheit] inkl. Montage exkl. MwSt. | Umrechnung: [€/Einheit] | Regionalfaktor: [%] | Index: [Stk./m²] | Menge: [€] | Preis: inkl. MwSt. | |
|----------------------------|------|--|------------|------------------------|-------------------|--|----------------------------|------------------------|---------------------|---------------|-----------------------|------|
| | | | | [€/Einheit] | [€/Einheit] | | | | | | | |
| | | | | 20% MwSt. | Steiermark: 0,937 | | | | | | | |
| • Öl-Heizanlage: | | | | | | | | | | | | |
| | | Öl-Brennwertkessel inkl. Regelung (6,9 - 12,3 kW) Nutzungsgrad: bis zu 98 % (Hs)/104 % (H) | | Internet-Recherche | 3735 | 4065 | 4000 | 4000,00 | - | - | 1 Stk. | 4000 |
| LB 040 | 12 | Öl-Niedertemperaturkessel (bis 50 kW) inkl. Glühölzbrunner, Zubehör (Schalter, Temperaturbegrenzer), Kessel gedämmt Norm-Nutzungsgrad bei 75/60 °C: 95 % (Hezwassertemperatur) | 869 | 3077 | 4943 | 4010 | 4812,00 | 4508,84 | 4582,89 | 1 Stk. | 4583 | |
| • Pellet-Heizanlage: | | | | | | | | | | | | |
| LB 040 | 18 | Holz-Pellet-Heizkessel, stehende Montage (bis 25 kW): inkl. Sicherheitseinrichtungen, Zubehör (Anschlussstutzen, etc.) Norm-Nutzungsgrad 75/60 °C: 92 / 94 % (bezogen auf unteren Heizwert) | 872 | 4569 | 10981 | 7000 | 8400,00 | 7870,80 | 8000,06 | 1 Stk. | 8000 | |
| LB 040 | | Pellet-Fördersystem mittels Förderschnecke | 1700 | 3000 | 2500 | 2500,00 | - | - | - | 1 Stk. | 2500 | |
| • Gas-Heizanlage: | | | | | | | | | | | | |
| LB 040 | 1 | Gas-Brennwerttherme, Wandmontage (9 - 15 kW): inkl. sicherheitstechnischer Einrichtungen und digitaler Mess-, Steuerungs-, Regelungstechnik (MSR); Heizmedium: Wasser Norm-Nutzungsgrad bei 40/30 °C für unteren Heizwert: 102 / über 108 % | 864 | 2391 | 4922 | 3640 | 4368,00 | 4092,82 | 4160,03 | 1 Stk. | 4160 | |
| • Wärmepumpen-Heizanlage: | | | | | | | | | | | | |
| LB 040 | 28 | Wärmepumpe - Sole/Luft/Wasser (bis 20 kW): für Raumheizung und Trinkwassererwärmung, max. Voraufentemperatur 55 °C Leistungszahl COP bei Auslegungstemperaturen: B0-35 / L2-35 | 877 | 6733 | 13111 | 6520 | 7824,00 | 7331,09 | 7451,49 | 1 Stk. | 7451 | |
| LB 040 | 29 | Erdsondenanlage, Wärmepumpe, Sondenbohrung inkl. Verrohrung: Doppel-U-Sonden 32 mm; Tiefe 50/100/150 m inkl. Nebenarbeiten (wasserrechtliche Bewilligung sowie Bohrgenehmigung, Baustelleneinrichtung und Abtransport, Umstellen Bohrgerät; liefern, einbauen, prüfen der Sonden inkl. Hinterfüllung, Planerstellung) Bohrloch: 160 mm, 1 Solenkreis, Befüllung: Wasser-Glykol-Gemisch | 878 | 44 | 75 | 60 | 72,00 | 67,46 | 68,57 | 240 lfm | 16457 | |
| • Allgemeine Anlagenteile: | | | | | | | | | | | | |
| LB 040 | 26 | Pufferspeicher 800 - 1000 Liter | 876 | 1180 | 6746 | 1250 | 1500,00 | 1405,50 | 1428,58 | 1 Stk. | 1429 | |
| | 31 | Ausdehnungsgefäß bis 500 Liter | 863 | 59 | 686 | 202 | 242,40 | 227,13 | 230,86 | 1 Stk. | 231 | |
| LB 041 | 49 | Thermostatventile | 888 | 10 | 26 | 18 | 21,60 | 20,24 | 20,57 | 12 Stk. | 247 | |
| LB 047 | 1-5 | Dämmung Rohrleitung Warmwasser (90 m) | 960 | 5 | 25 | 10 | 12,00 | 11,24 | 11,43 | 90 lfm | 1029 | |

9.8 Preisermittlung der Heiz- und Lagerräume

| • Datengrundlage: | Baukosteninformationszentrum BKI - Baukosten Gebäude 2014 (Teil 1); S.296 Baukosteninformationszentrum BKI - Baukosten Bauelemente 2014 (Teil 2); S.146 | | | | | | | | | |
|--|--|---|--|--------------------------|--|--|--|--|--|--|
| • Kostenstand: | 4. Quartal 2012 | | | | | | | | | |
| • Gebäudeart: | Ein- und Zweifamilienhäuser, unterkellert, mittlerer Standard | | | | | | | | | |
| • Größe des Heiz- u. Lagerraums: | BGF: NGF: | 19,15 15,00 | m² m² | | | | | | | |
| • Umrechnungsfaktor BGF -> NGF: | | 0,7833 | | | | | | | | |
| • Kosten/m ² BGF: | min von Mittel bis max | 830 930 1060 1235 1390 | €/m ² €/m ² €/m ² €/m ² €/m ² | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Länge: [m] | Höhe: [m] | Fläche: [m ²] | Preise lt. BKI (mittl. Standard): [€/Einheit] 19% MwSt. | Umrechnung: 20% MwSt. | Preis: [€] inkl. 20% MwSt. | | | | | |
| Umfang Heiz- u. Lagerraum: | 19,30 | 2,50 | | | | | | | | |
| Fläche Heiz- u. Lagerraum: | | 2,50 | 19,15 | | | | | | | |
| Bodenplatte: | | 19,15 | 61,00 25,00 | 61,51 25,21 | Bodenplatte Abdichtung 1177,97 482,77 | | | | | |
| Außenwände: | 9,07 | 2,50 | 22,68 | 110,00 94,00 33,00 | Außenwände tragend AW-Bekleidung außen AW-Bekleidung innen 2515,21 2149,36 754,56 | | | | | |
| Innenwände: | 11,63 | 2,50 | 29,08 | 79,00 35,00 | Innenwände tragend IW-Bekleidung 2316,23 1026,18 | | | | | |
| Türen u. Fenster: | | | 2,48 | 319,00 | Türen u. Fenster 797,77 | | | | | |
| Decke: | | | 19,15 | 141,00 | Decken 2722,84 | | | | | |
| * Die verwendeten Werte stellen die Mittelwerte dar! | inkl. 20% MwSt. (Stand: 1. Quartal 2014) | | | | | | | | | |
| 13943 Euro | | | | | | | | | | |
| Die Berechnung der Herstellkosten des Heiz- u. Lagerraums ergibt bei 19,15 m ² BGF einen Preis von: | | | | | | | | | | |
| 728 Euro/m ² | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| • Abminderungsfaktoren für den Raumbedarf je Heizsystem: | | | | | | | | | | |
| Faktor: | Art: | BGF: | NGF: | Preis: | | | | | | |
| - | - | [m ²] | [m ²] | [€] | | | | | | |
| 0,85 | Pellet | 16,3 | 12,7 | 11.851 | | | | | | |
| 0,7 | Heizöl | 13,4 | 10,5 | 9.760 | | | | | | |
| 0,3 | Gas | 5,7 | 4,5 | 4.183 | | | | | | |
| 0,3 | Sole-W-WP | 5,7 | 4,5 | 4.183 | | | | | | |
| 0,25 | Luft-W.-WP | 4,8 | 3,7 | 3.486 | | | | | | |

Glossar

| | |
|--|---|
| Annuität | „bezeichnet eine egelmäßig wiederkehrende gleich hohe Zahlungen, üblicherweise die Jahresrate der Tilgung und Verzinsung einer Schuld.“ ²⁶⁰ |
| Aquifer | bezeichnet den „Teil einer Schichtenfolge, der ausreichend durchlässiges (Boden-) Material enthält, um ein signifikantes Wasservolumen an Brunnen oder Quellen abzugeben; die wasserungesättigte Zone wird ausdrücklich (TODD, 2005) darin eingeschlossen.“ ²⁶¹ |
| Barwert | Unter dem Barwert versteht man den Wert einer Zahlung, die auf den Bezugszeitpunkt (heute -> t_0) auf bzw. abgezinst wird. ²⁶² |
| Effektiver Porenanteil | Der effektive, durchflusswirksame Porenanteil n_{eff} ist der Quotient aus dem durchflusswirksamen Volumen der Hohlräume zum Gesamtvolumen. ²⁶³ |
| Grundwasserflurabstand | wird als der „lotrechte Abstand zwischen der Erdoberfläche und der Grundwasseroberfläche des ersten Grundwasserstockwerkes“ definiert ²⁶⁴ |
| Jahresarbeitszahl (JAZ) | beschreibt das Verhältnis der jährlich gelieferten Wärme eines Gebäudes zu jährlich aufgenommener elektrischer Energie (inkl. aller notwendigen elektrischen Geräte der Heizanlage) ²⁶⁵ |
| Kapitalwert | trifft eine Aussage über die Vorteilhaftigkeit eines Investitionsobjektes und wird als, auf den Bezugszeitpunkt abgezinste Wert aller Einnahmen und Ausgaben (Cash-Flow), definiert. Ist der Kapitalwert $C_0 > 0$, so gilt eine Investition als vorteilhaft. ²⁶⁶ |
| Monovalente Nutzung | Diese Betriebsart einer Wärmepumpe deckt den Wärmebedarf eines Gebäudes vollständig über das gesamte Jahr ab und ist immer zu bevorzugen. Dabei kann auch die Warmwasseraufbereitung berücksichtigt werden. ²⁶⁷ |
| Wärmeleitfähigkeit λ | die Fähigkeit eines Stoffes, thermische Energie mittels eines Wärmeleiters (Gestein und/oder Grundwasser) zu transportieren ²⁶⁸ |

²⁶⁰ VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. S. 4.

²⁶¹ HÖLTING, B.; COLDEWEY, W.: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie; 8. Auflage. S. 9.

²⁶² Vgl. BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. S. 41 (Kap. 7).

²⁶³ Vgl. HÖLTING, B.; COLDEWEY, W.: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie; 8. Auflage. S. 11.

²⁶⁴ HÖLTING, B.; COLDEWEY, W.: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie; 8. Auflage. S. 9.

²⁶⁵ Vgl. BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage. S. 60 und 61.

²⁶⁶ Vgl. BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. S. 41 (Kap. 7).

²⁶⁷ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 53.

²⁶⁸ Vgl. SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. S. 29.

10 Literaturverzeichnis

10.1 Bücher

- BONIN, J.: Handbuch Wärmepumpen - Planung und Projektierung; 2. Auflage. Berlin, Wien, Zürich. Beuth Verlag, 2012.
- HÖLTING, B.; COLDEWEY, W.: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie; 8. Auflage. Berlin Heidelberg. Springer Verlag, 2013.
- PATT, H.; JÜPNER, R.: Hochwasser-Handbuch; 2. Auflage. Berlin Heidelberg. Springer Vieweg, 2013.
- POGGENSEE, K.: Investitionsrechnung - Grundlagen, Aufgaben, Lösungen; 2. Auflage. Wiesbaden . Gabler Verlag, 2011.
- SASS, I. et al.: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. Berlin. Ernst & Sohn; Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e.V. (DGG) und Geotechnik e.V. (DGGT), 2013.
- SCHLABBACH, J.; DRESCHER, S.; CHRISTIAN, K.: Erdwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. Berlin, Offenbach. VDE Verlag, 2012.
- STOBER, I.; BUCHER, K.: Geothermie; 2. Auflage. Berlin Heidelberg. Springer Verlag, 2014.

10.2 Skripten

- BAUER, U.: Skript: Betriebswirtschaftslehre Bau - Enzyklopädie BWL. Graz. Technische Universität Graz, 2012.
- GOLDBRUNNER, J.: Vorlesungsfolien Geothermie. Graz. TU-Graz.
- GOLDBRUNNER, J.; FERSTL, M.; SONNEK, I.: Seminar – Erdwärmenutzung zur Heizung und Kühlung von Bauwerken. Graz. 2013.

10.3 Studien und Fachberichte

- ASCHAUER, J.: Auswertung der Betriebsdaten von Erdwärmesonden und Ableitung des Wärmeleitfähigkeitskatasters Oberösterreich. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62/Juni 2010.
- BERGER, H.: Erdwärmesonden - Hauptprobleme durch Planung und Erstellung. In: Deutsche Brunnenbauertage 2009, 04/2009/2009.
- BIERMAYR, P. et al.: Innovative Energietechnologien in Österreich - Marktentwicklung 2014 (Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und

Wärmepumpen). Berichte aus Energie- und Umweltforschung. -. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2015.

EBERT, P. et al.: Optimierung von Erdwärmesonden - Abschlussbericht. Bayrisches Zentrum für Angewandte Energieforschung, 2000.

GÖTZL G., O. V. et al.: GEO-Pot: Seiches Geothermie Potenzial Österreichs - Potenzialstudie. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 5/2010.

GRIMM, M. et al.: Schadensfallanalyse von Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg. In: Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, 4/2014.

HEILEK, C.; KÜHNE, M.; TZSCHEUTSCHLER, P.: Energiewirtschaftliche Bewertung der Wärmepumpe in der Gebäudeheizung. München. TU-München, 2013.

HUBBUCH, M.: Optimierung von Erdwärmesonden (Jahresbericht). Zürich. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), 2009.

INSTITUT FÜR ANGEWANDTE BAUFORSCHUNG WEIMAR: Erdwärme-Studie belegt Vorteile durch Rücklaufdämmung. In: Geothermie, Bohr- und Brunnentechnik, A61029/2014.

KELVIN: Compendium of the Fourier Mathematics for the conduction of heat in solids, and the mathematically allied physical subjects of diffusion of fluids and transmission of electrical signals through submarine cables. Quarterly Journal of Mathematics (1). 1856.

NIEDERBRUCKNER, R.: Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren zur Optimierung der Entzugsleistung von Erdwärmesonden. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62/Juni 2010.

NIEDERBRUCKNER, R.; STEINBACHER, N.: Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden. Linz. Amt der Oö. Landesregierung, 2007.

OCHMANN, N.; CRAMER, B.; REMPEL, H.: Studie_Energierohstoffe 2009 - Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit. Hannover. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2009.

TUDESHKI, H.; HERTEL, H.: Die Methoden der bohrtechnischen Erkundung von Lagerstätten mineralsicher Rohstoffe. In: Advanced Mining Solutions, 2/2010.

10.4 Normen, Richtlinien und Gesetze

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, U. u.: Wasserrechtsgesetz (WRG). BGBl. I Nr. 54/2014.

RUF, H.-U. et al.: Objektdaten Technische Gebäudeausrüstung G4 (Kosten abgerechneter Bauwerke). Stuttgart. Baukosteninformationszentrum (BKI), 2015.

RUF, H.-U. et al.: Baukosten Gebäude Teil1 und Bauelemente Teil2 (Statistische Kostenkennwerte). Stuttgart. Baukosteninformationszentrum (BKI), 2014.

LAND STEIERMARK: Die Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefensonden) - Strategiepapier. Graz. Land Steiermark, 2011.

ÖSTERR. INSTITUT FÜR BAUTECHNIK: OIB-Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz. -. Österr. Institut für Bautechnik, 2011.

ÖSTERR. NORMUNGSIINSTITUT: ÖN B 2533: Koordinierung unterirdischer Einbauten - Planungsrichtlinien. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, Februar 2004.

ÖSTERR. WASSER- U. ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND: ÖWAV-Regelblatt 207 - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds; 2. Auflage. Wien. Österr. Wasser- u. Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), 2009.

SCHWEIZERISCHER INGENIEUR- UND ARCHÍTEKTENVEREIN: SIA 384/6 - Erdwärmesonden. Zürich. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2010.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. Düsseldorf. Beuth, November 2012.

— : VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. Düsseldorf. Beuth, September 2012.

10.5 Leitfäden

SABEL, M.: Leitfaden Erdwärme - Grundlagenwissen und Praxistipps; 2. Auflage. Berlin. Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 2014.

SASS, I. et al.: Leitfaden Erdwärme - Tipps für Hausbesitzer und Bauherren; 12. Auflage. Berlin. GtV-Bundesverband Geothermie e.V, 2013.

SCHLADER, W. et al.: Richtig heizen mit Erdwärme (Informationsbroschüre). Vorarlberg. Qualitätsgemeinschaft Erdwärme, -.

10.6 Internet

<http://www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/einstieg-in-die-geothermie/ursprung-geothermischer-energie-und-geothermischer-gradient.html>. Datum des Zugriffs: 30.03.2015.

<http://www.energiestiftung.ch/energiethemen/erneuerbareenergien/umweltwaerme/waermepumpe/>. Datum des Zugriffs: 20.April.2015.

<http://www.energie-wissen.at/geothermie/index.php>. Datum des Zugriffs: 30.März.2015.

<http://www.waermepumpe-austria.at/die-waermepumpe/vorteile-einer-waermepumpe.html>. Datum des Zugriffs: 28.April.2015.

<http://welt-der-bwl.de/Barwert>. Datum des Zugriffs: 25.August.2015.

http://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht_national/wasserrechtsgesetz/WRG1959.html. Datum des Zugriffs: 24.Juli.2015.

<http://www.erdsondenoptimierung.ch/themen/>. Datum des Zugriffs: 21.Oktober.2015.

<http://www.erdsondenoptimierung.ch/gesamtoptimierung/>. Datum des Zugriffs: 5.Oktober.2015.

<http://www.jahresarbeitszahlen.info/index.php/theorie-und-praxis/feldstudien-und-ergebnisse>. Datum des Zugriffs: 16.August.2015.



Institut für baubetrieb + bauwirtschaft
projektentwicklung + projektmanagement