

Abschlussbericht

geomatrix.bw, Teil 1: Ganzjährige Nutzung von Geothermie zum Heizen und Kühlen von Gebäuden

Ilyes Ben Hassine, Antoine Dalibard, Ruben Pesch,
Felix Thumm, Ursula Eicker

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK STUTTGART

Förderkennzeichen: ZO4E 28001

Laufzeit: 1.9.2009– 28.2.2012

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Programms „Herausforderung Erdwärme“ mit Mitteln aus der Zukunftsoffensive IV des Landes Baden-Württemberg finanziert.

Mai 2012

Der Bericht umfasst:

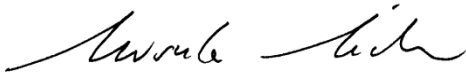
150 Seiten Text

8 Seiten Anhänge

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Stuttgart, den 31. Mai 2012

Projektleiter:



Prof. Dr. Ursula Eicker

Bearbeiter:

Dipl. Ing. Ilyes Ben Hassine

Dipl. Ing. Antoine Dalibard

Dipl. Ing. (FH) M. Sc. Ruben Pesch

Dipl. Ing. (FH) M. En. Felix Thumm

Danksagung

Die vorliegenden Untersuchungen wurden im Rahmen des Programms „Herausforderung Erdwärme“ mit Mitteln aus der Zukunftsoffensive IV des Landes Baden-Württemberg finanziert. Diesem sei an dieser Stelle für Bewilligung und Förderung des Vorhabens gedankt. Die konkrete Zusammenarbeit erfolgte mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Projektträger Karlsruhe, Baden-Württemberg Programme (PTKA-BWP). Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Trägers gilt unser Dank für die gute und erfolgreiche Zusammenarbeit.

Das Forschungsvorhaben war neben der Finanzierung auf eine enge Kooperation mit Projektpartnern angewiesen. An erster Stelle sei hier den Mitarbeitern der am Projektverbund beteiligten Institute, namentlich der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) der Universität Stuttgart und dem Institut für angewandte Geowissenschaften Karlsruhe (AGW) sowie der Universität Tübingen, gedankt. Für die Bereitstellung von Messdaten aus Felduntersuchungen und Unterstützung bei der Einrichtung von Messaufbauten ein Dankeschön für diese Hilfe an:
COOP AG, Hafner-Muschler und Zent-Frenger.

DANKSAGUNG	2
1 KURZFASSUNG.....	6
2 ABSTRACT.....	7
3 MOTIVATION UND RATIONALE.....	9
4 AUFGABENSTELLUNG	10
5 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND.....	10
6 PLANUNG UND ABLAUF	12
7 ERGEBNISSE.....	13
7.1 SYSTEMTECHNIK GEOTHERMIE	13
7.1.1 Nutzungsanforderungen und Lastprofile	13
7.1.2 Jahresbilanzen mit vereinfachten Modellen	22
7.1.3 Bewertung der verschiedenen Systeme.....	29
7.2 ENTWICKLUNG VON SIMULATIONSMODELLEN	41
7.2.1 Modelloptimierung dreidimensionaler Erdsondenfelder	41
7.2.2 Rechenroutine, Berechnungsablauf	46
7.2.3 Validierung des Programms	48
7.2.4 Simulation der Anwendungsfälle	50
7.2.5 Diskussion der Ergebnisse	51
7.2.6 Zwischenfazit	51
7.2.7 Die Erweiterung des Modells um das Modul zur Simulation von Grundwasserströmung	51
7.2.8 Validierung des Grundwassermoduls.....	54
7.2.9 Langzeitstabilität von Sondenfeldern.....	63
7.2.10 Modellvalidierung am Versuchsaufbau VEGAS	64
7.2.11 Simulationsmodelle und -grenzen	69
7.3 WÄRMETECHNISCHE UNTERSUCHUNG AN ERDSONDEN.....	70
7.3.1 Experimentelle Untersuchungen an der Pilotanlage in Stuttgart-Vaihingen	70
7.3.2 Integration der Geothermieanlage in den Rückkühlkreis der DAKM.....	74
7.3.3 Messtechnik.....	77
7.3.4 Zusammenstellung der bisher erfolgten Messungen	77
7.3.5 Geothermie & DAKM	79
7.3.6 Annahmen für die Vergleichsrechnung	80
7.4 SYSTEMTECHNISCHE UNTERSUCHUNG VON REFERENZANLAGEN	87
7.4.1 Messtechnische Untersuchungen einer großtechnischen Anlage für Lebensmittelkühlung.....	87
7.4.2 Ergebnisse der Wochensimulation	89
7.4.3 Abhängigkeit EER von der Umgebungstemperatur	93
7.4.4 Beitrag Geothermie.....	94

7.4.5	Jahresrechnung	95
7.5	VERBESSERUNGSMÖGLICHKEITEN.....	95
7.5.1	Optimierungspotenzial durch die Trennung der NK-TK Kaskade	97
7.6	ENTWICKLUNG EINES PLANUNGSLEITFADENS	100
7.6.1	Grundsätzliche Bemerkungen zur geothermischen Nutzung	100
7.6.2	Dimensionsrichtlinien für ganzjährige Erdsondennutzung	102
7.6.3	Energetische wie wirtschaftliche Bewertung	118
7.6.4	Zusammenfassung	135
8	BEITRAG DER ERGEBNISSE ZU DEN ZIELEN DES FÖRDERPROGRAMMS	137
9	LITERATUR	139
10	VORTRÄGE UND VERÖFFENTLICHUNGEN.....	142
11	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	143
12	ANHANG A.....	148

1 Kurzfassung

Die thermische Nutzung des Untergrundes zum Kühlen und Heizen von Gebäuden rückt zunehmend in den Fokus - durch höhere Kosten für Energie und den politischen Willen, konventionelle Systeme für die Wärme- und Kältebereitstellung im Gebäudesektor durch ökologisch wie ökonomisch sinnvolle Alternativen zu ersetzen. Durch den Einsatz von Flächenheizsystemen in neuen Gebäuden und - nach der Sanierung - in Gebäuden im Bestand können diese Liegenschaften mit Niedertemperaturheizsystemen geheizt und falls notwendig gekühlt werden. Die relativ geringen Vorlauftemperaturen solcher Heizsysteme von ca. 35 °C ermöglichen die Nutzung von kostengünstiger „Umweltwärme“ in Verbindung mit elektrischen oder thermischen Wärmepumpen. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erschließung von Erdwärme mittels geschlossener vertikaler Erdreichwärmetauscher.

Gerade im kombinierten Betrieb solcher Erdwärmesonden ist die Nutzung des Untergrundes aufgrund des ganzjährig konstanten Temperaturniveaus der Sole von etwa 10 °C höchst interessant. Für den Heizfall wirkt sich die Spreizung zwischen Wärmequelle („Umweltwärme“) und Vorlauftemperatur maßgeblich auf die Effizienz der Wärmepumpe aus. Das Temperaturniveau der Sole liegt im Winter verglichen mit anderen Wärmequellen wie z.B. Umgebungsluft deutlich höher, sodass höhere Arbeitszahlen der Wärmepumpe erzielt werden. Gleichzeitig sind die ganzjährig erreichten Rücklauftemperaturen der Sonden niedrig genug, um im Sommer z.B. ein Bürogebäude frei zu kühlen oder wie in der Lebensmittelbranche üblich, eine effiziente Rückkühlung der Kompressionskälteaggregate sicherzustellen.

Aufgrund dieser vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten von Geothermie im Gebäudebereich ist es zweckdienlich ein Simulationswerkzeug zu entwickeln, das eine große Bandbreite von Anwendungsfällen abdeckt und sowohl die Ermittlung energetischer Kennwerte für den Anlagenplaner zulässt als auch die Temperaturverteilung im Erdreich und/oder Grundwasser für den Bodenökologen liefert.

Ein Projektverbund, bestehend aus der Universität Tübingen (ZAG) bzw. nachfolgend dem KIT Karlsruhe, der Universität Stuttgart (VEGAS) und der Hochschule für Technik Stuttgart (zafh.net), wurde gebildet, um die Kernkompetenzen der Projektpartner für die Weiterentwicklung bestehender Simulationsmodelle (zafh.net) und die Kalibrierung kommerzieller Simulationstools (ZAG) anhand räumlich und zeitlich hochaufgelöster Messdaten (VEGAS) zusammenzubringen. Darüber hinaus wurden von allen Projektteilnehmern spezielle Fragestellungen bearbeitet, die in Eigenregie der Projektpartner vorangetrieben wurden. Für das zafh.net war dies die experimentelle Untersuchung einer Pilotanlage (Diffusions-Absorption-Kältemaschine – DAKM) in Stuttgart-Vaihingen, die messtechnische Erfassung eines Le-

bensmittelmarktes in Norddeutschland und die Erstellung einer Dimensionsrichtlinie, aufbauend auf den Simulationsdaten und Messwerten aus untersuchten Geothermieanlagen.

2 Abstract

The use of the geothermal technology for cooling and heating of buildings is growing in importance due to rising energy costs and mounting political will to replace conventional heating and cooling systems with practical alternatives that are both ecologically and economically sound.

Through the use of surface radiant heating systems in new construction and renovated existing buildings, properties can be heated, and cooled if necessary, using low-temperature heating systems. The relatively low flow temperatures of about 35 °C of such heating systems allow for the use of more cost effective "ambient heating", in conjunction with electrical or thermal heat pumps. This paper addresses the development of geothermal energy by means of closed vertical ground heat exchangers.

The use of the ground is particularly interesting as the brine retains a constant temperature of 10 °C year round. For heating, the difference between the heat source (ambient heat) and the heat sink (inlet temperature of heating system) significantly affects the efficiency of the heat pump. The temperature of the brine in winter compared to other heat sources, such as ambient air, is considerably higher and allows for higher energy efficiency ratios (EER) of the heat pump to be achieved. At the same time, the year round outlet temperature of the probes is low enough in the summer to support the free cooling of an office building or the effective re-cooling of refrigeration compression units (common to the food industry).

Because there are numerous potential applications of geothermal energy in the building sector, it is appropriate to develop a simulation tool that covers a wide range of uses, which should include energetic parameters for system designers and also temperature distributions of soil or groundwater for soil ecologists.

A project group consisting of the University of Tübingen (ZAG), University of Stuttgart (VEGAS) and the University of Applied Sciences Stuttgart (zafh.net) was formed around the core competencies of the project partners to the further develop existing simulation models (zafh.net) and calibrate commercial simulation tools (ZAG) based on compiled high temporal and spatial resolution data (VEGAS). In addition, specialized topics were modified and fur-

ther investigated by each of the project participants. For zafh.net, these focused areas of research included the development of a pilot cooling system (Diffusion-Absorption-Chiller - DACM) in Stuttgart Vaihingen, the energy flow measurements of a food market in Northern Germany and the creation of design and dimension guidelines for geothermal heat exchangers based on simulation and measurement data.

3 Motivation und Rationale

Der Bereich der Gebäudebeheizung und -klimatisierung mit einem Anteil von ca. 30 % am Gesamtenergieverbrauch (Primärenergieverbrauch) landesweit, birgt ein großes Potenzial an Einsparmöglichkeiten. Als bedeutende Aufgabe für die Reduktion des Energieverbrauchs ist in den kommenden Jahren neben der Erhöhung der Energieeffizienz von Anlagen und Gebäuden auch die Substitution fossiler Brennstoffe durch erneuerbare und damit nachhaltige Energieträger entscheidend.

Eine Kombination aus geothermischer Wärmesenke/-quelle und reversibler Wärmepumpe ermöglicht die nachhaltige Nutzung von geothermischen Anlagen als Niedertemperaturwärmequelle/-senke für Heiz- und/oder Kühlzwecke. Angesichts einer stetigen Zunahme der erneuerbaren Energien an der Stromgestehung bieten Wärmepumpen mit geothermischer Wärmeversorgung eine zukunftsweisende Technologie zur Gebäudeklimatisierung. Im Rahmen einer Studie des Fraunhofer ISE [28] wurde die Effizienz von unterschiedlichen Wärmepumpensystemen (Sole/Wasser, Luft/Wasser und Wasser/Wasser) an zahlreichen Anlagen im realen Praxisbetrieb über ein detailliertes Monitoring untersucht und ausgewertet. Für die hier betrachteten Sole/Wasser-Wärmepumpen ergaben sich mittlere Jahresarbeitszahlen, die sich zwischen 3,2 und 3,3 bewegen, wohingegen Luft-/Wasser lediglich mittlere Jahresarbeitszahlen von 2,5 bis 2,6 erreichen.

Oberflächennahe Geothermie wird neben dem Einsatz in Wärmepumpensystemen zu Heizzwecken zunehmend auch für Kühlung und Klimatisierung eingesetzt. Durch eine ganzjährige Nutzung der Erdsonden für Heiz- und Kühlzwecke lässt sich die Auskühlung des Erdreichs reduzieren und somit die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen steigern. Außerdem ergeben sich durch die zusätzliche thermische Nutzung für die Erdwärmesonde deutlich reduzierte Amortisationszeiten.

Die wesentliche Einschränkung für die sommerliche Nutzung ist das relativ hohe Temperaturniveau des Sondenfluids, das sich typischerweise zwischen 15 und 20 °C bewegt. Daher ist eine direkte Nutzung auf Flächenkühlsysteme oder Luftvorkühlung begrenzt. Darüber hinaus lassen sich Erdwärmesonden allerdings auch als sommerliche Wärmesenken von konventionellen Kompressionskälteanlagen oder thermisch angetriebenen Absorptionskälteanlagen nutzen, wodurch sich der Ersatz hygienisch problematischer offener Rückkühlsysteme vermeiden lässt.

Nach erfolgten Auswertungen hinsichtlich der Rückkühlvarianten für wassergekühlte Kompressionskältemaschinen folgt in dieser Arbeit die Detailbetrachtung der geothermisch rückgekühlten Variante. Untersucht werden drei Szenarien, die sich hinsichtlich der eingetragenen Energiemenge, der Auslegelast und des Lastverlaufs unterscheiden.

4 Aufgabenstellung

Wesentliches Ziel ist die Analyse und Modellbildung von innovativen Erdsondenanlagen, die sowohl für Heiz- als auch Kühlzwecke genutzt werden. Durch die ganzjährige Nutzung können die Kosten entscheidend gesenkt werden und die energetische Bilanz zwischen Wärmeentzug und Wärmesenke ausgeglichen werden. Verbesserte Simulationsmodelle erlauben eine energetische und wirtschaftliche Bewertung aller für die Gebäudeheizung und -kühlung möglichen Systemkonzepte. Detaillierte Untersuchungen an einer Pilotanlage mit thermisch angetriebener Wärmepumpe zeigen den Einfluss von Verfüllmaterialien, Strömungsverhältnissen und Wärmeübertragung auf.

Die Effizienzverbesserung von reversiblen Wärmepumpen wird praxisnah an verschiedenen Pilotanlagen analysiert. Für den energieaufwändigen Bereich der Lebensmittelkühlung sollen neue Anwendungsfelder erschlossen werden.

5 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Optimierung der Systemtechnik von Geothermieranlagen erfordert detaillierte Modellbildung im Bereich der Sonden selber sowie der gekoppelten Wärmepumpen/Kältemaschinen.

Das Hauptziel des Entwurfsprozesses ist die Ermittlung der erforderlichen Sondenlängen, um die erforderliche thermische Energie extrahieren oder eintragen zu können. Das Modellieren der thermischen Reaktion des umgebenden Erdreiches erfordert Informationen über die Bodentemperaturverteilung, den Feuchtigkeitsgehalt, die Grundwasserströmung, das Einfrieren oder Auftauen des Erdreiches und die Geometrie der Erdsonden. Bei größeren Vorhaben mit komplexeren Geometrien des Sondenfeldes und kombinierter Nutzung des Untergrunds zum Kühlen im Sommer sowie zum Heizen im Winter sind Simulationen zur Feststellung der jährlich zu erwartenden Entzugsleistungen obligatorisch. Die Auslegung nach VDI 4640 [36] spielt in der Regel bei kleineren Projekten wie im Einfamilienhausbau mit lediglich einer bis zwei Erdwärmesonde(n) eine Rolle.

Die entwickelten Berechnungsverfahren lassen sich entsprechend ihrer Freiheitsgrade (zweidimensionale, quasi-dreidimensionale und echt-dreidimensionale) und ihres Ansatzes (analytisch/numerisch) unterscheiden. Die Art der Diskretisierung wiederum (finite Differenzen/finite Elemente) teilt die numerischen Simulationsmodelle in zwei unterschiedliche Verfahren.

Der von Eskilson 1987 [19] entwickelte Ansatz zur Lösung des dreidimensionalen Wärmetransports innerhalb von Erdsondenfeldern mittels sog. Geometriefunktionen (g-functions) ist ein weit verbreiteter Standard zur Berechnung von Leistungserträgen und zur Vorhersage des Langzeitverhaltens der Sondenfelder. Dieses Berechnungsmodell gehört zur Klasse der

analytisch-numerischen Kalkulationsmodelle, die von einer Reihe von Vereinfachungen ausgehen, die zu Ungenauigkeiten bei der Anlagensimulation im Gebäudebereich führen können. In der Modellbildung Eskilsons wird der geothermische Wärmetauscher als vertikale Linienquelle mit einer über die Gesamtlänge der Sonde gemittelten Temperatur gesehen. Ausgehend von dieser Quelle wird in einer beliebigen Schnittebene die zweidimensionale Temperaturverteilung im thermisch homogenen Erdreich berechnet, und somit die mittlere Entzugsleistung gewonnen. Dieses für eine Wärmesonde korrekte Verfahren wird zur Simulation von Feldern dergestalt modifiziert, dass die gegenseitige Beeinflussung der Sonden durch Berechnung der einzelnen Temperaturgradienten und nachfolgender Superposition der Ergebnisse bewerkstelligt wird. Die Temperaturgradienten sind abhängig von der gewählten Geometrie des Sondenfeldes und können als dimensionslose Geometriefunktionen aus einem Katalog zur Berechnung herangezogen werden. Sie werden einmalig aus einer numerischen zwei-dimensionalen Simulation in einer Ebene ermittelt und sind für alle vergleichbaren Geometrien gültig. Vorteil dieses Verfahrens sind kurze Simulationszeiten und gute Übereinstimmung mit dem realen Wärmetransport im eingeschwungenen Zustand.

Bei instationärem Wärmetransport, wie er sich beispielsweise bei einem Lastwechsel ergibt, stößt das Verfahren an seine Grenzen [39]. Des Weiteren ist die Annahme einer mittleren Temperatur über die gesamte Sondenlänge für die Berechnung des repräsentativen Temperaturgradienten aller Schnittebenen notwendig, entspricht aber nicht der real anzutreffenden Temperaturverteilung.

Diese Einschränkungen führten zu einer Weiterentwicklung des Modells von Eskilson durch Zeng und Fang [40] im Jahr 2002, wobei erstmals ein quasi-dreidimensionales Abbild der realen Temperaturverteilung erreicht wurde. Auch bei Zeng und Fang wird zur Berechnung der Entzugsleistung ein analytischer Ansatz gewählt, allerdings weicht bei diesem Modell die Annahme der konstanten Temperaturverteilung über die Sondenlänge einer Berechnung mit variierenden Temperaturen in unterschiedlichen Ebenen. Das Modell Eskilsons wird durch die Erweiterung durch Zeng und Fang verfeinert, was die Vorhersagegenauigkeit erhöht. Trotz dieser Verbesserung des Modells bleibt die Problematik, die sich in Verbindung mit instationären Wärmetransportvorgängen bei Lastwechsel ergibt, offensichtlich. Als quasi-dreidimensional ist dieses Modell zu bezeichnen, da zwischen den einzelnen Berechnungsebenen keine Wärmeübertragung stattfindet.

Die Abbildung der realen physikalischen Verhältnisse kann durch die echt dreidimensionale Berechnung der Temperaturverteilung in und um die Sonde gesteigert werden. Das an der Hochschule für Technik Stuttgart entwickelte Berechnungstool soll durch Berechnung ganzer Sondenfelder den Grundwassereinfluss auf die zu erwartende Entzugsleistung einzelner Sonden ausreichend genau abbilden. Da es sich bei der mathematischen Abbildung von

Grundwasserströmung innerhalb eines Sondenfeldes um eine gerichtete Größe handelt, wird der geometrische Bezug der Simulationselemente im Sondennahfeld für die Horizontale entscheidend. Reihenfolge der durchströmten Elemente, Strömungsgeschwindigkeit und effektive Strömungsquerschnitte sind hierbei Variablen, die sich von Zeitschritt zu Zeitschritt mit dem Anströmwinkel der Grundwasserströmung sowie der fließenden Grundwassermenge ändern. Für die Geometrie ergibt sich somit die Notwendigkeit einer lückenlosen Auflösung des Simulationsbereichs an und um die Sonde bzw. zwischen den Sonden eines zusammenhängenden Feldes.

6 Planung und Ablauf

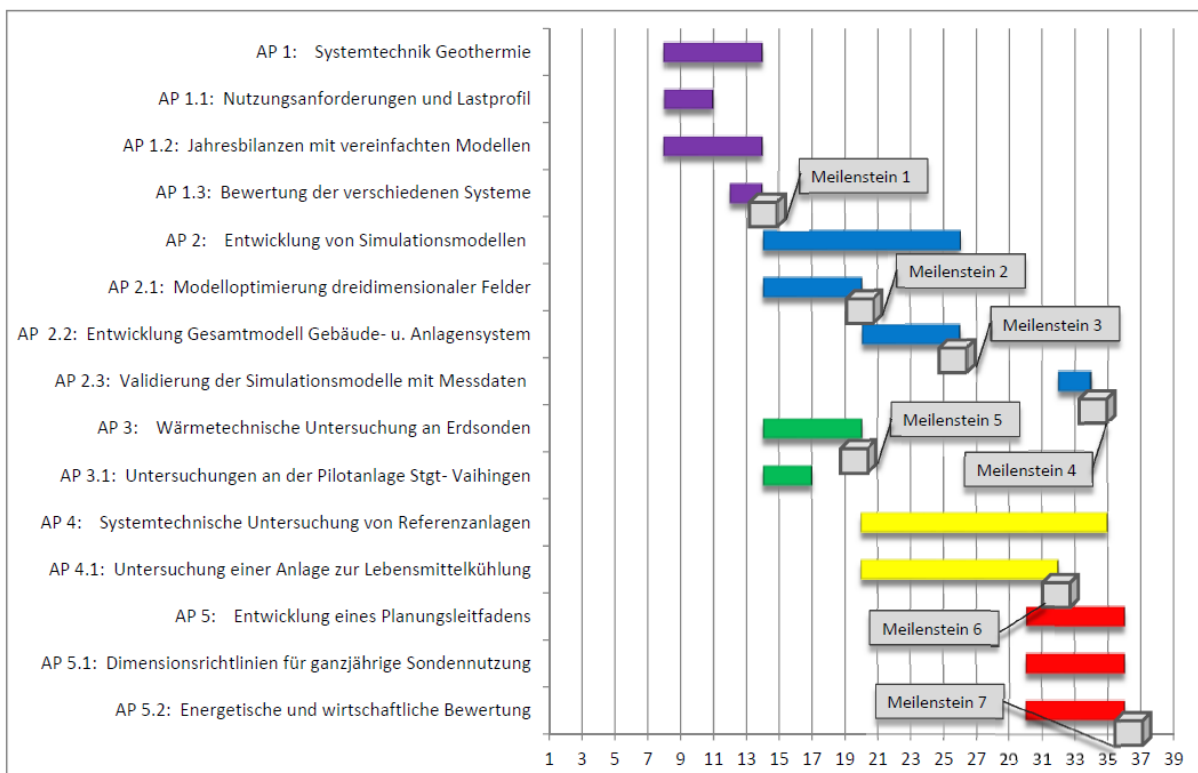


Abbildung 1: Zeitplanung und Meilensteine

Abbildung 1 zeigt den geplanten Projektablauf über die 30 Monate Projektlaufzeit. Die einzelnen Arbeitspakete sind farblich voneinander abgesetzt, die zu erreichenden Meilensteine wurden in Grau gehalten. Die Struktur dieses Berichts orientiert sich an der Arbeitspaketplanung dieses Ablaufplans und fasst die erreichten Ergebnisse zusammen. An dieser Stelle angemerkt sei, dass die Projektplanung durch die Bildung eines Projektverbundes mit der Universität Stuttgart und der Universität Tübingen Änderungen unterlag, da sich Zielsetzungen für die Entwicklung und Validierung eines Sondenmodells (AP 2) unter Berücksichtigung von Grundwasserströmungseinflüssen verschoben haben. Die an der Universität Stuttgart durchgeführten Messungen wurden zur Validierung der umfangreichen Programmierung des

Grundwassermoduls genutzt, und Werten der Universität Tübingen gegenübergestellt, wodurch die gewünschte Schnittmenge mit den Projektpartnern geschaffen wurde (siehe Abschnitt 7.2)

7 Ergebnisse

7.1 Systemtechnik Geothermie

7.1.1 Nutzungsanforderungen und Lastprofile

Der Temperaturbereich der genutzten Endenergie, bei dem geothermische Anlagen zum Einsatz kommen, variiert von -30 °C (Tiefkühlhäuser) bis $+70\text{ °C}$ (Warmwasserbereitung/Vorlauf Zentralheizung). Entsprechend unterschiedlich sind die an die Wärme-/Kältegestehungssysteme gestellten Anforderungen.

Im Arbeitspaket Nutzungsanforderungen und Lastprofile soll auf Basis der in **Abbildung 1** dargestellten Systematik ein Katalog der anwendungsspezifischen Anforderungen an die Systemtechnik zusammengetragen werden. Hierzu werden für unterschiedliche Anwendungen und Temperaturbereiche für Heizung und Kühlung stündlich aufgelöste Nutzungsanforderungen und Lastprofile erstellt. Die Ermittlung der Lastprofile ist Grundlage der nachfolgenden Simulation der Gesamtsysteme unter realistischen Randbedingungen (siehe Jahresbilanz mit vereinfachten Modellen).

Grundlage der Klassifizierung der einzelnen Wärme-/Kältegestehungssysteme ist die in **Abbildung 3** aufgeführte Systematik der geothermischen Anwendungsbereiche. Diese Systematik teilt die in der Praxis realisierten Anlagen unter Beachtung ihres jeweiligen Anwendungsgebietes und des erreichten Temperaturniveaus in unterschiedliche Klassen ein. Unterschieden wird hierbei zwischen direkter/indirekter Nutzung der Wärmequelle/-senke, dem Wärmeträgermedium im Gebäude (Luft/Wasser), der Nutzungsart der Endenergie (Heiz-/Kühlnutzung) und dem erreichten Temperaturniveau im Anwendungsfall.

Einige der zahlreichen Nutzungsmöglichkeiten der geothermischen Energie in Baden-Württemberg sind z.B. Gebäudeheizung und -kühlung, Warmwasserbereitung, Thermalbäder / Balneologie, Stromerzeugung, landwirtschaftliche Anwendungen (Gewächshäuser, Pilzzucht, Tierzucht, Trocknung etc.) sowie die Kälteerzeugung in der Nahrungsmittelindustrie.

Analysiert man den Kühlenergiebedarf der unterschiedlichen Branchen in Deutschland, dann fällt auf, dass der Nahrungsmittelsektor den bei Weitem größten Kälteverbraucher bildet (**Abbildung 2**).

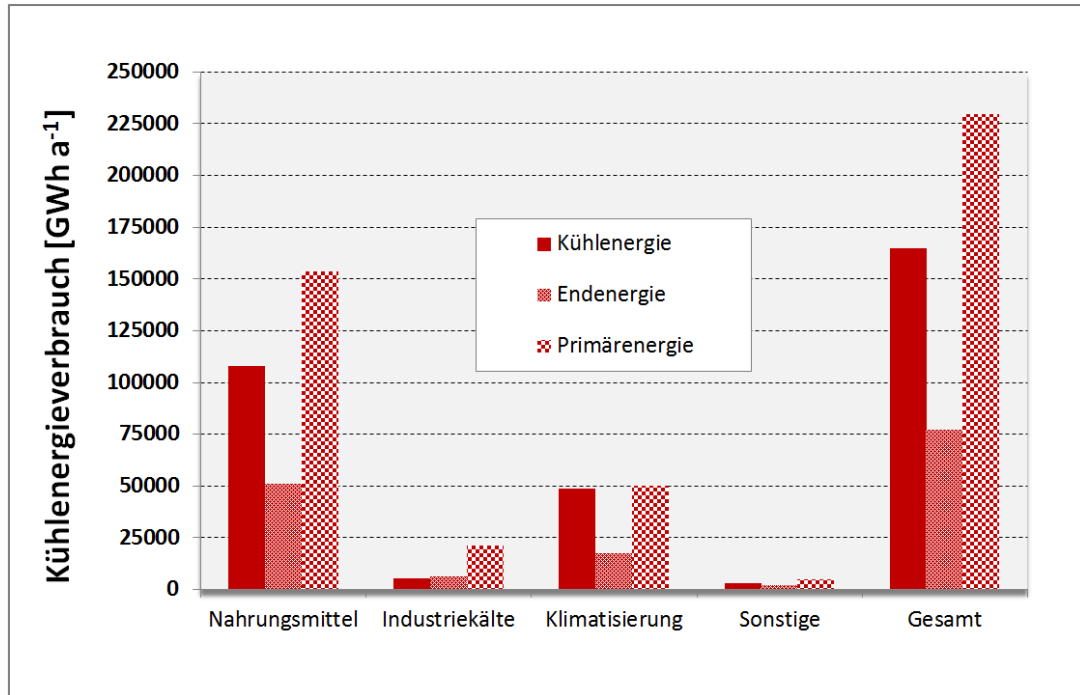


Abbildung 2: Kühlenergieverbrauch verschiedener Branchen in Deutschland in GWh/a

Die Nahrungsmittelindustrie benötigt bezogen auf den Primärenergiebedarf ca. 70 % der deutschen Kälteerzeugung, gefolgt von der Gebäudeklimatisierung mit 15 % und der Industrie mit 9 %. Daher wurde der Fokus in diesem Forschungsprojekt auf die Untersuchung von Geothermienutzung in Bürogebäuden und Lebensmittel-Einzelhandel gelegt.

In **Abbildung 3** sind die verschiedenen Anwendungen von Erdwärmesonden im Gebäudebereich dargestellt. Die Anwendungsformen unterscheiden sich durch die Art der Nutzung der Wärmequelle/-senke, des Trägermediums im Gebäude und der genutzten Endenergie. Bisher wurde die indirekte Erdwärmennutzung mit elektrisch betriebenen Wärmepumpen für die Gebäudenutzungen Büro und Lebensmittel-Einzelhandel untersucht, die im Folgenden vorgestellt werden.

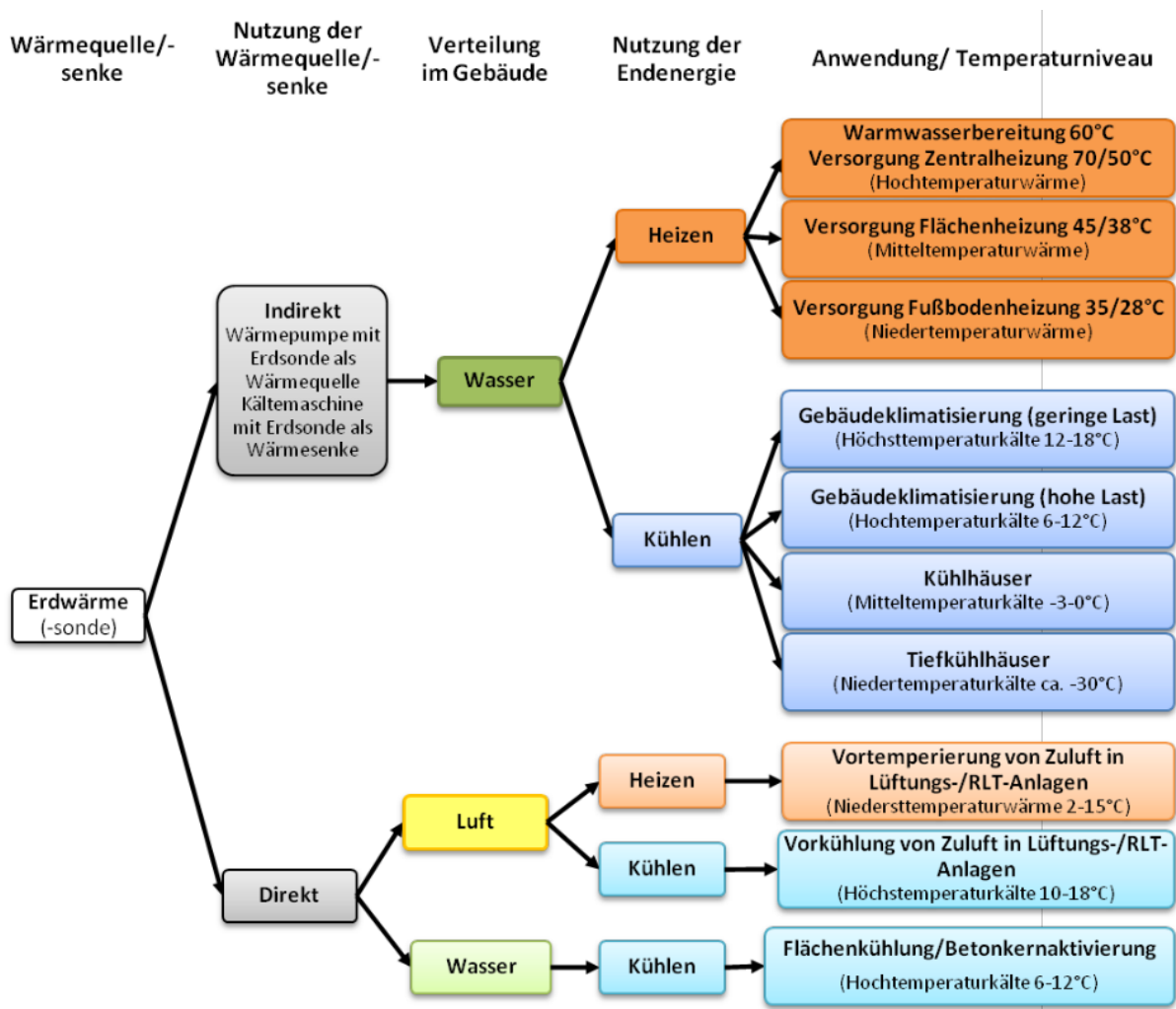


Abbildung 3: Nutzung von Erdsonden für unterschiedliche Anwendungen

Bürogebäude

Im Bürobau besteht ein hohes Potenzial an Energieeinsparungen wie in **Abbildung 4** erkennbar ist. Während der Durchschnitt der heutzutage gebauten Bürogebäude noch einen Primärenergieverbrauch von 235 kWh/(m² BGF a) aufweist, liegt der Primärenergiebedarf für Passiv-Bürogebäude bei 67 kWh/(m² BGF a).

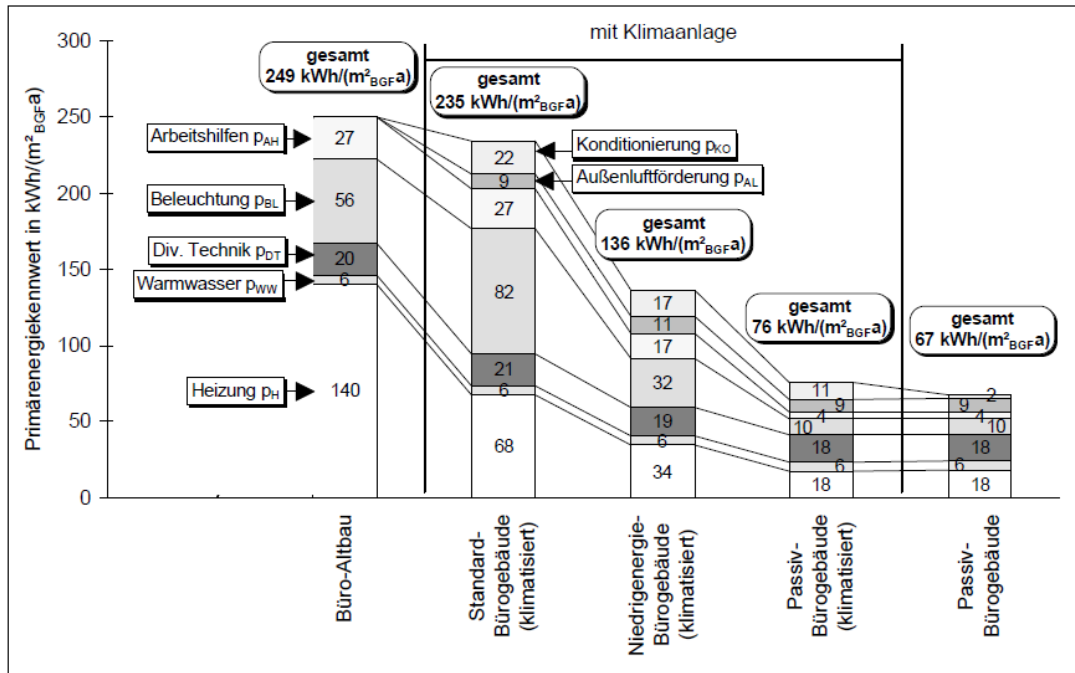


Abbildung 4: Primärenergiebedarf von verschiedenen Bürogebäuden Kn1999 [24]

Der Primärenergiebedarf ist abhängig von den Primärenergiefaktoren, der für Strom in Abhängigkeit des Alters der jeweiligen Studie von 2,6 bis 3,0 variiert. Dieser Faktor ist ein Indikator für den Bedarf an nicht erneuerbaren Ressourcen wie Erdöl, Erdgas und gilt daher als ökologischer Indikator. Entscheidender für die ökonomische Einsparung von Energie ist der Endenergiebedarf. An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass der Informationsgehalt von Studien, die lediglich auf einen Energieverbrauch hinweisen, in der Diskussion um Energieeinsparungen zu Missverständnissen führt.

In der folgenden Grafik (Abbildung 5) ist daher nochmals der Endenergiebedarf für heutige Bürogebäude nach der Energienutzungsart dargestellt [38]. Es zeigt sich, dass der Kühlbedarf ebenso wie die Beleuchtung im Vergleich zum Heizwärmebedarf eine eher untergeordnete Rolle spielen. Da in Bürogebäuden sowohl geheizt wie auch gekühlt wird, ist dieser Anwendungsfall für die Nutzung von ganzjährig betriebenen Geothermieanlagen sehr interessant.

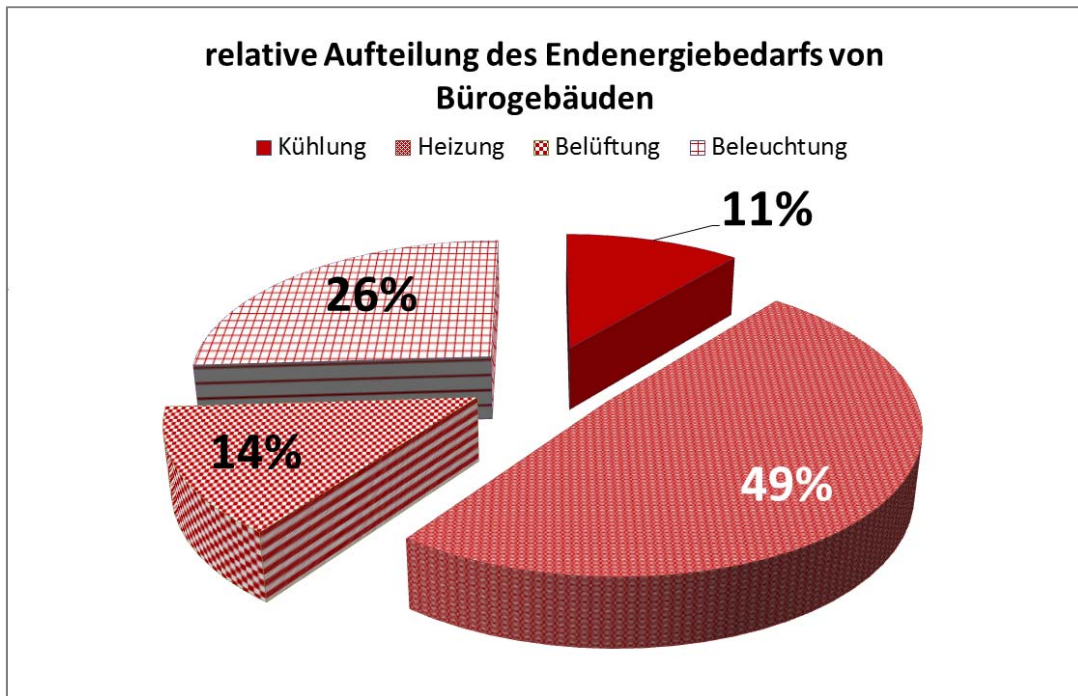


Abbildung 5: Endenergiebedarf von Bürogebäuden nach Anwendung WEB2002 [38]

Daher kam zunächst ein Bürogebäude zur Untersuchung, welches im Sommer mit Kälte bei Temperaturniveaus von 6-12 °C sowie im Winter durch Niedertemperaturwärme über eine Fußbodenheizung temperiert wird.

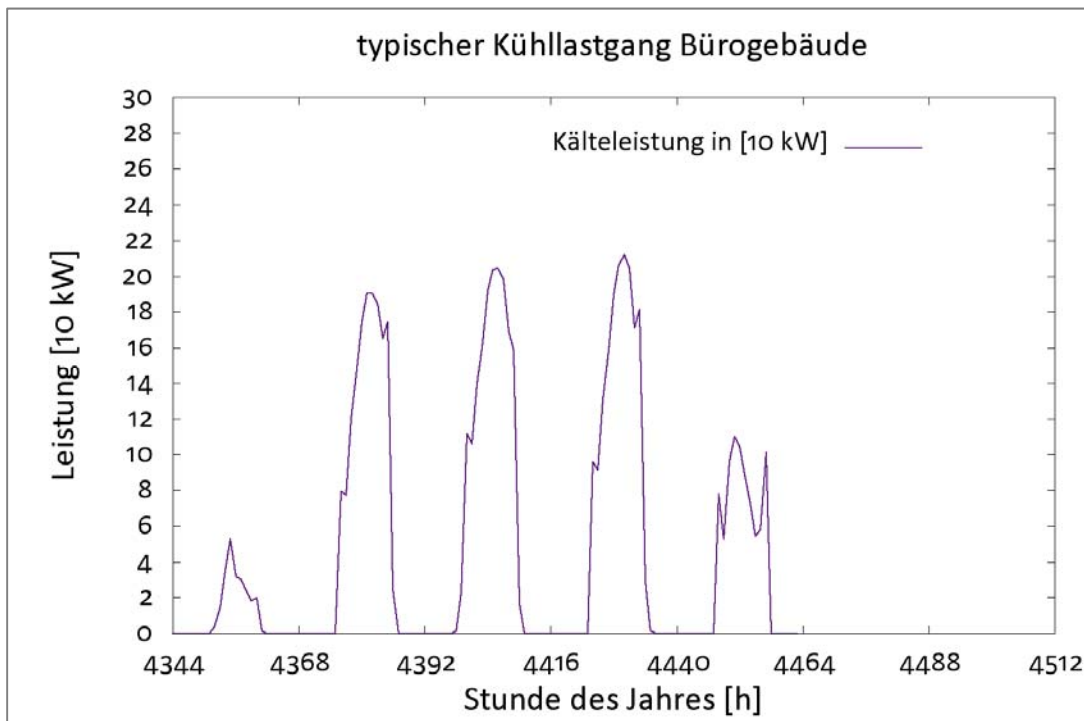


Abbildung 6: typischer Kühllastgang eines Bürogebäudes im Sommer

In **Abbildung 6** ist der Kühllastgang des Bürogebäudes für eine Woche im Sommer dargestellt. Während am Wochenende nicht gekühlt wird, ist diese an den Werktagen deutlich zu erkennen. Das Maximum ist mittags, nachts besteht kein Kühlbedarf.

Lebensmittel-Einzelhandel

Der Lebensmittel-Einzelhandel hat die Aufgabe, Nahrungsmittel an den Endkunden zu verteilen. Bezüglich der Gebäudetypologisierung bestehen verschiedene Ansätze. Nach EHI2001 [12] lassen sich sechs Kategorien voneinander unterscheiden. Aufgrund der sich überschneidenden Flächen wurden Lebensmittelselbstbedienungsläden und -märkte zusammengefasst. Daraus ergibt sich die folgende Übersicht in **Tabelle 1**, die Gebäude nach Nutzung, Fläche und dem Anteil der Lebensmittel an der Gesamtfläche unterscheidet.

Tabelle 1: Typisierung des Einzelhandels nach EHI2001 [12], RHI2008 [31], EHI2007 [13] und NET2010 [29]

Typisierung des Lebensmittel-Einzelhandels						Endenergiebedarf
Typ [EHI2001]	Beschreibung [RHI 2008]	Fläche [m ² ,EHI2001]	Anteil Lebensmittel [RHI2008]	Anzahl [EHI20 07]	Durchschnitts- größe [KRU2004]	[kWh/m ² a] [ARI2008, OLS1998]
Lebensmittelselbstbe- dienungsläden und -märkte	Kühlregale für Getränke, Lebensmittel und Eiscreme	< 400	> 90%	28900	186	728,4
Lebensmitteldiscounter	Lebensmittelgeschäft mit Konzentration auf umsatzstarke Artikel	400-800	80 - 85%	14806	439	
Supermärkte	Lebensmittelgeschäft inkl. Frischwarenverkauf, Nonfoodbereich <25%	600-1.500	>75%	8170	747	
Verbrauchermärkte	Universalgeschäft, Nonfoodbereich 30 %	1.500-5.000	30%	3150	1526	603,5
SB-Warenhäuser ("Hypermarkets")	Universalgeschäft, Nonfoodbereich 30 %	5.000-20.000	30%		3457	467,3

Es ist zu erkennen, dass die kleinen Lebensmittelselbstbedienungsläden in Deutschland mit ca. 29.000 Stück am häufigsten vorzufinden sind. Die Durchschnittsgröße und die genutzte Technologie in Form von kleinen Kühlregalen sind jedoch für die Anwendung von Geothermie aufgrund des geringen Kühlbedarfs uninteressant. Aufgrund der rückgängigen Umsätze hat sich diese Form des Einzelhandels in den letzten Jahren rückläufig entwickelt. Es fand eine Verdrängung durch Lebensmitteldiscounter statt, die sich in Zukunft weiter verschärfen wird [25].

Lebensmitteldiscounter mit einer Fläche von 400-800 m² kommen in Deutschland im Jahr 2007 mit ca. 15.000 Stück am zweithäufigsten vor. Die Anzahl hat sich von 1993 bis 2003 um 50 % erhöht, diese Marktform wird weiter wachsen [25].

Größere Handelsbauten mit einer Fläche von 600-1.500 m² werden als „Supermärkte“ bezeichnet, der Anteil der Lebensmittel beträgt mehr als 75 %. Das in dieser Studie untersuchte Gebäude zählt zu dieser Marktform. Zusammengenommen weisen die kleineren Handelsbauten bis 1.500 m² einen hohen spezifischen Endenergiebedarf von 730 kWh/m².a auf.

Handelsgebäude mit einer Fläche von 1500 m² bis 5000 m² werden als Verbrauchermärkte klassifiziert. Dabei liegt der Anteil der Lebensmittel an der Gesamtfläche nur noch bei ca. 30 %. Dies wirkt sich auch auf den spezifischen Endenergiebedarf aus. Da weniger Kühlung notwendig ist, beträgt dieser ca. 600 kWh/m².a.

Größere Handelsbauten mit einer Verkaufsfläche über 5.000 m² werden als SB-Warenhäuser oder im englischen als „Hypermarkets“ bezeichnet, der Anteil der Lebensmittel an der Gesamtfläche ist mit ca. 30 % geringer. Da in den Non-Food-Bereichen keine Produktkühlung notwendig ist, und aufgrund von Skaleneffekten liegt der Endenergiebedarf bei ca. 470 kWh/m².a.

Der Trend geht in der Lebensmittelbranche dahin, dass sich der Anteil der gekühlten Fläche an der Verkaufsfläche von aktuell 15-20 % weiter erhöht, was zu einem höheren Kühlbedarf führen wird. Dies liegt daran, dass der Anteil an „convenience food“, „chilled food“ und „frozen food“ weiter ansteigen wird. Bereits heute ist der Anteil der Kühlung am Endenergiebedarf von Lebensmittelgeschäften mit 38-53 % sehr hoch. Danach folgen der Bedarf für Beleuchtung mit 14 - 27 % sowie der Anteil für die Klimatisierung mit 6-21 % (siehe **Abbildung 7**).

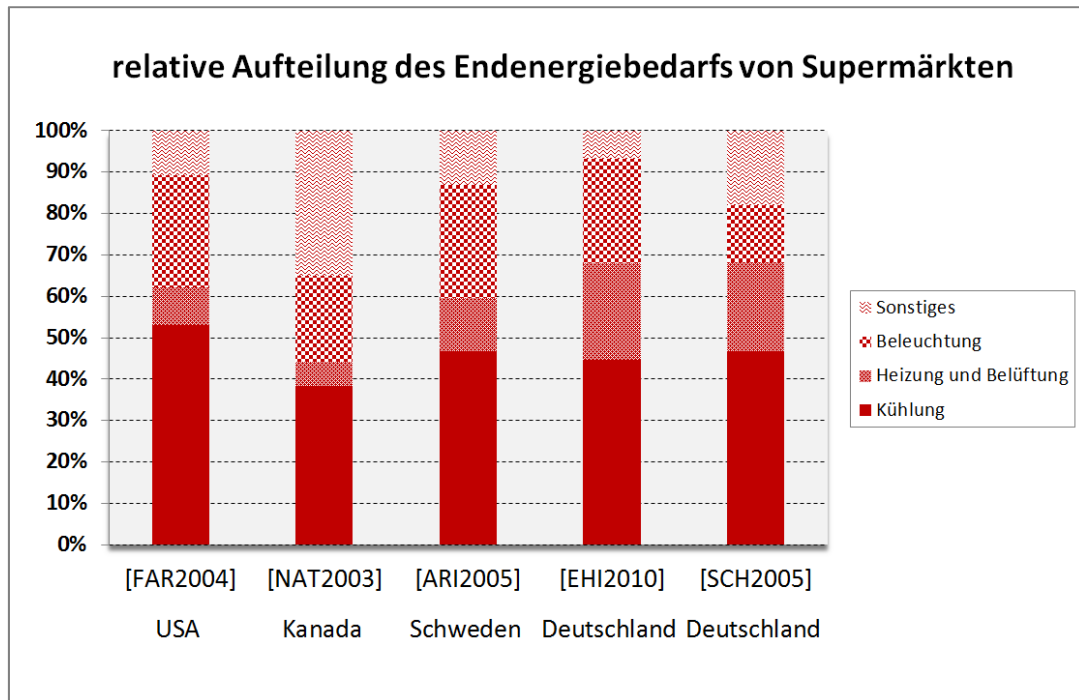


Abbildung 7: Aufteilung des Endenergiebedarfs von Supermärkten verschiedener Länder [2], [14], [20], [33]

Ein typischer Lastgang eines Supermarkts ist in **Abbildung 8** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es eine Grundlast gibt, die bei ca. 60 kW liegt. Die Grundlast besteht aus dem Betreiben der Tiefkühlmöbel und -räume sowie Belüftung und dem Betreiben sonstiger Geräte wie Pumpen und Kondensatoren. Wenn der Supermarkt morgens öffnet, steigt die Stromlast aufgrund der Beheizung und der Beleuchtung auf ca. 240 kW an und bleibt konstant, bis der Supermarkt abends um 20 h geschlossen wird. Es ist zu erkennen, dass die Last langsam wieder auf das Grundlastniveau absinkt.

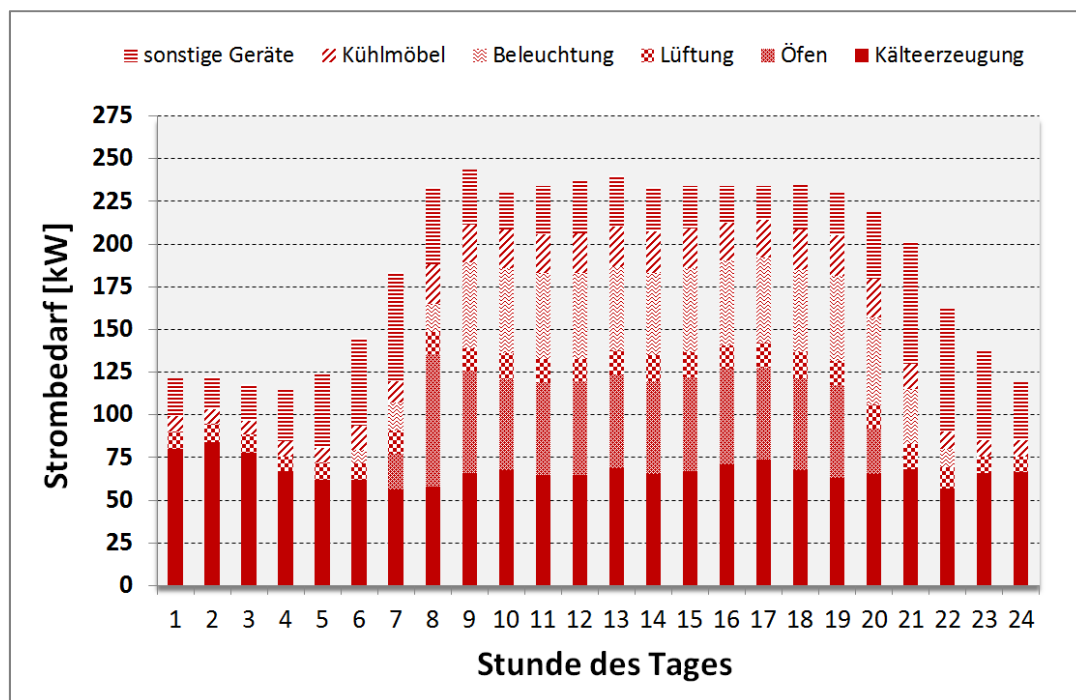


Abbildung 8: Strombedarf eines Supermarkts SCH2005 [33]

Durch die Verlängerung der Öffnungszeiten wird sich die Spitzenlast weiter in den Abend schieben. Dies führt dazu, dass der spezifische Energiebedarf sich weiter erhöht, da die Klimatisierung länger laufen muss und die Kühlmöbel in vielen Lebensmittelgeschäften nicht abgedeckt werden können. Dies ist auch gesamtenergetisch kritisch, da der Peak der Energienachfrage mittags um 12 h sowie abends um 19-20 h ist und sich durch die verlängerten Öffnungszeiten die Spitzenlast erhöht.

Betrachtet man nur die Eigentumsverhältnisse im deutschen Einzelhandel, so könnte sich dies vorteilhaft für eine erhöhte Energieeffizienz auswirken. Eine stetige Konzentration der Lebensmitteleinzelhandelsgeschäfte auf die großen Einzelhandelsketten hat dazu geführt, dass nun ca. 90 % der Geschäfte des Lebensmittel-EH durch sechs Einzelhandelsketten betrieben werden (Edeka-Gruppe, Metro-Gruppe, REWE-Gruppe, Schwarz-Gruppe, Aldi-Gruppe und Tengelmann-Gruppe) [8]. Durch ein von der Unternehmensführung zentral vorgegebenes Lastmanagement bzw. Energiemanagement könnte damit der Zugang auf den Großteil der Einzelhandelsgebäude gelingen.

Da sich Deutschland verpflichtet hat, die CO₂-Emissionen zu reduzieren, müssen Wege gefunden werden, wie die Kälte in der Nahrungsmittelbranche künftig effizienter oder erneuerbar bereitgestellt wird. Eine Möglichkeit stellt die Nutzung von Erdwärmesonden dar, die im Folgenden untersucht wird.

7.1.2 Jahresbilanzen mit vereinfachten Modellen

Mit den im Arbeitspaket 1.1. Nutzungsanforderungen und Lastprofile ermittelten Kenndaten der geothermischen Anlagen werden die Randbedingungen der unterschiedlichen Systeme simuliert. Der dynamische Lastverlauf und das Langzeitverhalten der Sondenfelder kann anhand der in der Simulation gewonnenen Ergebnisse abgeschätzt werden. Insbesondere die zu erwartenden langfristigen Entzugsleistungen können mit den Jahresbilanzen ermittelt und gemessenen Werten gegenübergestellt werden. Aus den Ergebnissen der Simulation ergeben sich charakteristische Kennlinienfelder bei unterschiedlichen Temperaturreandbedingungen.

Die Simulation der Lastwechsel erfolgt über Anpassung der Massenströme durch die Sonden bzw. der Anpassung der Vorlauftemperaturen, die von der Wärmepumpe/Flächenkühlung an die Sonde und damit ans Erdreich übertragen wird. Die zu erwartenden Entzugsleistungen und das sich langfristig einstellende Temperaturniveau im Erdreich kann somit unter Berücksichtigung der Bodenleitfähigkeit berechnet werden. Zum Einsatz kommt hierzu eine numerische Simulationssoftware, die den Energiefluss in allen drei Raumrichtungen bilanziert, und so die Energieströme in drei Dimensionen abbildet. Einflüsse zwischen den einzelnen Schichten der Sonde sowie Kurzschlusswärmeströme in den Sonden (zwischen Vorlauf und Rücklauf der U-Rohrleitung) werden ebenfalls berücksichtigt. Aussagen über die energetische Nachhaltigkeit bei der Nutzung des Untergrunds als Wärmequelle/-senke können von den Simulationsergebnissen abgeleitet werden.

Es wurden mit dem ganzjährigen Heiz- und Kühllastdatensatz eines Bürogebäudes vergleichende Simulationen erstellt, die Aufschluss über Effektivität und Effizienz von geothermisch rückgekühlten Kompressionskältemaschinen (KKM) geben. Hierzu werden drei unterschiedliche Simulationsmodelle untersucht. Verglichen wird die Leistung eines geothermischen Rückkühlwerks mit der eines trockenen bzw. nassen Kühlturms. Es wird eine handelsübliche, wassergekühlte Kompressionskältemaschine, die über die temperaturabhängige Leistungszahl im Modell hinterlegt ist, simuliert. Gebäudeseitig wird für den Kältekreis eine gängige Spreizung von 6/12 °C angenommen, sodass die mittleren Verdampfertemperaturen bei 9 °C liegen. Die Rückkühlung des Kondensators erfolgt auf Wasserbasis bei einer Spreizung von 32/27 °C für den Rückkühlkreislauf.

Die Randbedingungen der Simulation, explizit die Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchte, werden gemeinsam mit der stündlich anfallenden Heiz-/Kühllast aus einem entsprechenden Datensatz in das Modell eingelesen. Unter Annahme einer mittleren Verdampfertemperatur von 9 °C und einer konstanten Spreizung von 5 K, sind alle drei Varianten auf die maximale Kältelast von 120 kW ausgelegt. Die erforderliche Kühlleistung der trockenen Rückkühlung ist bei Umgebungstemperaturen bis 20 °C gegeben. Höher liegende

Umgebungstemperaturen führen zu einer Anhebung der Rücklauf­temperatur des Rückkühl­kreislau­fs und somit zu einer Verschlechterung der Energy-efficiency-ratio (EER) der Kälte­maschine. Tiefer liegende Umgebungstemperaturen hingegen verbessern die EER der Kälte­maschine.

Der Zielpunkt der nassen Rückkühlung liegt 5 K über der jeweiligen Feuchtkugeltemperatur, die als Funktion von Umgebungstemperatur und relativer Feuchte darstellbar ist.

Die ungestörte Erdreichtemperatur für das verwendete Sondenfeld (drei Sonden à 80 m mit 50 W/m spezifischer Entzugsleistung) wird mit 10 °C simuliert.

Die Differenz zwischen der mittleren Temperatur des Rückkühlkreislau­fes und der mittleren Verdampfertemperatur zum Zeitpunkt t_n ergibt die Ordinate, anhand der aus dem EER/ ΔT -Diagramm der Leistungspunkt der Kälte­maschine für den Zeitpunkt t_{n+1} ermittelt wird (**Abbildung 15**).

Der aktuelle Betriebspunkt der Kälte­maschine hinkt somit einen Zeitschritt nach, was jedoch bei kurzen Zeitschrittweiten (Stundenwerten) hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

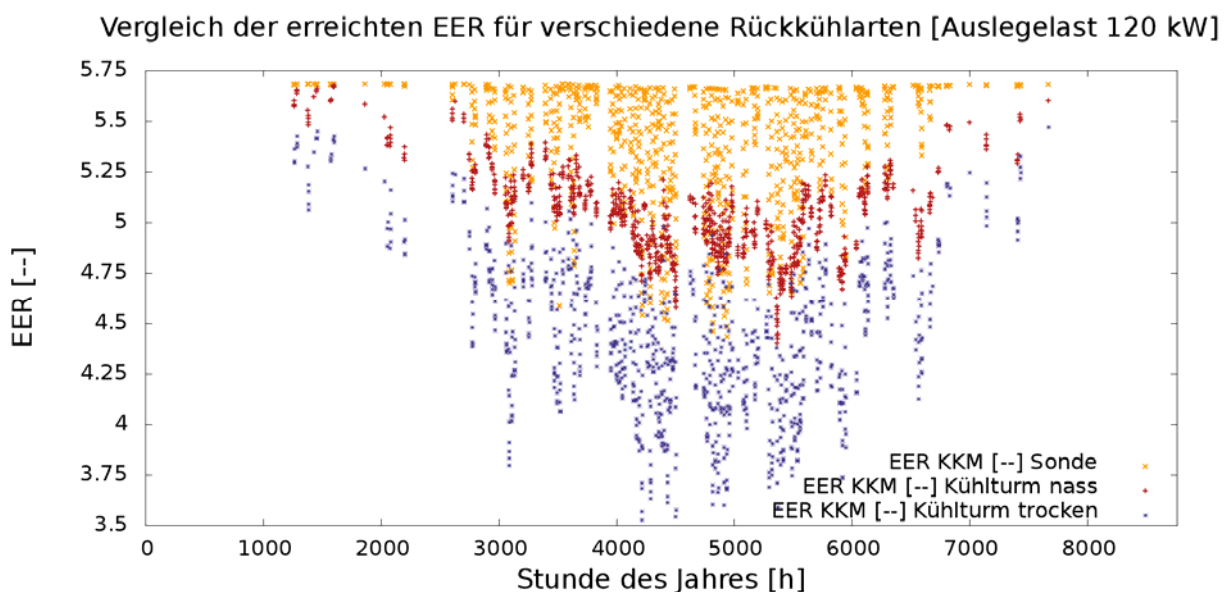


Abbildung 9: Vergleich der erreichten EER verschiedener Rückkühlarten

In der **Abbildung 9** sind die EER der drei untersuchten Rückkühlvarianten über der Zeit aufgetragen. Der Simulationszeitraum umfasst ein Jahr. Die Variante trockener/nasser Kühlturm ist immer dann effektiver als die geothermisch erfolgte Rückkühlung, wenn die Umgebungstemperatur bzw. Feuchtkugeltemperatur tiefer als die ungestörte Erdreichtemperatur von 10 °C liegt. Der Vorteil einer von der Umgebungs-/Feuchtkugeltemperatur entkoppelten Wärmesenke kommt vor allem in den Sommermonaten mit der Hauptkühl­last zum Tragen. Hier erreicht die geothermisch rückgekühlte KKM signifikant höhere EER. Die Rückkühlung

über den nassen Kühlturm erweist sich als zweitbeste Variante, der trockene Kühlturm erbringt hier die schlechtesten Ergebnisse.

Zusätzlich zu den zuvor besprochenen Kühlvarianten wird die Rückkühlung über das Sondenfeld ganzjährig simuliert. Untersucht werden hierbei die Varianten:

1. Nutzung der Sonden ausschließlich zur Kühlung (rein als Wärmesenke)
2. Nutzung der Sonden ausschließlich zur Beheizung (rein als Wärmequelle)
3. Nutzung der Sonden zum kombinierten Betrieb Kühlung/Beheizung

In der **Abbildung 10** bis **Abbildung 12** sind die Werte der Kühl- bzw. Heizlasten als rote Linien markiert, wobei der jeweilige Betrag der Last dargestellt ist, sprich Heizlasten werden in der Darstellung wie Kühllasten mit positiven Werten abgebildet. Die Rücklauftemperatur des Sondenfeldes ist als gelbe Markierung dargestellt und der erreichte EER der Kompressionskältemaschine, der an der Sekundärachse notiert ist, violett. Die Rücklauftemperatur der Sonden liegt zwischen 10 °C (geringe Last) und knapp 30 °C (hohe Last) und leistet somit gerade in der heißen Jahreszeit eine ausreichende Rückkühlung der KKM. Bisher nicht im Modell berücksichtigt ist die Möglichkeit der direkten Kühlung (ohne KKM) durch das Sondenfeld bei geringen Lasten im Frühjahr oder Herbst.

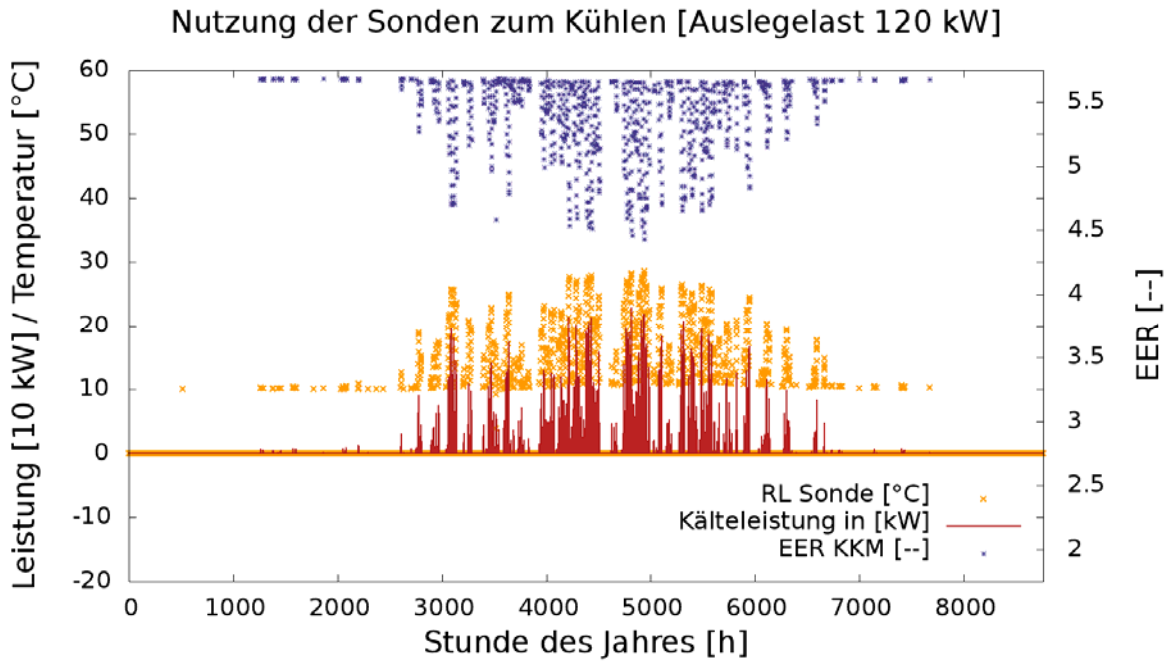


Abbildung 10: Nutzung des Sondenfeldes zur Kühlung

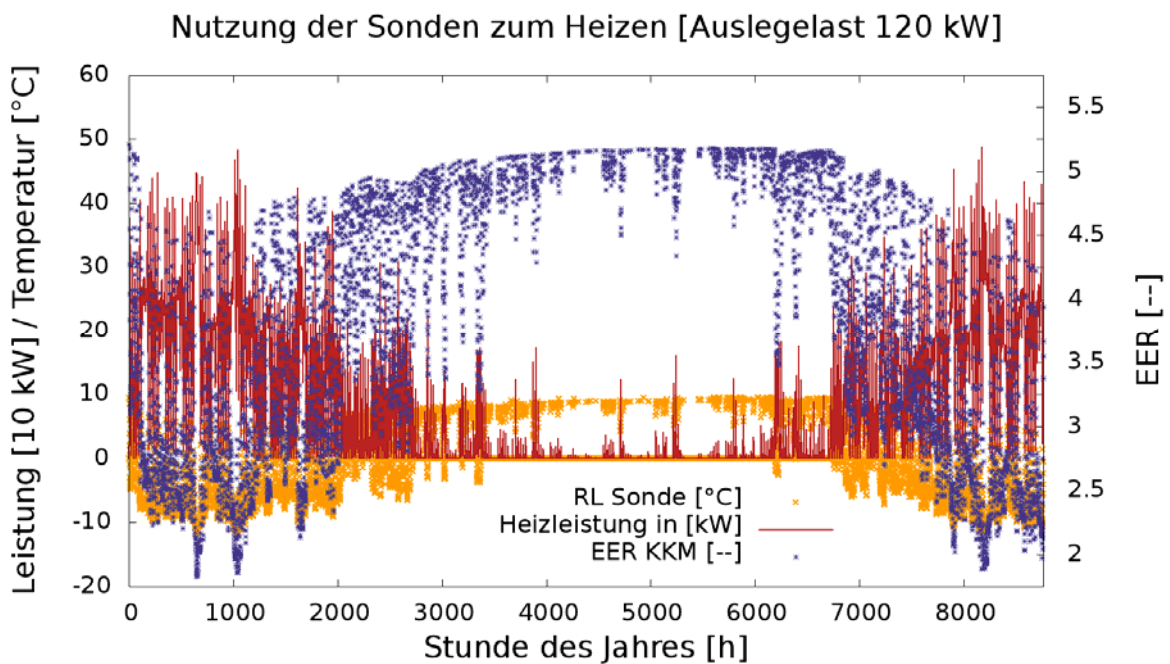


Abbildung 11: Nutzung des Sondenfeldes zur Beheizung

Die **Abbildung 11** zeigt die erreichten EER für die ganzjährige Nutzung des Untergrundes als Wärmequelle, wobei die Farbgebung analog zum vorangehenden Schaubild gewählt wurde. Um im Winter das Erdreich als Niedertemperaturquelle zu nutzen, muss die Vorlauftemperatur des Wärmeträgerfluids möglichst tief liegen. Als Wärmeträgerfluid werden meist Wasser-

Glykol-Gemische, die Vorlauftemperaturen von -3 °C erlauben, verwendet. Bei der genannten Vorlauftemperatur von -3 °C und den üblichen Verfülldicken/-materialien des Bohrkerns stellt sich ein Temperaturgradient ein, bei dem Vereisungen rund um den Sondenkern ausgeschlossen sind.

Tiefer liegende Vorlauftemperaturen kommen in der getätigten Simulation aufgrund der Ungleichverteilung der Heiz-/Kühllast zustande (die Heizlast übersteigt die Kühllast um das Zweifache). Simuliert wurde der Heiz- wie der Kühlfall mit einer festen Spreizung von 5 K zwischen Sondenvorlauf bzw. Rücklauftemperatur. Um aus einem unterdimensionierten Sondenfeld, da auf die Kühllast ausgelegt, die nötige Energie zur Beheizung zu entziehen, werden die im Diagramm 4 dargestellten Vorlauftemperaturen von bis zu -15 °C nötig. Diese Betriebszustände sind aus den oben genannten Gründen als rein theoretische Werte anzusehen und bilden die Grundlage einer Auslegung auf normale Betriebsbedingungen.

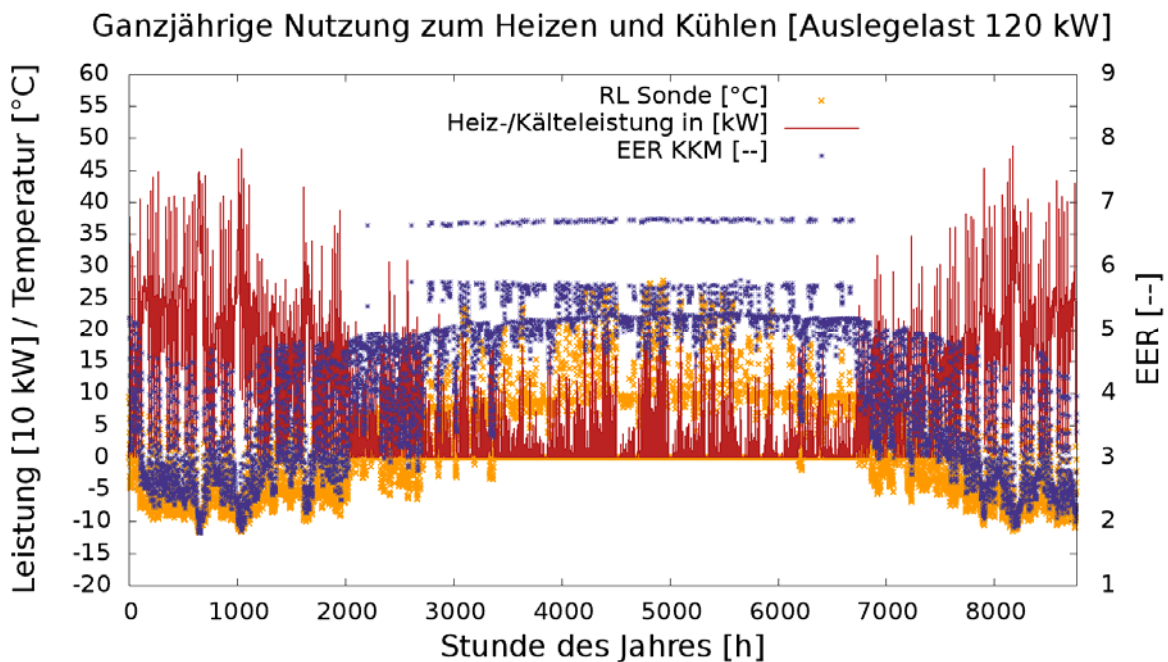


Abbildung 12: Ganzjährige Nutzung des Sondenfeldes für Heizen und Kühlen

In einem weiteren Modell wurde die ganzjährige Nutzung des Untergrunds zur Kühl-/und Heizanwendung errechnet. Die zu erwartende Erhöhung der Entzugsleistung im Heiz- wie Kühlfall ist aus **Abbildung 12** nicht ohne Weiteres ersichtlich. Die **Abbildung 13**, bei der die erreichten EER der Varianten über der Zeit geplottet werden, erweist sich für die Beurteilung als zweckmäßiger. Der Anwendungsfall reines Kühlen ist hier in Gelb, reines Heizen in Rot und die Kombination beider Lasten in Violett dargestellt. Die Verbesserung des EER der KKM bei der Modellvariante Kühlen und Heizen zu den beiden anderen Anwendungen liegt nur im Bereich weniger Zehntel, dennoch ist eine Verbesserung bereits im ersten Jahr zu

erkennen. Die Auswirkungen auf die Langzeitstabilität des Temperaturniveaus im Erdreich beim reinen Kühlen/Heizen kommen bei der einjährigen Simulation nicht zum Tragen. Eine Simulation über mehrere Jahre, die eine driftende Erdreichtemperatur erfasst, würde den beschriebenen Effekt deutlicher erkennbar machen.

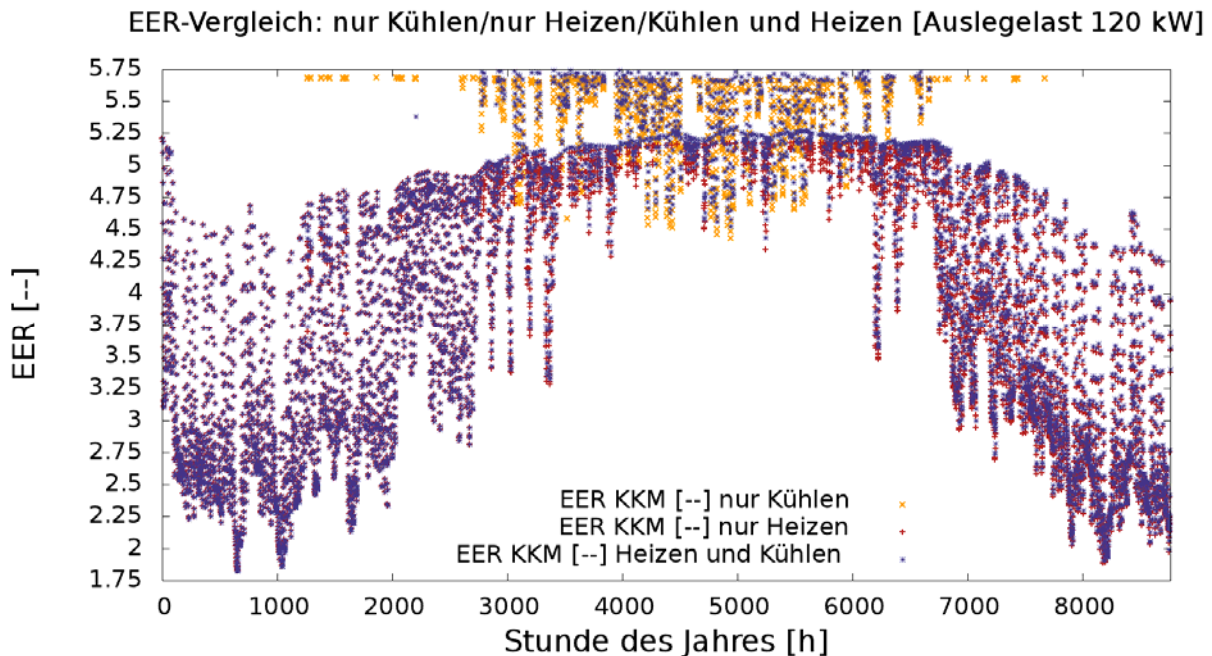


Abbildung 13 EER-Vergleich der Varianten Kühlung, Beheizung und Verbundanlage

Der **Abbildung 14** können die Rücklauftemperaturen der untersuchten drei Kühlanwendungen (Sondenfeld, trockener Kühlturm, nasser Kühlturm) entnommen werden. Der Temperaturunterschied der geothermischen Rückkühlung zu den anderen Varianten beträgt in den Sommermonaten bis zu 10 K.

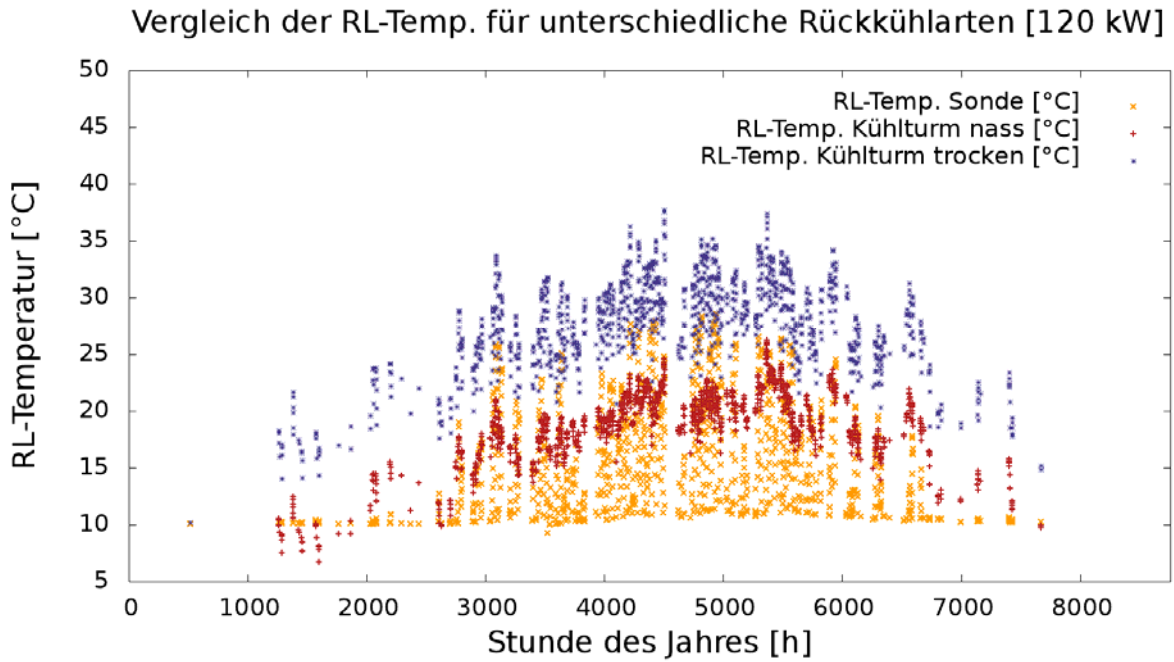


Abbildung 14 Vergleich der Rücklauftemperaturen unterschiedlicher Rückkühlarten

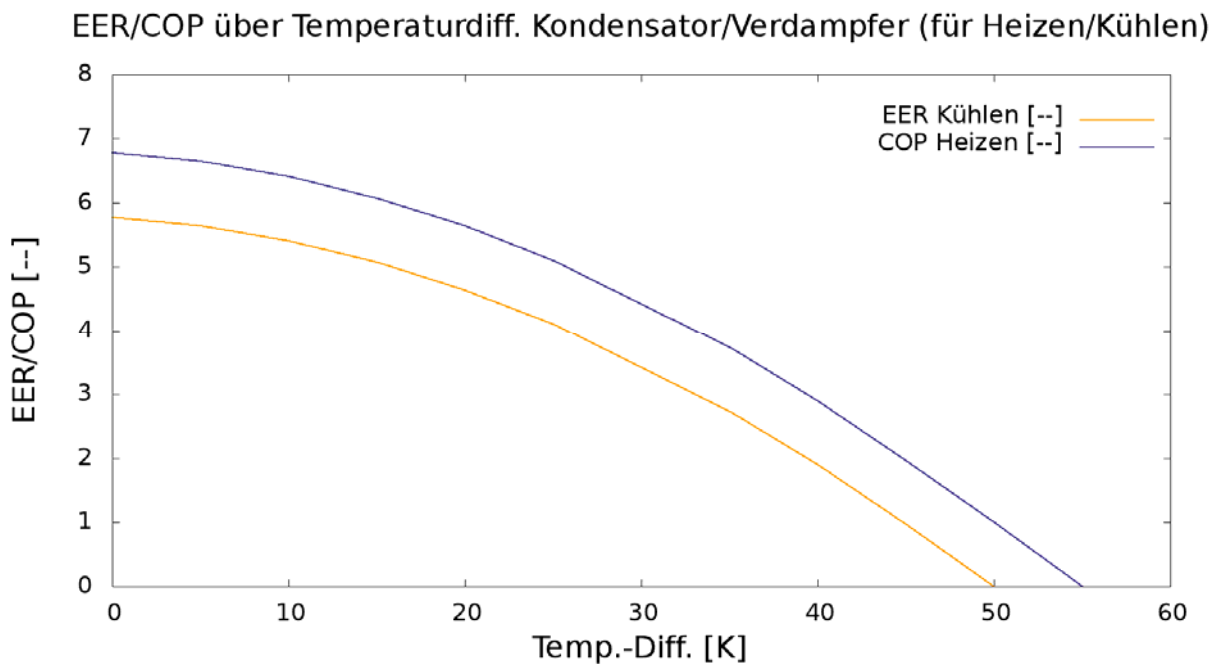


Abbildung 15 Verwendeter EER/COP Kühlen/Heizen

In **Abbildung 15** ist der EER/COP der Kompressionskältemaschine für den Kühl- bzw. Heizfall dargestellt. Der erreichte EER ist in diesem Schaubild über der Temperaturdifferenz zwischen Kondensator und Verdampfer aufgetragen. Für den Kühlfall wird der EER aus Daten-

blättern des Herstellers gefittet, während für den Heizbetrieb der COP um eine Einheit höher als der EER im Kühlbetrieb angenommen wird.

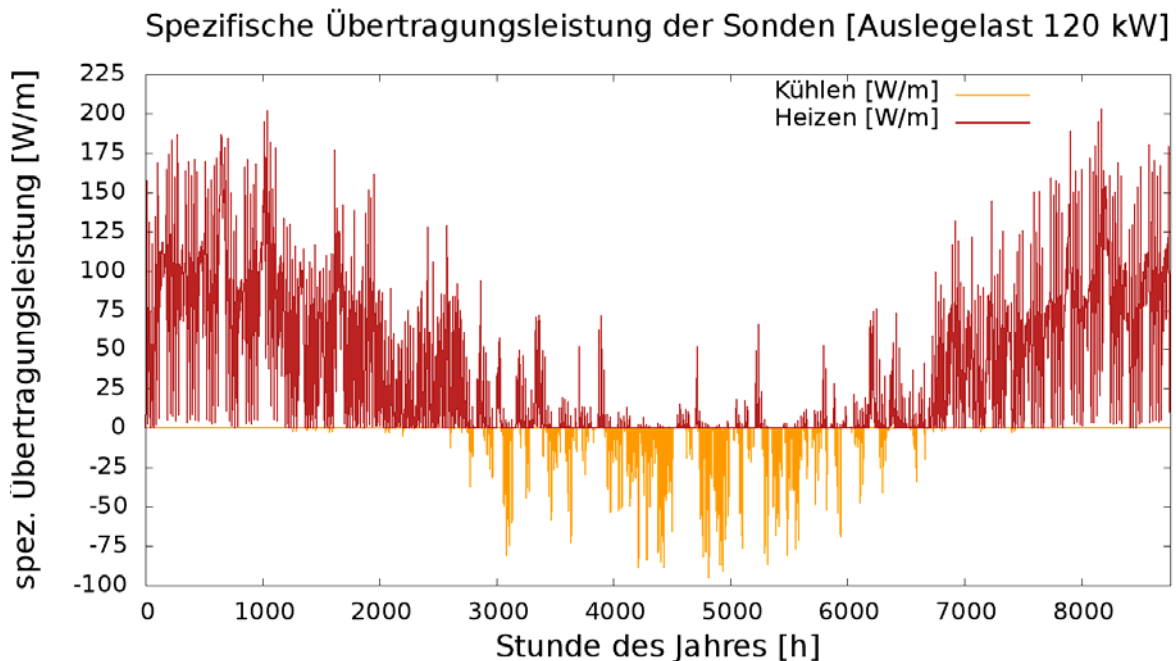


Abbildung 16 Spezifische Übertragungsleistung [W/(m)] – Kühlen/Heizen

Abbildung 16 zeigt die spezifischen Übertragungsleistungen pro Meter Sonde für den Heiz- bzw. Kühlfall. Die Auslegung von Sondenfeldern ist je nach anstehendem Untergrund verschieden, als Richtwert gelten jedoch 50 W/m Sondenlänge (VDI 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigung, Umweltaspekte“). Dieser Wert wird bei der Kühllastabführung gut erreicht, während die spezifischen Übertragungsleistungen für den Heizfall viel zu hoch liegen.

7.1.3 Bewertung der verschiedenen Systeme

Die Jahresbilanzen werden zur Bewertung der untersuchten Systemvarianten verwendet. Hierbei werden einerseits energetische Aspekte untersucht, wie die Erreichbarkeit günstiger Arbeitszahlen der verwendeten Wärmepumpen und die damit verbundene effiziente Verwendung wertvoller elektrischer Hilfsenergie, andererseits sollen Fragen zur Wirtschaftlichkeit der Systeme geklärt werden.

Die Jahresbilanzen ermöglichen es die unterschiedlichen Systeme hinsichtlich der energetischen Kenngrößen transparent zu machen. Aus den Leistungswerten der Anlagen und den Kosten für die Hilfsenergien (Strom/Gas) können die Wärme-/Kälteentstehungskosten pro

bereitgestellter kWh Wärme/Kälte berechnet werden. Dadurch werden unterschiedliche Anlagenkonzepte wirtschaftlich vergleichbar.

Durch Messungen der Erdreichtemperatur ist bekannt, dass sich der Untergrund bei ausschließlichem Wärmepumpenbetrieb deutlich abkühlt, bzw. bei Nutzung des Sondenfeldes als Wärmesenke stark erwärmt, sodass die zur Wärmeübertragung notwendige Temperaturdifferenz zwischen Erdreich und Wärmeträgerfluid nicht mehr gegeben ist. Bei jahreszeitlich abhängiger Nutzung des Untergrundes als Wärmequelle im Winter bzw. als Wärmesenke im Sommer können die zuvor beschriebenen Effekte kompensiert werden.

Abbildung 17 zeigt die aufsummierten Seasonal-Energy-Efficiency-Ratios (SEER) sowie den auf das Jahr bezogenen EER (Spalte 13) für die Varianten 1-3 (reines Kühlen).

In den kalten Jahreszeiten liegt der EER der KKM mit nasser Kühlturmanbindung gleich hoch wie die mit der Sondenrückkühlung erreichten Werte. Gleichzeitig ist die Kühllast des Gebäudes jedoch gering, sodass sich dieser Vorteil der Kühlturmvariante in der Bilanz über ein Jahr (EER) nicht niederschlägt (vgl. **Abbildung 13**). Die geothermisch rückgekühlte Anlagenvariante erreicht ganzjährig vergleichbare oder höher liegende SEERs als die Kühlturmvarianten, was sich bei der Gegenüberstellung der EER der Varianten ebenfalls niederschlägt. Die Rückkühlung über Sonden erreicht eine EER von 5.2, die Variante trockener Kühlturm 4.2 und die des nassen Kühlturms 5.0.

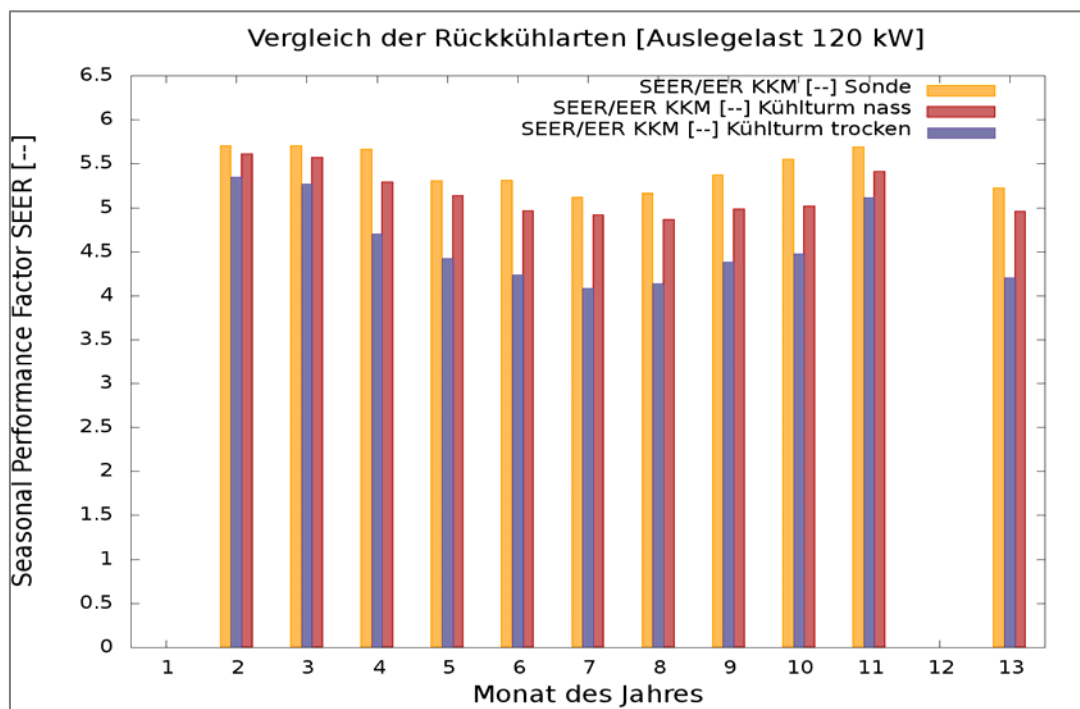


Abbildung 17: Vergleich der Rückkühlarten

Tabelle 2: Übersicht die EER/des COP für die Anwendungsfälle, nur Heizen, nur Kühlen und den Kombibetrieb (Heizen & Kühlen)

	EER/COP	
	Heizen	Kühlen
1) nur Heizen	2.83	--
2) nur Kühlen	--	5.22
3) Heizen & Kühlen	2.84	5.35

Vergleicht man die verschiedenen Betriebsarten des Sondenfeldes, wie „nur Kühlen“, „nur Heizen“ oder „Heizen und Kühlen“ untereinander, ergeben sich die in **Abbildung 13** dargestellten Werte. Da das Sondenfeld auf den Kühlfall ausgelegt und im Heizfall deutlich unterdimensioniert ist (Faktor 3 zwischen Kühl-/Heizlast), sind die feststellbaren Unterschiede zwischen den Varianten bei der Kühlanwendung am größten (Verbesserung des EER um 0.13), während die Verbesserung des COP in der Heizanwendung mit einem Hundertstel ohne praktische Bedeutung ist.

Detailliertere Simulationen, die den Fokus nicht ausschließlich auf die erzielbaren Rücklauftemperaturen der Sondenanlage haben, sondern auch die Bodentemperatur mit berücksichtigen, wurden im weiteren Projektverlauf durchgeführt. Im Folgenden sollen Simulationseingangsdaten wie -ergebnisse kurz dargestellt werden.

Basierend auf dem realen Lastgang eines Bürogebäudes wurden verschiedene Szenarien gerechnet. Zuerst wird ein Lastgang untersucht, bei dem der Wärmeentzug gleich dem Wärmeeintrag über ein Jahr ist (symmetrisch). Im zweiten Szenario wird ein Lastgang untersucht, bei dem die Spitzenlast von Heizen und Kühlen gleich sind und im dritten Szenario wird ein Lastgang analysiert, bei dem die Spitzenlasten unterschiedlich sind und ein asymmetrischer Wärmetransfer stattfindet.

Um den Einfluss des Lastgangs auf die Bodentemperatur in Sondernähe zu untersuchen, wurde mit einem synthetischen Lastgang, der in der Summe dem realen Energieeintrag des gewählten Bürogebäudes entspricht, simuliert. Dieser besitzt bei konstantem Energieeintrag eine konstante Lastverteilung.

7.1.3.1 Vergleich von Lastgängen mit gleichem Energieeintrag für Heizen und Kühlen

Bei diesem Szenario sind die Flächen unter der blauen Linie, also dem Kühlbedarf, und der roten Linie, also dem Heizbedarf, identisch. Für den synthetischen Lastverlauf für Heizen und Kühlen (orange und violette Linie) gilt dasselbe, jedoch ist die Spitzenlast für Heizen und Kühlen unterschiedlich (**Abbildung 18**).

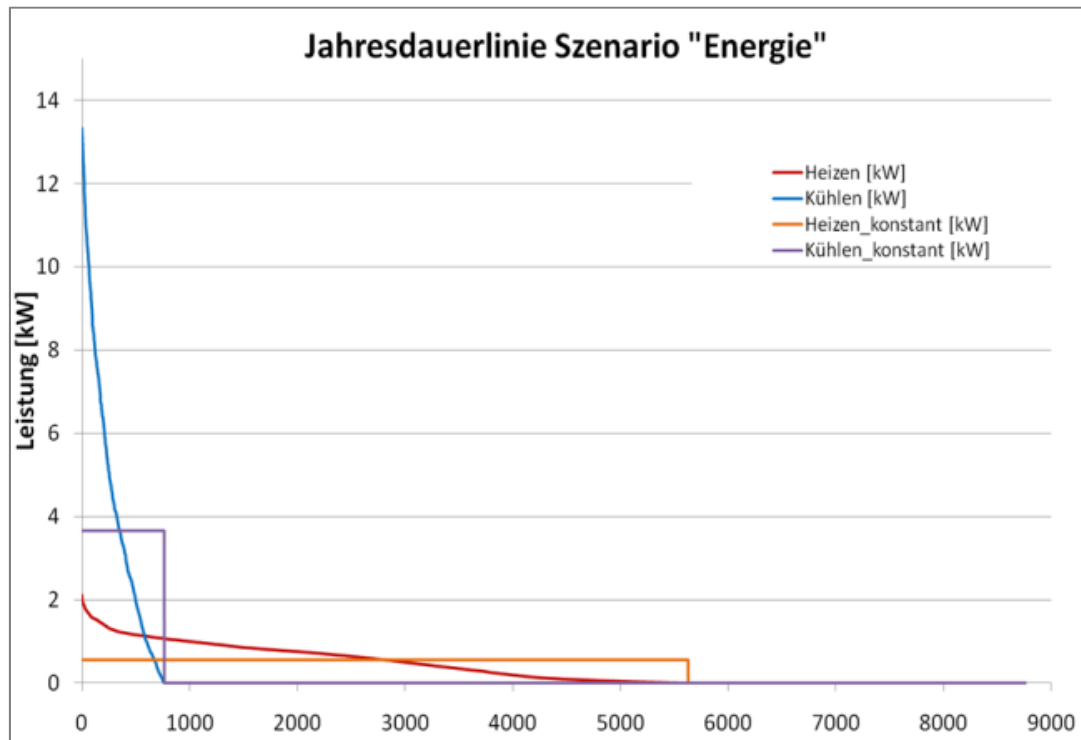


Abbildung 18: Jahresdauerlinie Szenario "Energie" für 1 Jahr

Vergleicht man die erreichten Erdreichtemperaturen in ca. 40 Zentimetern Abstand zur Sonde beider Varianten, so ergeben sich nur geringe Temperaturunterschiede zwischen beiden Simulationen. In **Abbildung 18** ist dies zu erkennen. Die Temperaturdifferenz zur ungestörten Erdreichtemperatur beträgt bei beiden Varianten unterhalb von 20 Metern Tiefe im Sommer 0,4 Kelvin und im Winter 0,3 Kelvin.

Dies ist auf die ausgeglichene Energiebilanz dieser beiden Varianten zurückzuführen.

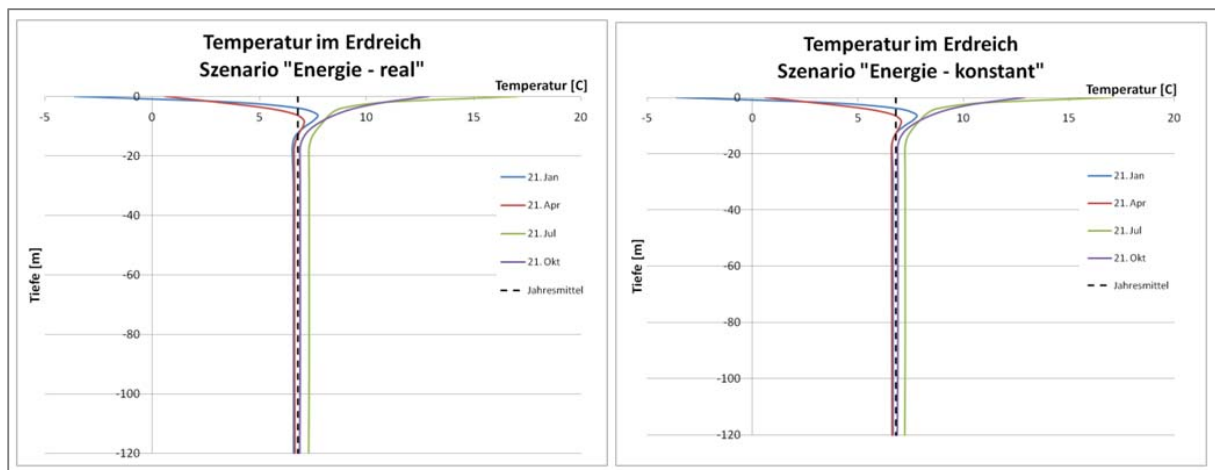


Abbildung 19: Erdreichtemperaturen bei gleichem Energieeintrag für ein Jahr

Die Beschaffenheit des Lasteintrags ins Erdreich fällt bei einer ausgeglichenen Energiebilanz zwischen Heizen und Kühlen nicht ins Gewicht. Bei der Untersuchung mit unausgeglichener Energiebilanz (Szenario „Spitzenlast“) konnten jedoch wie unten beschrieben Unterschiede in den erreichten Erdreichtemperaturen beider Lastgänge festgestellt werden.

7.1.3.2 Lastgänge gleicher Spitzenlast

In dem Szenario Spitzenlast wird der reale Lastgang mit dem synthetisierten Lastgang verglichen, wobei die Spitzenlasten für Heizen und Kühlen identisch sind. Aus **Abbildung 20** ist zu erkennen, dass die Spitzenlast für Heizen und Kühlen für den realen Lastgang bei ca. 13 kW sowie bei ca. 3,5 kW für den konstanten Lastgang liegt. Die entzogene Wärmemenge übersteigt jedoch deutlich die eingespeiste Wärmemenge. Das Erdreich wird überwiegend als Wärmequelle zur Beheizung des Gebäudes genutzt.

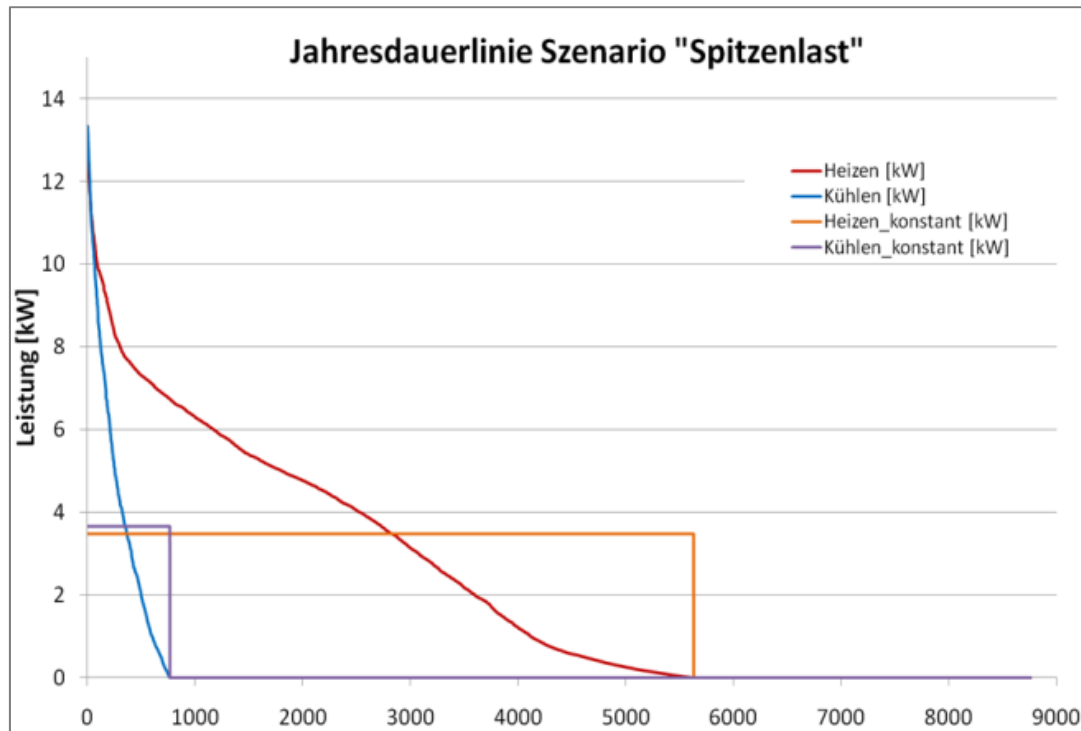


Abbildung 20: Jahresdauerlinie Szenario "Spitzenlast"

Der Einfluss der Lastgänge kann der **Abbildung 20** entnommen werden. In dem Szenario „Spitzenlast-real“ ist zu erkennen, dass in der Heizperiode (Herbst bis Frühjahr) dem Erdreich Wärme entzogen wird und sich die Temperatur im Erdboden reduziert. Dabei ist die Temperatur im Winter im Erdreich ab ca. 20 Meter Tiefe mit 5,8 Grad Celsius am geringsten, weil dort die spezifische Entnahme am höchsten ist, die Differenz zur Jahresmitteltemperatur beträgt 1,1 Kelvin. Umgekehrt ist der Wärmeeintrag im Sommer am höchsten, da der spezifische Kühlbedarf am höchsten ist. Die Temperaturdifferenz ab ca. 20 Meter beträgt 0,45 Kelvin über der Jahresmitteltemperatur.

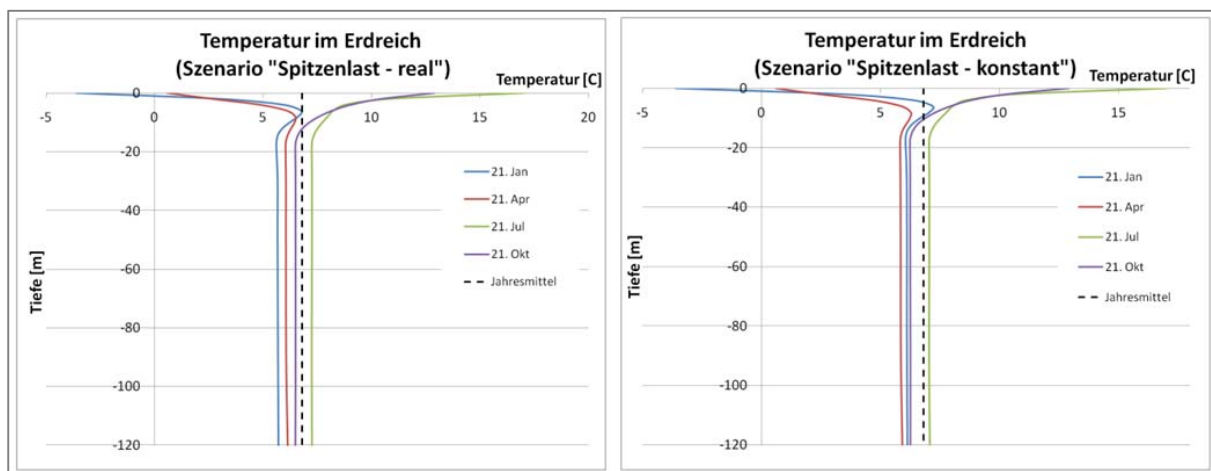


Abbildung 21: Erdreichtemperaturen bei gleicher Spitzenlast für ein Jahr

Wenn der Wärme- und Kältebedarf nun gleichmäßig über die Stundenwerte aufgeteilt wird (synthetischer Lastgang), in denen ein Bedarf vorliegt, so reduziert sich die Differenz der geringsten und höchsten Temperaturen zur Jahresmitteltemperatur auf 0,96 Kelvin in der Heizperiode bzw. 0,25 Kelvin im Sommer unterhalb 20 Meter.

Somit wird der Einfluss auf die Erdbodentemperatur reduziert, wenn der Lastgang über das Jahr verteilt ausgeglichener ist. In dem Szenario mit der konstanten Verteilung („Spitzenlast-konstant“) haben sich die Temperaturen im Erdreich in der Übergangszeit (April und Oktober) reduziert und am 21. Januar erhöht. Dies liegt daran, dass die spezifische Entnahme in der Variante „Spitzenlast-real“ im Winter am höchsten ist. In der Variante „Spitzenlast-konstant“ hat die spezifische Entnahme im Winter abgenommen, in der Übergangszeit aufgrund der Anpassung an den Lastgang hingegen zugenommen. Dies ist auch bei der Temperatur am 21. Juli zu erkennen. Der Wärmeeintrag der zweiten Variante ist geringer, weil der Kühlbedarf keine Spitzenentnahmen im Hochsommer hat, sondern die Entnahmen über die Kühlperiode konstant ablaufen.

Dies bedeutet, dass der Einfluss der Lastverteilung bei asymmetrischem Energieeintrag nicht unerheblich ist. Genauere Untersuchungen zur Veränderungen der Erdreichtemperatur nach 5 bzw. 10 Jahren sind für diese Verteilung von Interesse und werden weiter angestrengt.

7.1.3.3 Vergleich unterschiedliche Spitzenlast und Energiebedarf

In diesem Szenario wird der Lastgang so angepasst, dass ein asymmetrisches Verhältnis der Spitzlasten und der Energiemengen besteht (Abbildung 22). Der Spitzenheizbedarf liegt bei ca. 26 kW, der Spitzenkühlbedarf bei 13 kW. Wie im vorigen Szenario wird dem Erdreich mehr Wärme entzogen als eingespeichert wird.

Der gegenübergestellte Lastgang weist wieder einen konstanten Verlauf auf, sodass die Spitzenlasten geringer sind. Die Flächen unter der roten und der orangenen Kurve sowie die Flächen unter der blauen und der violetten Kurve sind identisch.

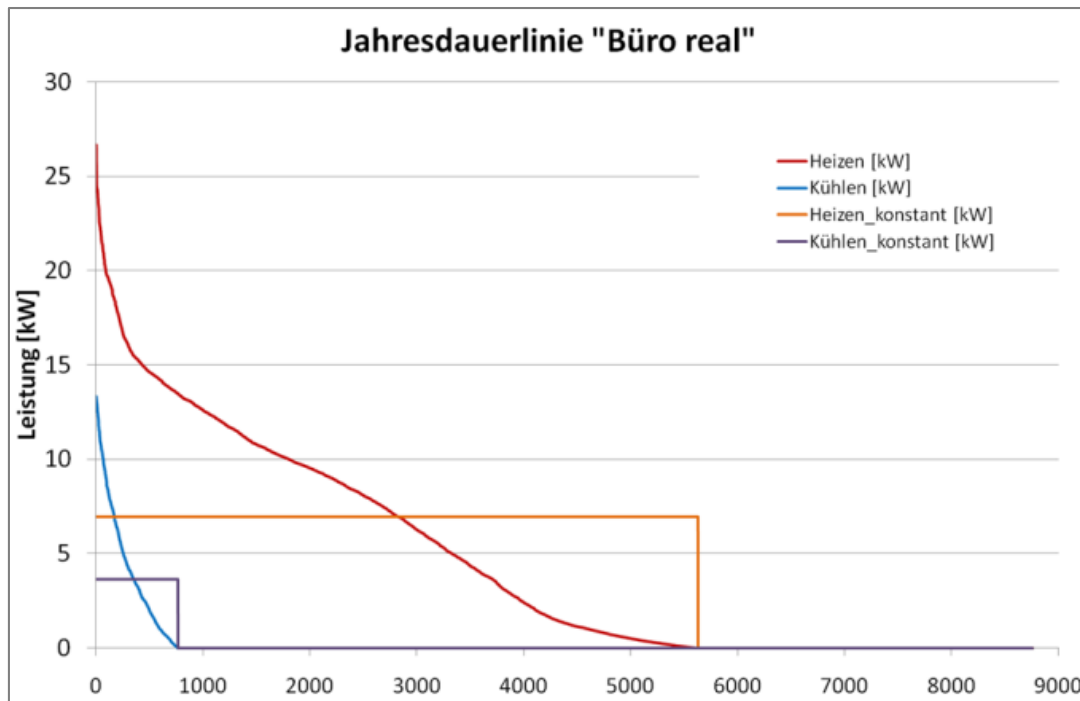


Abbildung 22: Jahresdauerlinie der Energielast für den realen und synthetischen Lastgang

Der asynchrone Energietransfer zum Erdreich ist auch im Erdreich zu erkennen. Während der Heizperiode ist die Temperatur in Sondennähe im Winter bereits stark unterkühlt. Beim konstanten Lastgang gibt es eine deutliche Verschiebung der Tiefsttemperatur in den Frühling, was auf die lange Entzugsphase dieser Variante zurückgeführt werden kann.

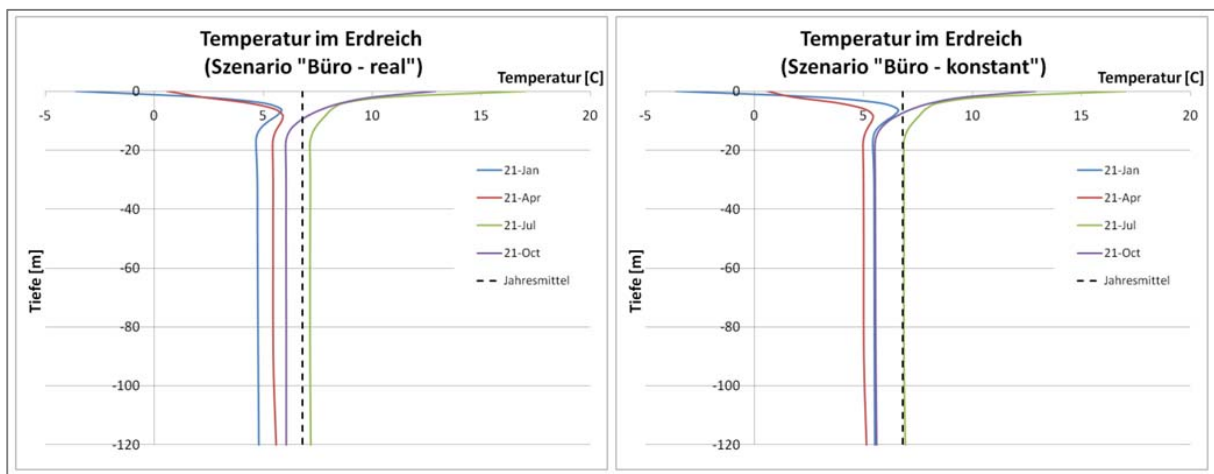


Abbildung 23: Erdreichtemperaturen bei realem und konstantem Lastgang des Bürogebäudes

Somit wirkt sich eine asynchrone Entzugsleistung auf das Erdreich aus, wenn die Heizlast über der Kühllast liegt. Da sich die Erdreichtemperatur im Jahreszyklus nicht regenerieren kann, ist davon auszugehen, dass die erreichten EER/COP langfristig rückläufig sind.

7.1.3.4 Betrachtung der Szenarien nach 5 Jahren

Im Wesentlichen können nach Einbringen derselben Kühl- wie Heizlasten innerhalb einer Simulation über fünf Jahre kaum Unterschiede in der Temperaturverteilung verglichen mit den einjährigen Simulationen der sechs Szenarien festgestellt werden (siehe **Abbildung 24** bis **Abbildung 26**).

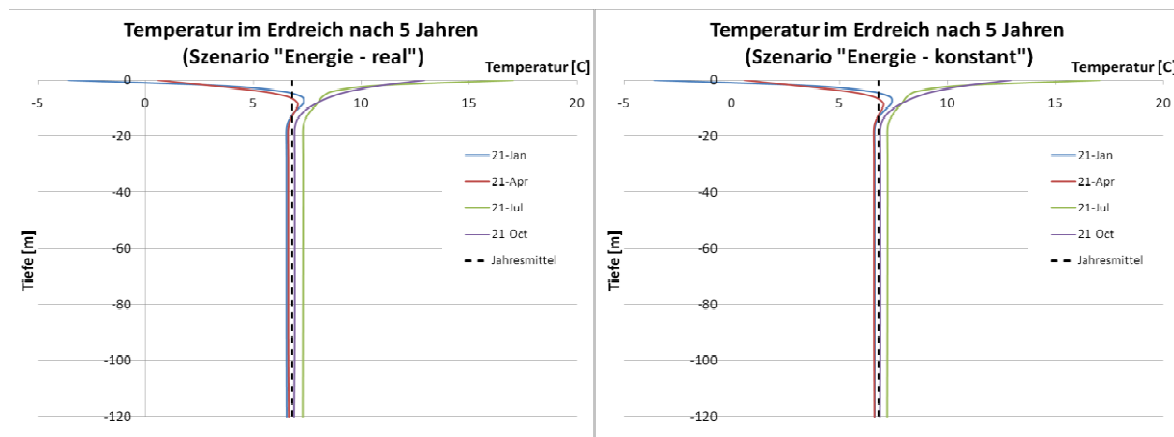


Abbildung 24: Temperatur im Erdreich bei gleichem Energiebedarf nach 5 Jahren

Die Erdreichtemperaturgradienten der Szenarien „Energie - real“ bzw. „Energie - konstant“ weisen auch im fünften Simulationsjahr kaum einen Unterschied zur ungestörten Erdreichtemperatur auf. Ein Unterschied in der Lastverteilung tritt wie bei der Betrachtung nach einem Jahr nicht zu Tage, sodass alle Anlagen mit symmetrischem Energieeintrag/-austrag lastprofilunabhängig als unkritisch für die jahreszeitliche Erhöhung der Erdreichtemperatur gesehen werden können (vgl. **Abbildung 24** mit **Abbildung 19**).

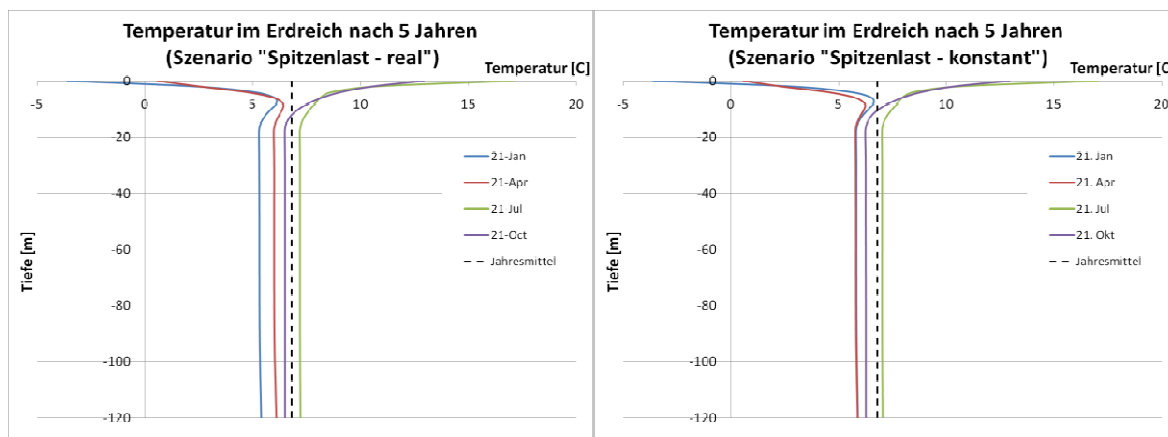


Abbildung 25: Erdreichtemperaturen bei gleicher Spitzenlast nach 5 Jahren

Bei den Szenarien „Spitzenlast - real“ und „Spitzenlast - konstant“ zeigt sich nach fünf Jahren ein zum ersten Berechnungsjahr konstanter Temperaturgradient. Es ist anzunehmen, dass sich die für jede Variante einstellende Temperaturverteilung bereits im ersten Jahr ausbildet und durch fortlaufende Simulation mit denselben Lastgängen jährlich reproduziert (vgl. **Abbildung 25** und **Abbildung 21**).

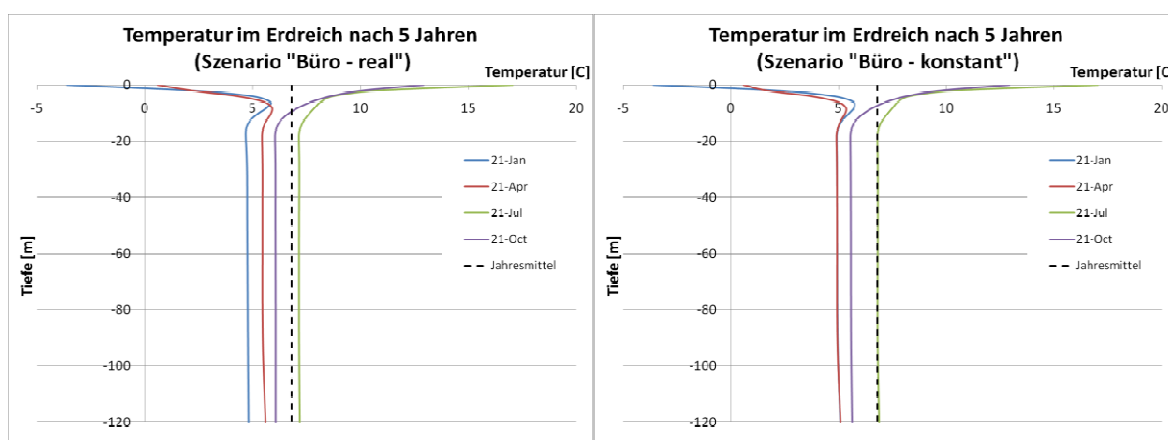


Abbildung 26: Erdreichtemperaturen bei Lastgang des Bürogebäudes nach 5 Jahren

Auch die Ergebnisse für das dritte Szenario „Büro - real/konstant“ stützen die Aussage, dass der individuelle Temperaturgradient, der sich in Sondennähe ausbildet, bereits im ersten Jahr voll ausgeprägt ist und sich in den Folgejahren reproduziert (vgl. **Abbildung 26** und **Abbildung 23**). Besonders deutlich wird dies beim Plot der erreichten Vorlauftemperaturen in **Abbildung 25** und **Abbildung 26**.

7.1.3.5 Zeitliche Betrachtung asynchroner Lastgänge

Um die Übereinstimmung der Szenarien „Energie“ und „Spitzenlast“ mit den in der VDI 4640 definierten Anforderungen an die Sondeneintrittstemperatur nachzuweisen, sind diese für den ungünstigeren Fall (Szenario „Spitzenlast“) in **Abbildung 25** für den Stand nach einem Jahr (rote Punkte) und 5 Jahren (grüne Punkte) dargestellt. Die Grenze für den Dauerlastbereich von ± 12 K ober- bzw. unterhalb der ungestörten Erdreichtemperatur von 6.8 °C ist in der Graphik mit einer blauen Linie begrenzt. Die Einhaltung für die Spitzenlasttemperatur von ± 17 K über/unter ungestörtem Erdreich wird durch die schwarzen Linien markiert.

Aus der Grafik lässt sich erkennen, dass die Anforderungen der VDI für den ungünstigeren Fall eingehalten sind. Weiter wird deutlich, dass die erreichten Sondeneintrittstemperaturen zwischen erstem und fünftem Jahr nahezu identisch sind, was sich mit der Auswertung der Erdreichtemperaturprofile deckt.

Abbildung 26 zeigt die Temperaturverteilung für das Szenario „Büro - real“, bei dem das Sondenfeld auf die kleinere Spitzenlast (Kühlen) ausgelegt wurde. Aus diesem Grund sind die Sondeneintrittstemperaturen für den Kühlfall innerhalb der VDI-Grenzen, für den Heizfall im Winter jedoch nicht. Auch bei diesem Graph bestätigt sich die bestehende Temperaturkonstanz für den Eintritt, der durch die aktuelle Verdampfertemperatur an der Wärmepumpe und die erreichte Fluidtemperatur am Sondernaustritt bestimmt wird, über die simulierten Jahre hinweg.

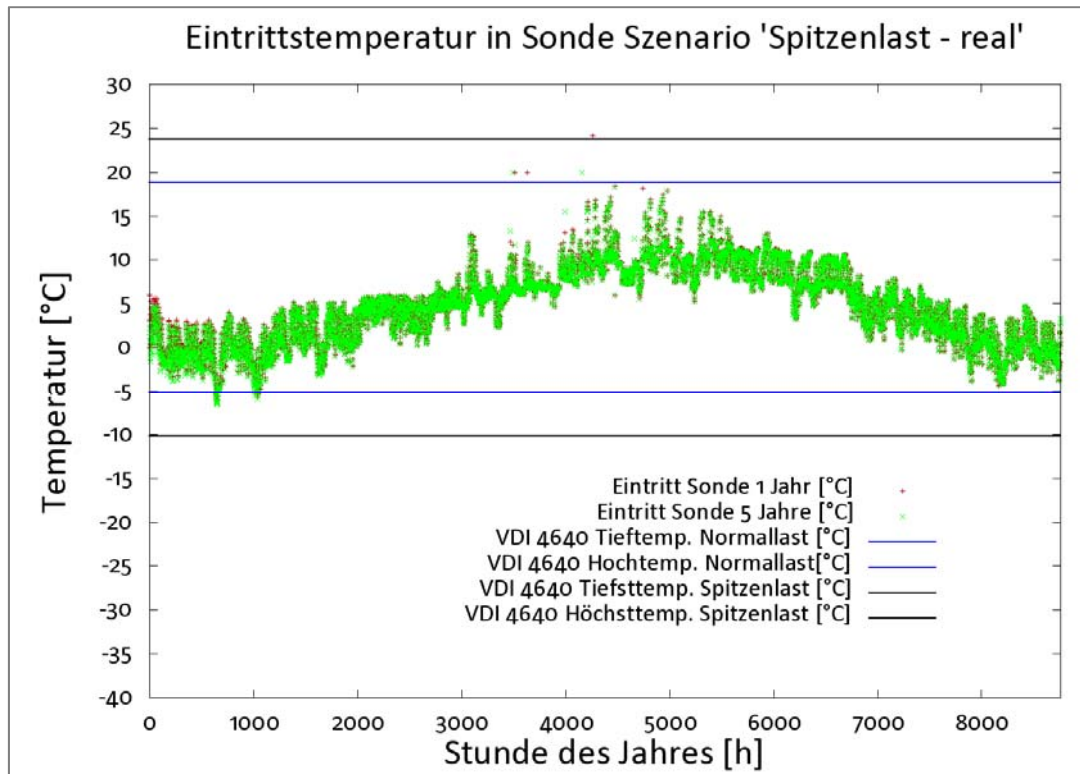


Abbildung 27: Eintrittstemperaturen Sonde nach einem und fünf Jahren (Spitzenlast - real)

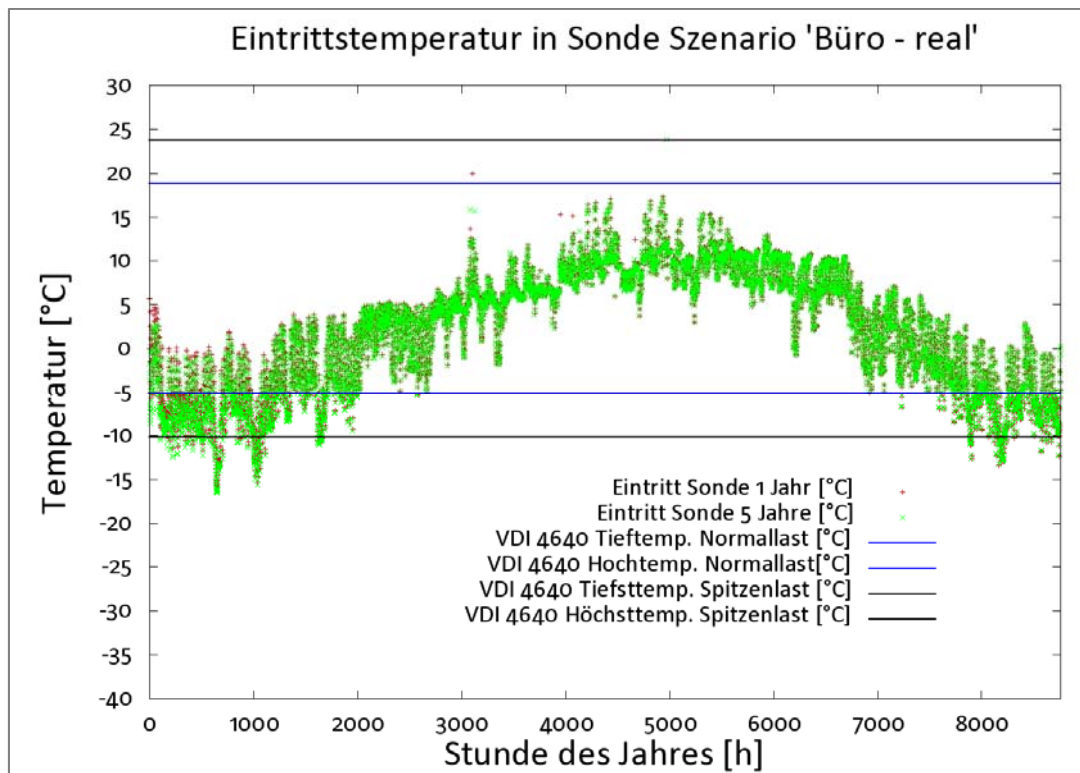


Abbildung 28: Eintrittstemperaturen Sonde nach einem und fünf Jahren (Büro - real)

7.2 Entwicklung von Simulationsmodellen

7.2.1 Modelloptimierung dreidimensionaler Erdsondenfelder

Vom zafh.net wurde im Rahmen vorhergehender Arbeiten bereits ein detailliertes Simulationsmodell zur Analyse des thermischen Verhaltens von einzelnen Erdsonden und von Erdsondenfeldern entwickelt, das den Energiefluss in allen drei Raumrichtungen bilanziert. Einflüsse zwischen den einzelnen Schichten der Sonde sowie Kurzschlusswärmeströme in den Sonden (zwischen Vorlauf und Rücklauf der U-Rohrleitung) können bereits mit hoher Genauigkeit abgebildet werden. Im Zuge des beantragten Projektes soll dieses Modell um den Einfluss von Grundwasserströmungen erweitert werden. Außerdem werden die Wärmeübergangsvorgänge in den Rohren sowie zu unterschiedlichen Bohrlochverfüllungen und von diesen zum angrenzenden Erdreich detailliert betrachtet und im Modell abgebildet. Da der künftige Modellierungsaufwand des Grundwassereinflusses wesentlich vom erforderlichen Detaillierungsgrad der benötigten Informationen abhängt, wird bei der Modellentwicklung ein wesentliches Augenmerk auf der erforderlichen Güte der Informationen und deren Einfluss auf die Prognosegenauigkeit liegen.

7.2.1.1 Grundlagen der numerischen Modellbildung

Die numerische Simulation realer Systeme erfordert die ein-, zwei- oder dreidimensionale Zuordnung physikalischer Größen zu einem mathematischen Knotengitter. Die Knoten des Gitters repräsentieren in diesem Fall finite Volumenelemente des Erdreichs, der Betonverfüllung des Bohrlochs oder des Wärmefluidrohrs selbst (**Abbildung 30**). Die physikalischen Eigenschaften der Volumenelemente wie spezifische Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und die Temperatur werden auf die Knoten übertragen. Die stoffliche Beschaffenheit der Volumenelemente findet so ihr mathematisches Spiegelbild im Knotengitter. Die geometrische Teilung des Simulationsbereichs kann hierbei physikalischen Effekten Rechnung tragen.

Abbildung 30 zeigt die horizontale Teilung des Simulationsbereichs in Sektoren und Zonen. Die Größe der Volumenelemente, die durch einen Knoten im mathematischen Modell repräsentiert werden, wächst nach außen hin an. Die feinere Diskretisierung in Sondennähe ermöglicht die genauere Abbildung der in diesem Bereich höher liegenden Wärmestromdichte. Unter Annahme eines gänzlich homogenen Erdreichs und einer ungestörten Einzelsonde handelt es sich bei der Temperaturverteilung im Erdreich um die Sonde um ein radialsymmetrisches Problem. Diesem Umstand trägt die Einteilung des Simulationsbereichs in Sekto-

ren Rechnung. Die Einteilung in Zonen wurde zur einfacheren mathematischen Darstellung eines Sondenfeldes statt ringförmig eckig gewählt. Die so geteilten Erdreichvolumina haben einen trapezförmigen Grundriss und bilden mit der eigentlichen Sonde, in der Mitte der **Abbildung 30** dargestellt, Schicht für Schicht den dreidimensionalen Korpus des Berechnungsraums.

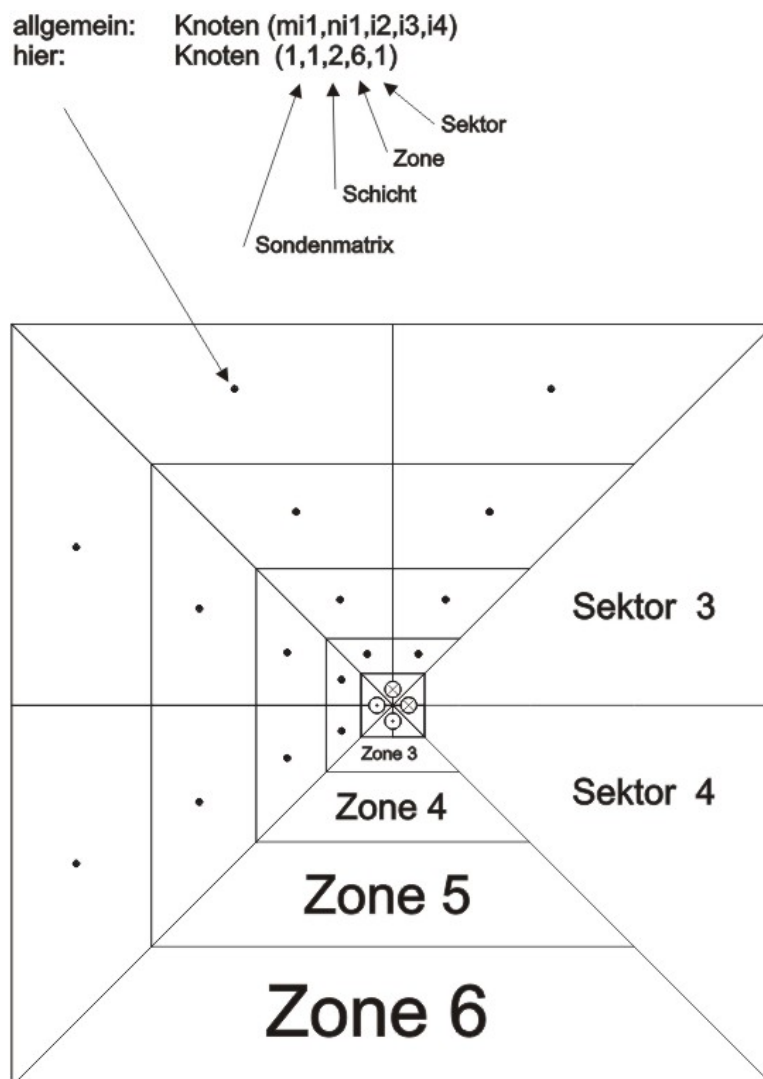


Abbildung 30: Schema der horizontalen Sondenpartitionierung im Simulationsprogramm

Die Berechnungsknoten liegen räumlich im Schwerpunkt der Volumenelemente und sind über Laufindices wie Schicht, Zone und Sektor eindeutig adressiert.

Zum Wärmeübertrag durch Leitung, wie er im Modell der ersten Ausbaustufe realisiert ist, wird in der folgenden Ausbaustufe des Programms der Wärmeübergang durch Konvektion (Grundwasserströmung) parallel geschaltet.

Letzteres macht die Simulation ganzer Sondenfelder nötig, da sich gerade bei Sondenfeldern in porösen Grundwasserleitern Temperaturfahnen ausbilden, die auf die Temperaturvertei-

lung und damit auf die resultierende Energiebilanz der einzelnen Sonden erheblichen Einfluss haben.

Um diese Randbedingungen des Simulationsmodells sicher abbilden zu können, wird am Rand der einzelnen Sonden ein Wärmeübergang von Sonde zu Sonde berücksichtigt und das Feld als Ganzes simuliert.

Mit dem bis dato realisierten Simulationswerkzeug kann ein Sondenfeld von zwei auf fünf Sonden simuliert werden. Innerhalb der 2x5-Matrix können einzelne Sonden an- bzw. abgeschaltet werden, was die Abbildung kleiner bis mittlerer Sondenfelder mit unterschiedlichem Grundriss ermöglicht. In **Abbildung 31** sind Beispiele der möglichen Anordnung der Sonden dargestellt. Hierbei stellen die mit Kreuzen versehenen Orte Sonden im Betrieb dar, während die mit Ringen markierten Stellen Dummy-Sonden kennzeichnen. Dummy-Sonden erfüllen den Zweck das mathematische Modell variabel an die in der Realität vorgefundene Anordnung von Sonden anpassen zu können. Um den Programmieraufwand gering zu halten, werden Dummy-Sonden genau wie die in Betrieb stehenden Sonden geometrisch geteilt (**Abbildung 30**). Im zweiten Schritt werden die Stoffeigenschaften des Erdreichs allen Knoten, d.h. auch den Knoten der Bentonitverfüllung des Bohrlochs und denen des Wärmeträgerfluids zugewiesen. Es ergibt sich so ein homogener Berechnungskörper mit der Teilung einer Sonde und den Stoffeigenschaften des Erdreichs.

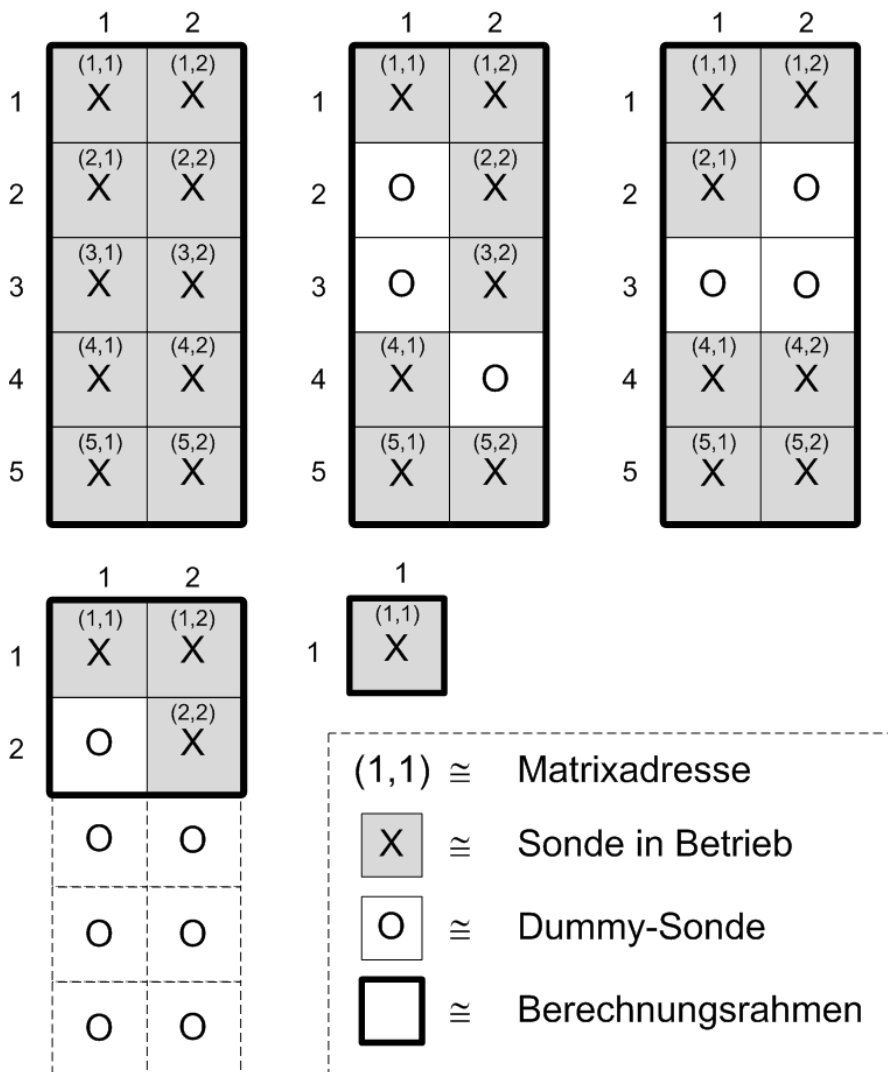


Abbildung 31: Darstellung möglicher Geometrien abbildbarer Sondenfelder

Dieser wird, da er innerhalb des Berechnungsrahmens liegt, mit überrechnet. Der Wärmeeintrag erfolgt jedoch im Gegensatz zu in Betrieb stehenden Sonden ausschließlich über die Randzone der angrenzenden Sonden und nicht über die Temperaturanomalie durch das Wärmeträgerrohr in Sondenmitte.

Ausgehend von grundlegenden Parametern wie dem Abstand der Sonden innerhalb des Feldes in x/y-Richtung sowie der Sondentiefe ab Geländeoberkante (z-Richtung) generiert das Programm ein Knotengitter.

Jeder Knoten ist innerhalb der Matrix eindeutig adressiert und durch kartesische Koordinaten innerhalb des Simulationsgebietes räumlich fixiert. Neben den Matrizen für die kartesischen Koordinaten werden die physikalischen Stoffeigenschaften (Dichte, Wärmekapazität und -leitfähigkeit) der Knoten in jeweils eigenen Matrizen gespeichert. Dadurch ist eine theoretische Auflösung von differierenden Stoffeigenschaften des Erdreichs bis auf eine einzelne Volumeneinheit (Knoten) möglich.

Bei der Fertigung von Erdwärmesonden werden die anstehenden Gesteine unter Angabe der jeweils erreichten Bohrtiefe dokumentiert (siehe Anhang A Erdwärmesondenausbau Vaihingen), was die Zuweisung der jeweiligen Stoffeigenschaften des anstehenden Gesteins pro Simulationshorizont ermöglicht. Um die Abbildung der realen Verhältnisse im Feld auf das mathematische Modell effektiv umsetzen zu können, sollte die Zuordnung der Stoffeigenschaften zu den jeweiligen Simulationshorizonten automatisiert erfolgen. Hierfür besteht noch Entwicklungsbedarf, sodass bei den im zweiten Teil beschriebenen Modellen jeweils von homogenem Erdreich mit gemittelten Stoffwerten ausgegangen wurde.

Nach der räumlichen und stoffspezifischen Definition des Knotengitters wird unter Berücksichtigung der Jahreszeit die Temperaturverteilung im Feld zum Zeitpunkt t_0 berechnet. Die Eindringtiefe der jahreszeitlich oszillierenden Temperaturwelle in das/den halbunendliche/en Erdreich/Raum (siehe **Abbildung 32**) beträgt in etwa 15 m unter Geländeoberkante (GOK). Sind Datum des Simulationszeitraumes und Klimadaten bekannt, können die Erdreichstarttemperaturen für die Berechnungshorizonte ermittelt werden. Bereits beim aktuellen Programmstand mitberücksichtigt sind die an DIN V 4108 Teil 6 angelehnten 15 Klimaregionen Deutschlands, deren Jahresmitteltemperatur und Amplitude in die Berechnung eingehen [10]. In der **Abbildung 32** ist die jahreszeitlich wechselnde Temperaturverteilung des Erdreichs bezogen auf die Klimaregion 15, Garmisch-Partenkirchen, dargestellt.

Die Simulation kurzer Sonden (z.B. bis 20 m), deren oberer Bereich gegenüber dem oberflächennahen Erdreich ungedämmt ausgeführt ist, wird so durch die beschriebene Programmroutine möglich.

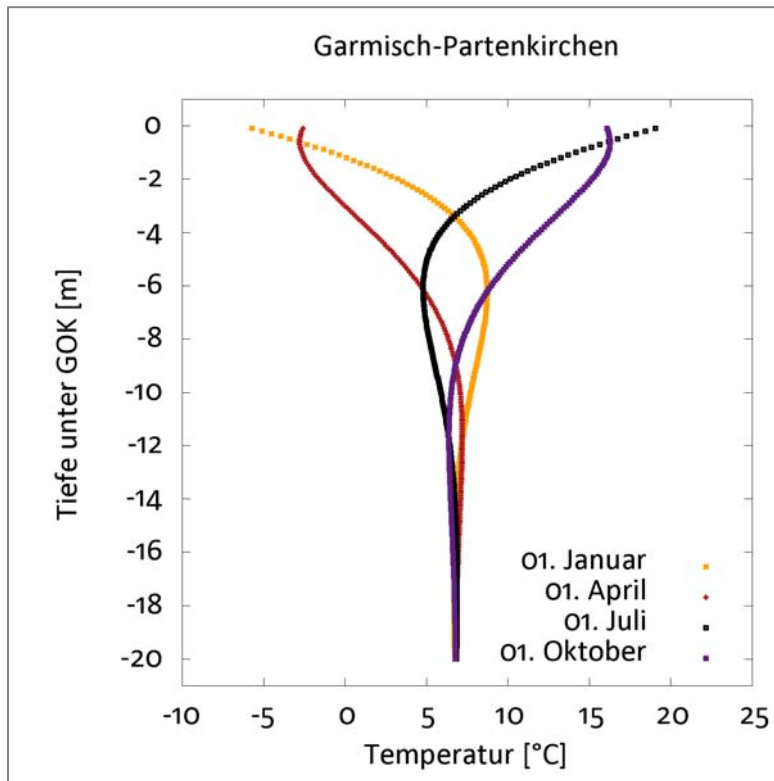


Abbildung 32: Eindringtiefe der jahreszeitlich wechselnden Temperaturwelle unter Geländeoberkante (GOK) [4]

7.2.2 Rechenroutine, Berechnungsablauf

Der Rechenablauf gliedert sich insgesamt in drei Teile. Hierbei wird der erste Abschnitt, in dem aus grundlegenden Parametern des Sondenfeldes die Geometrie des Knotengitters bestimmt wird, nur beim ersten Aufruf der Rechenroutine durchlaufen. Die darauf folgenden Rechenabschnitte zwei und drei werden hingegen pro Zeitschritt berechnet.

Im Rechenschritt zwei wird zunächst der Temperaturgradient im U-Rohr der Sonde bestimmt. Hierzu wird die Energiebilanz der einzelnen Sondenabschnitte aufgestellt (**Abbildung 33** und **Abbildung 34**)

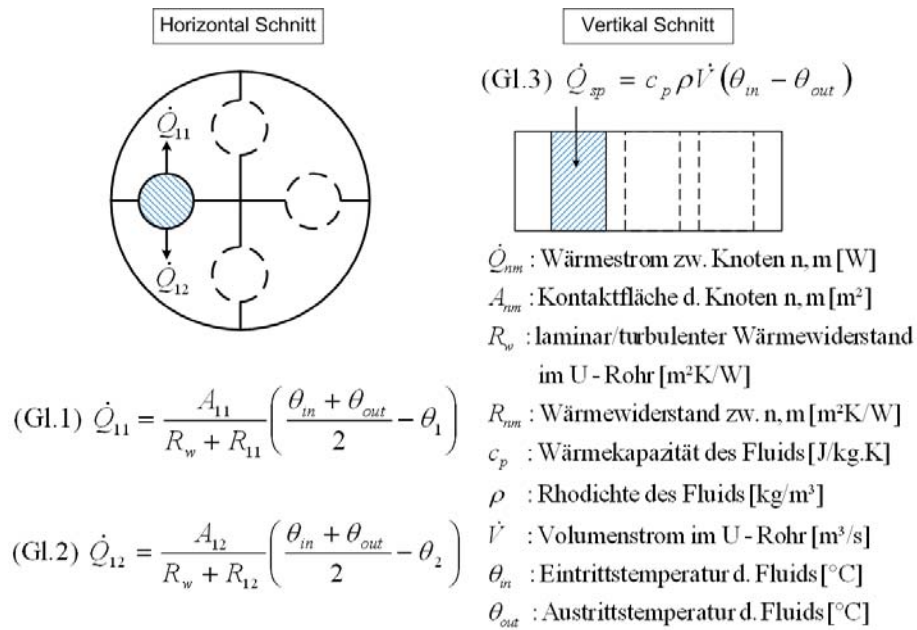


Abbildung 33: Energiebilanzen in der Sonde (Berechnung des Temperaturgradienten im Wärmeträgerrohr)

Den Verlustwärmeströmen \dot{Q}_{11} und \dot{Q}_{12} (Gl. 1 & 2) wird die Wärmespeicherleistung im Wärmeträgerfluid \dot{Q}_{st} (Gl.3) gleichgesetzt.

Die für die Wärmeleitung ins Erdreich relevante Mitteltemperatur eines U-Rohrabschnitts ergibt sich als arithmetisches Mittel aus der Eintrittstemperatur θ_{in} und der Austrittstemperatur θ_{out} des simulierten Volumenelements (Gl.4). **Abbildung 33** und **Abbildung 34** zeigen die für die Temperaturbestimmung des U-Rohrelementes getroffenen Annahmen und Bilanzen.

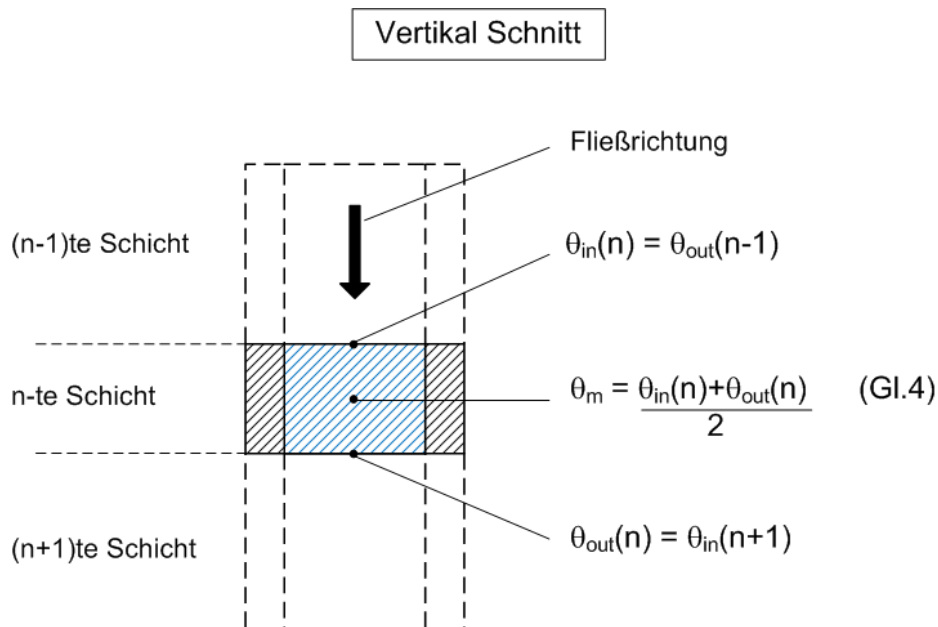


Abbildung 34: Mittlere Temperatur des Wärmeträgers im n-ten Berechnungshorizont

Im dritten Rechenschritt wird der Wärmeübergang zwischen den Knoten des Bohrlochs und angrenzenden Erdreichs echt-dreidimensional kalkuliert. Um den Programmieraufwand, der angesichts der Simulation ganzer Sondenfelder entsprechend hoch ist, nicht zusätzlich zu vergrößern, wurde die Anwendung mithilfe finiter Vorwärtsdifferenzen programmiert.

Bei der gewählten Diskretisierung des Sondenfeldes wird für eine stabile Berechnung eine maximale Zeitschrittweite von ca. 20 Minuten erforderlich, die bei der Simulation von Tagen oder Monaten kein Problem darstellt, jedoch bei Simulationszeiträumen von mehreren Jahren mit langen Rechenzeiten verbunden ist.

7.2.3 Validierung des Programms

Die Validierung des Programms wurde an der hochschuleigenen Geothermieanlage vorgenommen. Bei dieser Anlage handelt es sich um zwei 80 m tiefe Erdwärmesonden, die zur Rückkühlung einer Diffusions-Absorptions-Kältemaschine (DAKM) dient. Die aus den Tests gewonnenen Werte für die mittlere Leitfähigkeit des Untergrundes wurden zur Erstellung des Modells verwendet. **Abbildung 35** und **Abbildung 36** zeigen gemessene wie simulierte Werte für den Sondenrücklauf.

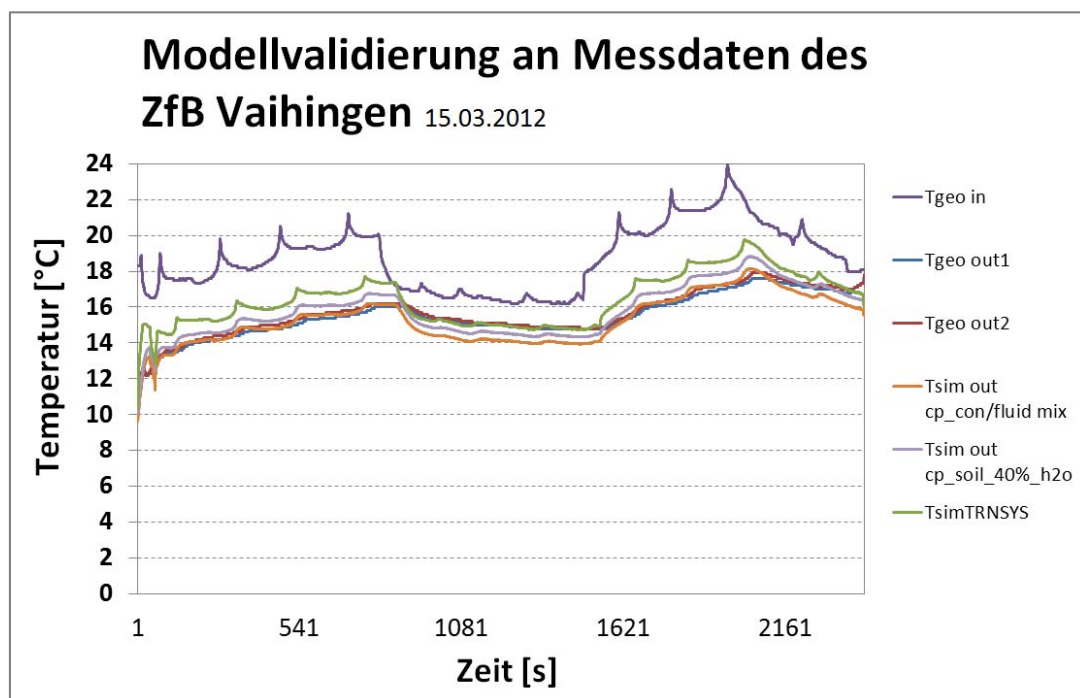


Abbildung 35: Modellvalidierung an der Sondenanlage in Stuttgart-Vaihingen (Zentrum für Bauphysik)

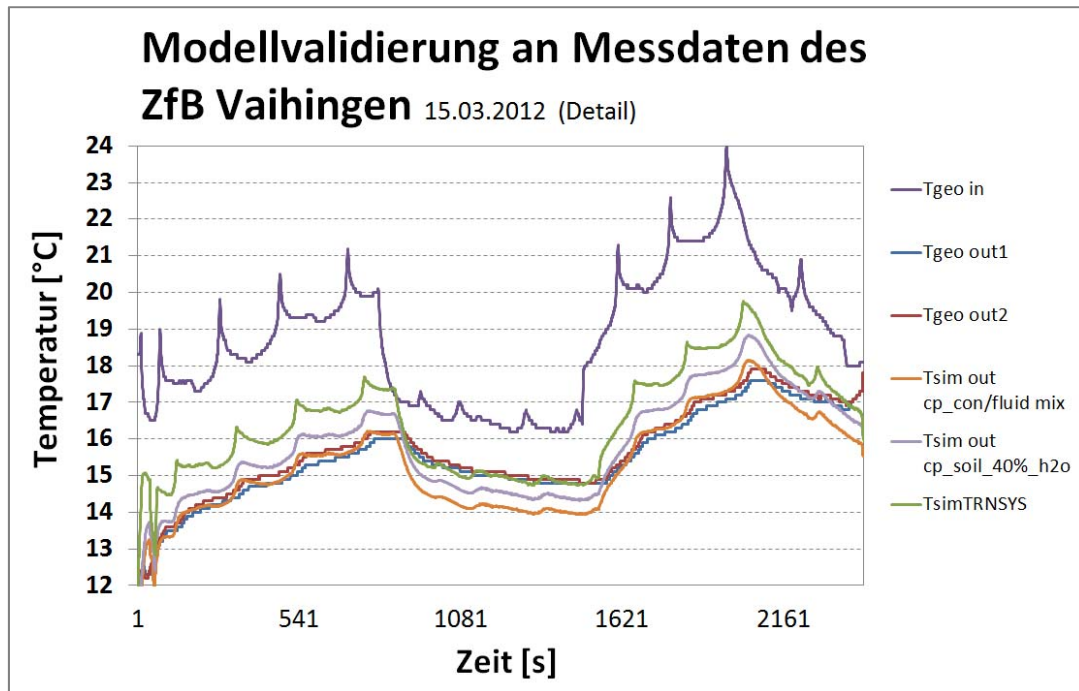


Abbildung 36: Modellvalidierung an der Sondenanlage in Stuttgart-Vaihingen (Zentrum für Bauphysik) – Detaildarstellung

Die in Dunkelviolett gehaltene Linie ist die Eintrittstemperatur in die Sonde, deren Verlauf durch markante Peaks gekennzeichnet ist. Diese Peaks kommen vermutlich und wie in Abschnitt 7.3.6.2 näher beschrieben durch Beimischen eines fehlerhaften Ventilzustande. Der gemessene Sondenrücklauf (blaue Kurve für Sonde eins und rote Kurve für Sonde zwei) zeigt ein sehr träges Verhalten der vertikalen Erdreichwärmetauscher. Die im Vorlauf auftretenden Peaks haben nahezu keine Auswirkung auf den Rücklauf beider Sonden. Auch besteht zwischen den Sonden, die nach Bohrprotokoll mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien (normal und hochleitend) hergestellt wurden, kein wesentlicher Unterschied in der Rücklauf-temperatur.

Die simulierten Kurven (orange, hellviolett und grün), wovon die ersten beiden mit dem erdsonden.bw-Modell gerechnet wurden und die grüne mit dem TRNSYS Type 451 a, zeigen allesamt ein viel dynamischeres Verhalten als die gemessenen Sonden.

Aus der Detaildarstellung (Abbildung 36) ersichtlich kann beim Temperaturanstieg (Sekunde 1 bis ca. 800) von einer guten Übereinstimmung der simulierten orangenen Kurve mit den Messwerten gesprochen werden, beim darauffolgenden Temperaturabfall (Sekunde 800 bis ca. 1600) kommt es zu Abweichungen der simulierten zur gemessenen Temperatur von ca. 1 Kelvin. Beim zweiten Temperaturanstieg wird dann ein ähnlich guter Fit erreicht wie beim ersten. Geht man von einem Wassergehalt des Erdreichs von 40 % aus ergibt sich die hellviolette Kurve, die im Anstieg weniger gut passt, dafür aber beim Temperaturabfall weniger abweichend ist als die zuvor beschriebene orange Kurve. Ein Versuch mit dem TRNSYS

Type 451 a die Austrittstemperatur nachzufahren stellt die grüne Kurve da. Diese verhält sich gerade umgekehrt zur orangefarbenen (starke Abweichungen in der Aufheizphase und gute Übereinstimmung in der Abklingphase). Allen Simulationen gemein ist der Umstand, dass die prognostizierten Rücklauftemperaturen zu stark von den Peaks der Eintrittstemperatur geprägt sind, wobei der TRNSYS Type sich in diesem Fall als der dynamischste darstellt. Bei Unterstellung von messtechnisch richtiger Erfassung der Rücklauftemperaturen der Sonden reagieren die Erdwärmesonden in situ jedoch wesentlich träger als dies die Modelle errechnen.

7.2.4 Simulation der Anwendungsfälle

Mit dem entwickelten Simulationsmodell werden nun die Lastgänge von einem durchschnittlichen Bürogebäude sowie einem Supermarkt untersucht.

In der **Abbildung 6** sind die Kühllasten eines am Chiemsee in Bayern liegenden Bürogebäudes dargestellt.

Der Lastgang zeigt über den Zeitraum einer Woche (Montag-Sonntag) eine regelmäßige Wiederkehr des täglichen Kühllastverlaufs. Während außerhalb der üblichen Büroarbeitszeiten keine Kühlung notwendig ist, steigt die Kühllast während des Morgens sprunghaft an, erreicht um die Mittagszeit ihr Maximum und nimmt zum Feierabend erneut stark ab. Diesem für Bürogebäude typischen Verlauf, ohne ausgeprägte Grundlast außerhalb der Büroarbeitszeiten, steht im Anwendungsfall Supermarkt ein Lastgang gegenüber, der sehr markante Grundlastbereiche aufweist (**Abbildung 37**).

Zu beachten ist hier, dass in **Abbildung 37** die Woche mit einem Sonntag beginnt, an dem die Kühllast deutlich tiefer liegt. Die Kühllast eines Supermarktes setzt sich im Wesentlichen aus dem Grundlastanteil für die Lebensmittelkühlung sowie dem Spitzenlastanteil für die Verkaufsflächenklimatisierung zusammen.

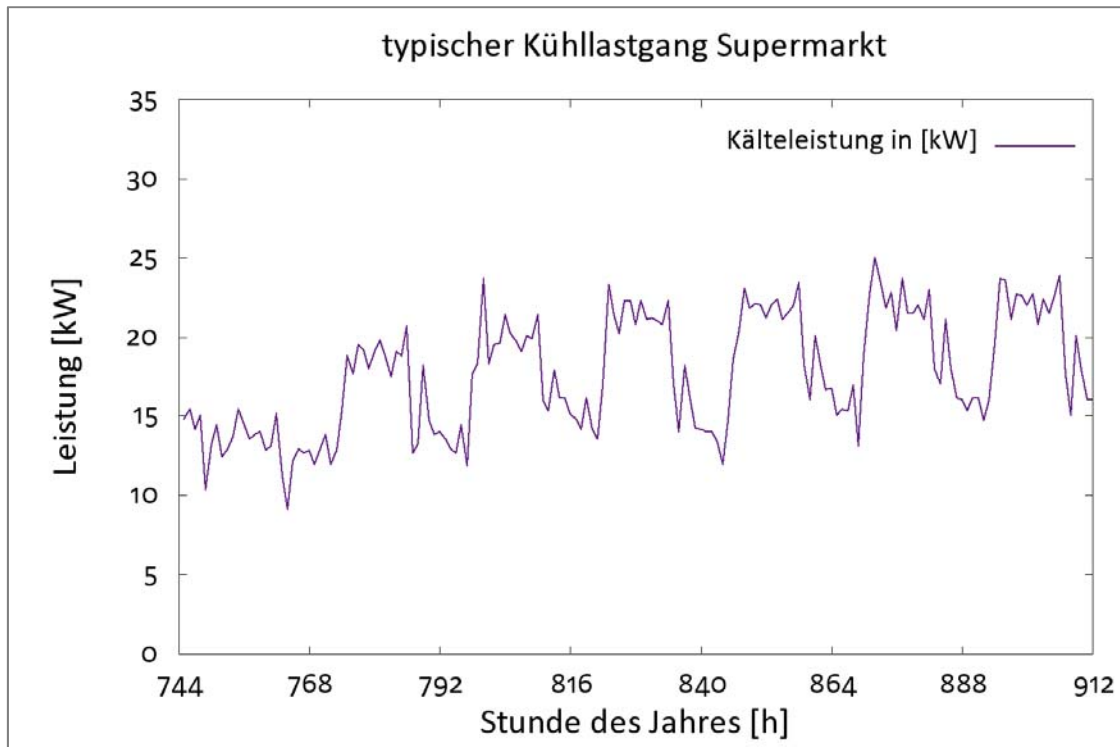


Abbildung 37: typischer Kühllastgang Supermarkt

Letzterer Anteil ist am Sonntag wegen des fehlenden Publikumsverkehrs nicht gegeben, so dass an diesem Tag im Vergleich zu den verkaufsoffenen Tagen gut das Verhältnis zwischen Grund- und Spitzenlast abgeschätzt werden kann.

7.2.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Simulation des Bürogebäudes erfolgte vorrangig, da für dieses Gebäude ein vollständiger Datensatz für die Kühl- und Heizlasten (in stündlicher Auflösung für ein Kalenderjahr) vorhanden war und wurde bereits im Abschnitt Jahresbilanzen mit vereinfachten Modellen diskutiert. Der Lastgang des Bürogebäudes ist verglichen mit dem eines Lebensmittelmarktes wesentlich dynamischer und aus diesem Grund für die Modelluntersuchung und dem Ausloten der Modellgrenzen besser geeignet.

7.2.6 Zwischenfazit

Anhand der Simulation für das Bürogebäude, für die Betriebsarten reines Kühlen, reines Heizen und kombinierter Betrieb, ist bereits im ersten Jahr ein Unterschied in den Rücklauf-temperaturen feststellbar. Die Temperaturdifferenz beträgt ca. 0,2-0,5 Kelvin.

7.2.7 Die Erweiterung des Modells um das Modul zur Simulation von Grundwasserströmung

Eine räumliche Darstellung des zuvor beschriebenen mathematischen Modells zur echt-dreidimensionalen Berechnung der Stoff- und Energieströme innerhalb einer Sonde bzw.

eines Sondenfeldes ist in **Abbildung 38** gegeben. Die eigentliche Sonde ist in dieser Explosionszeichnung in der Mitte (graues Quadrat mit schematisiertem Ein-/Austritt des Fluids) dargestellt. Die durchnummerierten (weißen) Sektoren symbolisieren das die Sonde umgebende Erdreich, das wie zuvor beschrieben ebenfalls einzelnen Berechnungsknoten zugeordnet wird. Jedem Volumenelement (gelbe Segmente) wird im mathematischen Modell ein Berechnungsknoten zugewiesen. Jeder Knoten des Netzes besitzt sechs Nachbarknoten, so dass bei der Überrechnung eines Knotens die Energiebilanzen in alle drei Raumrichtungen (zu allen sechs Nachbarknoten) gebildet werden müssen.

Die Implementierung der Grundwasserströmung in dieses Modell ist ebenfalls aus **Abbildung 38** ersichtlich. Neben den zuvor beschriebenen sechs Wärmeströmen werden jedem Erdreichknoten (hier für das gelbe Segment Nummer vier dargestellt) vier weitere Energieströme, die durch den konvektiven Wärmeübertrag der Grundwasserströmung zustande kommen, zugeordnet. Je nach Fließgeschwindigkeit und -richtung des Grundwassers und dessen Temperatur wird innerhalb eines berechneten Zeitschritts mehr oder weniger Energie über die konvektiven Wärmeströme ϕ_{7-10} an den Erdreichknoten übertragen.

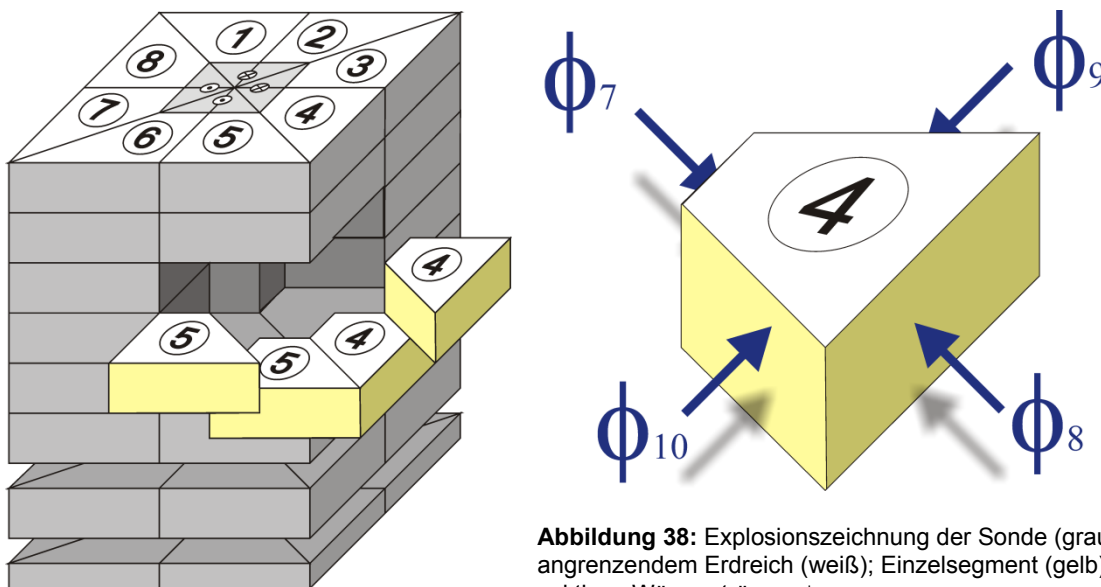


Abbildung 38: Explosionszeichnung der Sonde (grau) mit angrenzendem Erdreich (weiß); Einzelsegment (gelb) mit konvektiven Wärmeströmen ϕ_{7-10}

Aus **Abbildung 39** ersichtlich kann für ein Sondenfeld (hier 2 x 2-Sonden) nur eine Grundwasserfließrichtung wie -geschwindigkeit vorgegeben werden. Am linken und oberen Rand des Feldes wird durch die Strömung, je nach Betriebsart der Sonden (Heizen/Kühlen) durch die Grundwasserströmung Energie ein- bzw. ausgetragen, über den rechten und unteren Rand erfolgt der Grundwasserabfluss aus dem Kalkulationsrahmen.

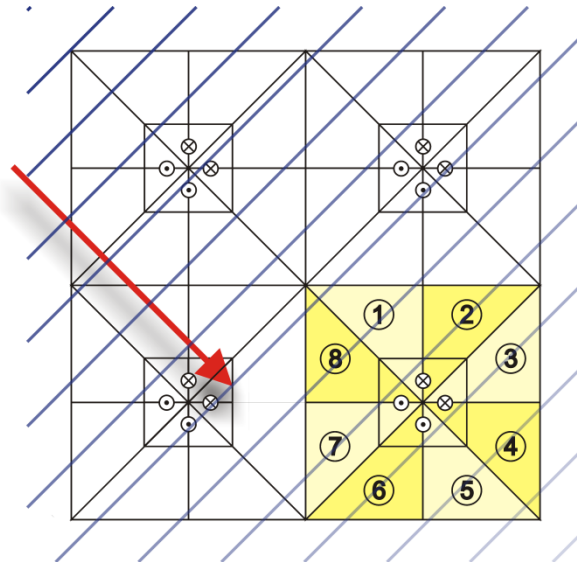
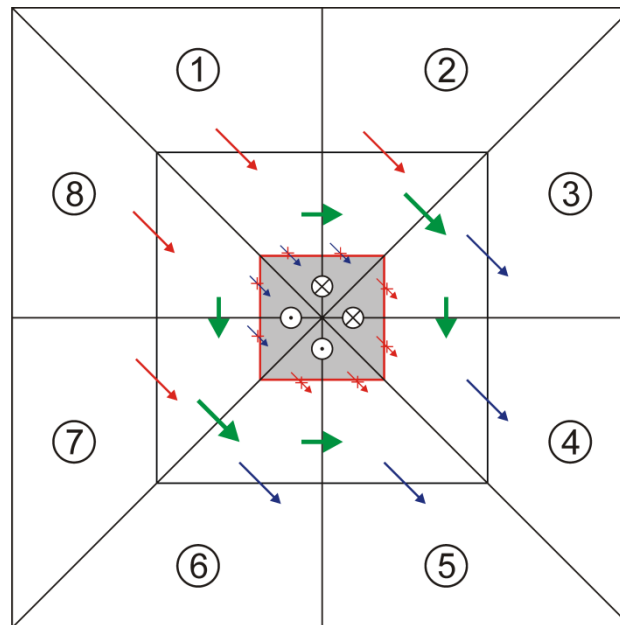


Abbildung 39: Grundwasserströmungsrichtung (roter Pfeil) mit Wellenfronten (blaue Linien)



- Betonverfüllung Erdsonde
- Grundwasserzufluss Zone 3
- erhöhter Zufluss Zone 3
- Grundwasserabfluss Zone 3
- wasserundurchlässige Kontaktfläche
- ① Sektoren
 cl = 1,2,3,4
 cr = 8,7,6,5

Abbildung 40: Grundwasserstauzone um wasserundurchlässigen Sondenkern mit Abfluss über Nachbarsegmente

Die mathematische Entsprechung der Stauzone (**Abbildung 40**) um die Sonde und der Algorithmus zur Bestimmung der Knotenreihenfolge, für den Energieeintrag ins Nachbarfeld in Abhängigkeit von der Fließrichtung des Grundwassers, haben den Programmieraufwand erheblich erhöht.

Die Dicke der Zone um die Sonden variiert bei gleichbleibendem Sondenabstand und unterschiedlicher Zonenanzahl, in die das Erdreich geteilt wird, erheblich. Was sich ebenfalls signifikant auf den Einfluss der Grundwasserströmung auf die Gesamtleistung der Sonde auswirkt.

7.2.8 Validierung des Grundwassermoduls

Um das Grundwassermodul mit Messdaten aus dem Containerversuch bei der Versuchsanstalt VEGAS (Universität Stuttgart) validieren zu können, wurden für das „trockene“ Modell erdsonde.bw Vergleichsrechnungen mit einem geprüften kommerziellen Berechnungswerkzeug (TRNSYS Type 451 a) erstellt. Unten stehend eine Zusammenstellung der wichtigsten Programmeigenschaften der beiden Simulationswerkzeuge (**Tabelle 3**). Da der TRNSYS-Type ein Modell zur Berechnung von Einzelsonden darstellt, wurde die Validierung des erdsonden.bw-Modells nur für eine Sonde angestrengt.

Tabelle 3: Vergleich der Simulationsmodelle TRNSYS Type 451a und erdsonde.bw

Diskretisierung	EWS-Modell Type 451a (Trnsys)	erdsonde.bw (INSEL)
	Crank Nicholson (Nahfeld)	Vorwärtsdifferenzen- Verfahren
	Trichterformel nach Werner (Fernfeld)	
Vertikale Wärmeleitung	nein	ja
Max. Vertikale Schichtanzahl	8	50
Berücksichtigung Grundwasserströmung	nein	ja
Langzeitsimulation	auf 5 Jahre begrenzt	ohne Begrenzung
Implementierung jahreszeitlich schwankender Erdreichtemperatur	nein	ja
Berechnung von Sondenfeldern	nein (Einzelsondenmodell)	ja (2 × 5 Sonden max.)
Temperaturprofile des Erdreichs auslesbar	nein	ja

Langzeitbetrachtungen beschränkten sich auf die durch den TRNSYS-Type vorgegebene maximale Simulationszeit von 5 Jahren.

In **Abbildung 41** zu sehen, der vertikale Schnitt durch die Simulationsbereiche des Type 451 a. In der Mitte die eigentliche Sonde (weiß) mit dem durch ein eindimensionales Crank-

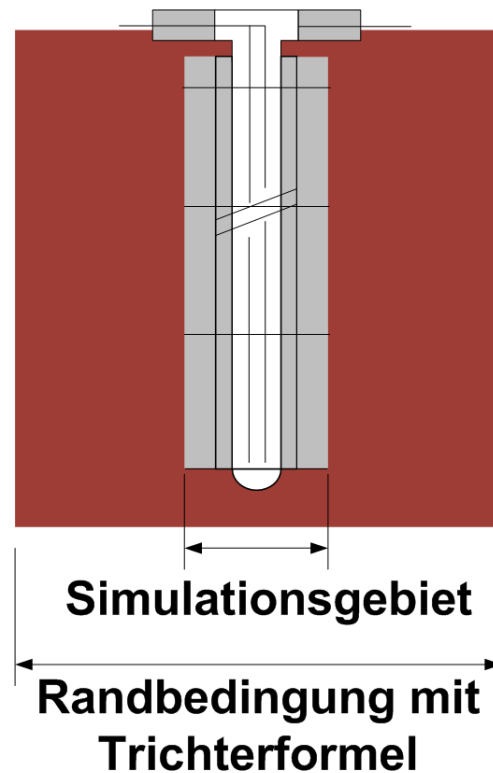


Abbildung 41: Schnitt durch TRNSYS Type 451 a (Modellierungsübersicht)

Nicholson-Verfahren beschriebenen Nahfeld (grau). Das durch g-functions abgebildete Fernfeld ist in diesem Schema rot-braun dargestellt.

Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse der vergleichenden Simulationsrechnung für den Anwendungsfall Heizen. Die Vorlauftemperatur (in der **Abbildung 42** blau dargestellt) bei +2 °C wurde für die gesamte Simulationszeit konstant gehalten. Die von TRNSYS berechnete Rücklauftemperatur aus der Sonde ist rot-gepunktet dargestellt. Nach einem anfänglichen Peak, der durch das Anfahren der Sonde aus der ungestörten Erdreichtemperatur herrührt, stellt sich nach 72 Stunden ein Wert von ca. 5,8 °C ein.

Die weiteren Kurven stellen Simulationsergebnisse des Sondenmodells erdsonde.bw dar, wobei sich die einzelnen Bezeichnungen wie folgt ergeben:

Die erste Zahl beschreibt die Anzahl der zur Berechnung verwendeten horizontalen Schichten, die Ziffer hinter dem Schrägstrich die Zonenzahl im Erdreich. 50/6 z.B. steht für 50 horizontale Schichten und eine Teilung des Erdreichs in 6 Zonen.

Die Modelle 50/1-50/3 (rot, hellblau, orange) zeigen eine schlechte Konvergenz mit den TRNSYS-Daten, während die Variante 50/4 das durch die Type 451 a prognostizierte Anfahrverhalten der Sonde am besten nachfährt.

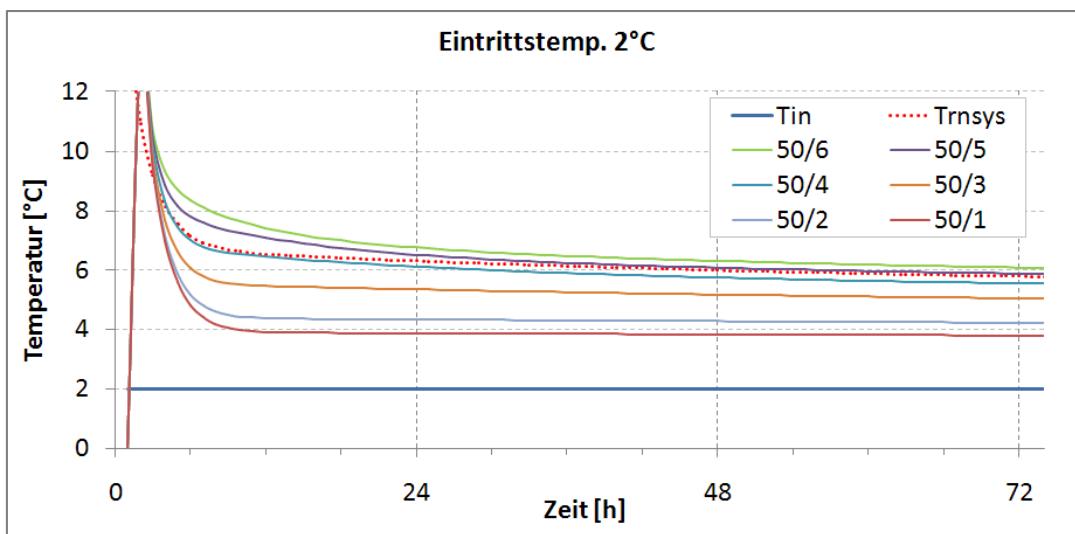


Abbildung 42: Modellvalidierung – Vergleich erdsonde.bw gegen TRNSYS (unterschiedliche Anzahl der Zonen in x,y-Richtung 50 Schichten in z-Richtung, mittlere Erdoberflächtemperatur: 17°C, Eintrittstemperatur: 2°C)

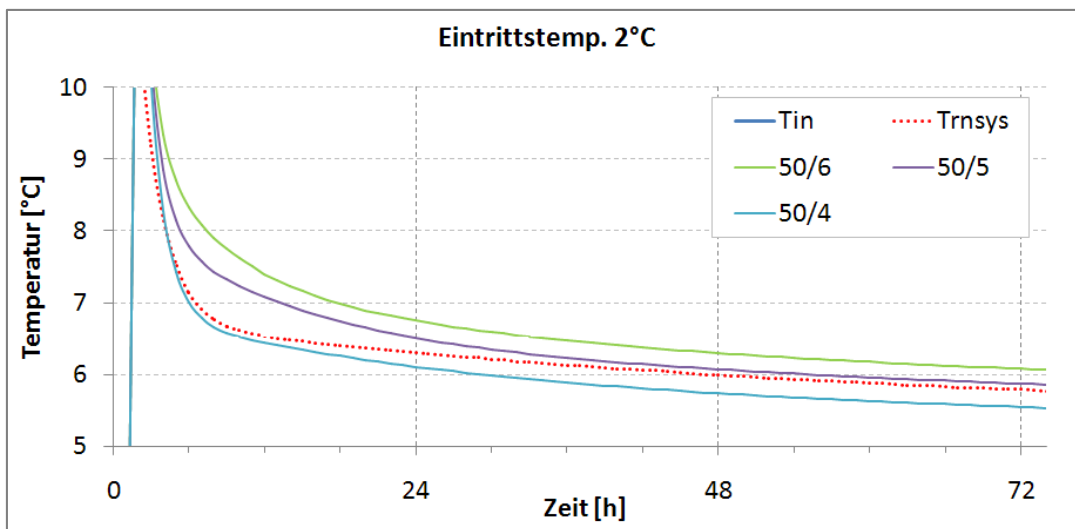


Abbildung 43: Modellvalidierung – Detail (vgl. **Abbildung 42**)

Wie in der Detailabbildung (**Abbildung 43**) erkenntlich liegt die Rücklauftemperatur der Variante 50/4 nach zwei Tagen deutlich unter dem des TRNSYS-Modells. Für den quasi-stationären Bereich nach 72 Stunden erreicht die erdsonde.bw-Variante mit fünf Zonen die beste Übereinstimmung mit der TRNSYS-Sonde. Auffällig jedoch ist, dass sowohl Variante 50/5 als auch 50/6 im dynamischen Bereich nach dem Anfahren der Sonde aus der Ruhe ein wesentlich trägeres Verhalten voraussagen als der Type 451 a.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit denen der Modellvalidierung (Abschnitt 7.2.3) muss diese Abweichung zwischen den Simulationsmodellen derart bewertet werden, dass der TRNSYS Type, obwohl mit Messwerten validiert, bei instationärem Wärmetransport Rücklaufemperaturen errechnet, die zu stark von der Eingangstemperatur und gegebenenfalls durch deren Schwankungen geprägt werden. Wenn durch weitere Vergleichsmessungen an anderen Anlagen sich das sehr träge Verhalten der Sondenanlagen erhärten sollte, prognostiziert erdsonde.bw Rücklaufemperaturen, die den tatsächlichen näher kommen als der Type 451 a.

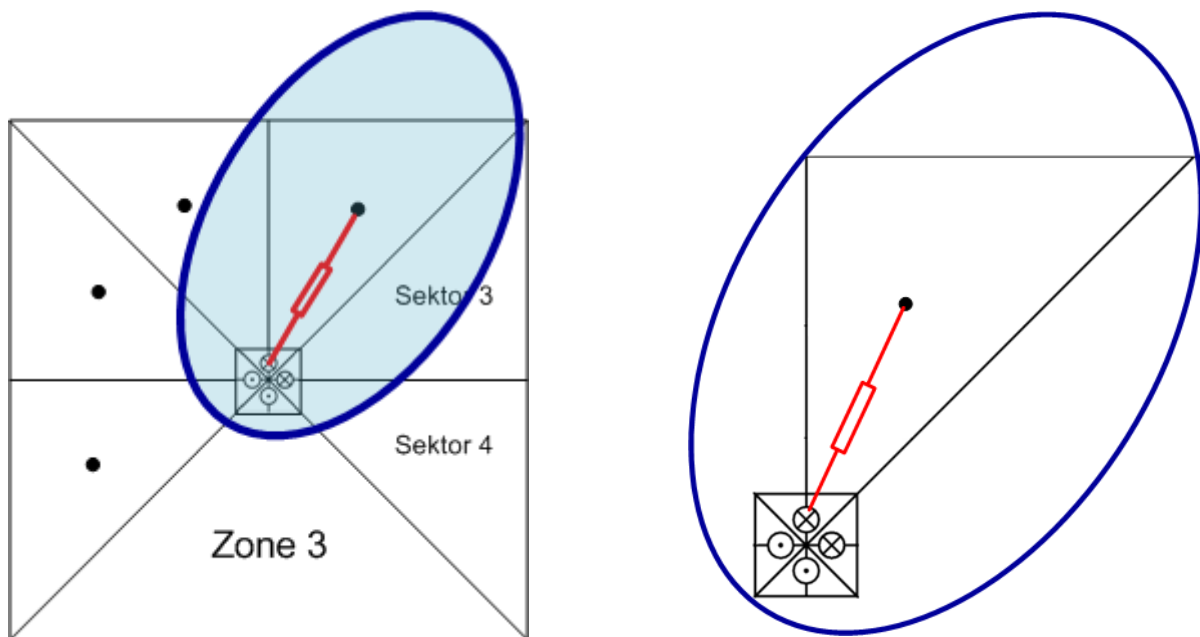


Abbildung 44: Grundriss der Modellgeometrie mit Teilung des Erdreichs in eine Zone (geometrisch bedingtes Anwachsen des thermischen Widerstandes zwischen Sonde und Erdreich)

Für das Verständnis der Modellbildung sind die Varianten 50/1-50/3 trotz der ungenügenden Deckung mit den TRNSYS-Daten durchaus nützlich, da sie das Zusammenwirken von thermischem Widerstand und Knotenkapazität des INSEL-Modells, wie in **Abbildung 44** und **Abbildung 45** dargestellt, herstellen. Ist das Erdreich, wie in **Abbildung 44** dargestellt, nur in eine Zone geteilt, könnte man annehmen, dass die große Kapazität dieser Erdreichknoten dazu führt, dass sich dieser Knoten isotherm verhält, da die übertragene Wärmeleistung praktisch keine Temperaturerhöhung dieser großen Kapazität bewirkt. Bei einer isothermen Randbedingung wird der Wärmestrom von oder zu der Sonde maximal, sodass für diesen Fall die höchste Rücklaufemperatur zu erwarten wäre.

Tatsächlich wird für diese Variante eine Rücklaufemperatur berechnet, die von allen dargestellten der Eintrittstemperatur am nächsten liegt.

Dies ist nur dann erklärbar, wenn neben der Kapazität des Knotens der Wärmewiderstand, der bis jeweils zum Schwerpunkt des Knotens gerechnet ist, mitberücksichtigt wird. Dieser ist wie in **Abbildung 44** zu sehen für den Fall einer Erdreichzone sehr groß und wird bei sechs Erdreichzonen (**Abbildung 45**) sehr klein. Der große Wärmewiderstand der Variante 50/1 bewirkt eine schlechtere thermische Anbindung der Sonde an das Erdreich. Der verminderte Wärmezu-/abfluss zu/von der Sonde verursacht, dass die Rücklauftemperatur dieser Variante stärker als bei den anderen gegen die Eintrittstemperatur konvergiert.

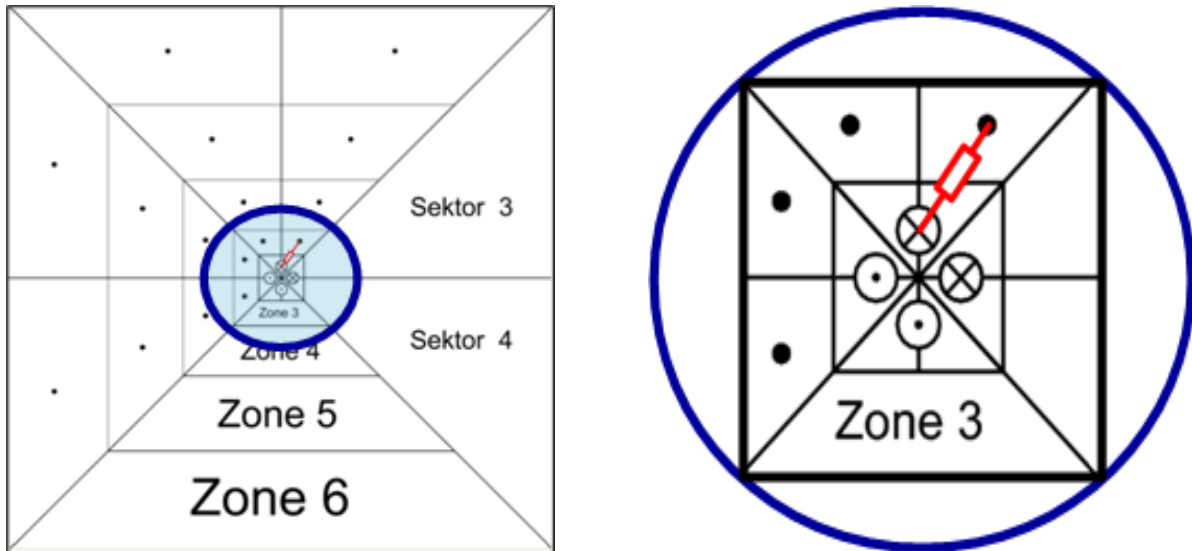


Abbildung 45: Grundriss der Modellgeometrie mit Teilung des Erdreichs in vier Zonen (geometrisch bedingtes Verkleinern des thermischen Widerstandes zwischen Sonde und Erdreich)

Abbildung 46 zeigt die Ergebnisse der vergleichenden Simulation für den Anwendungsfall nur Kühlen. Da sich die Kurvenverläufe verglichen mit dem reinen Heizfall spiegelbildlich verhalten, kann von einer ausreichenden Validierung dieser verschiedenen Betriebsmodi ausgegangen werden.

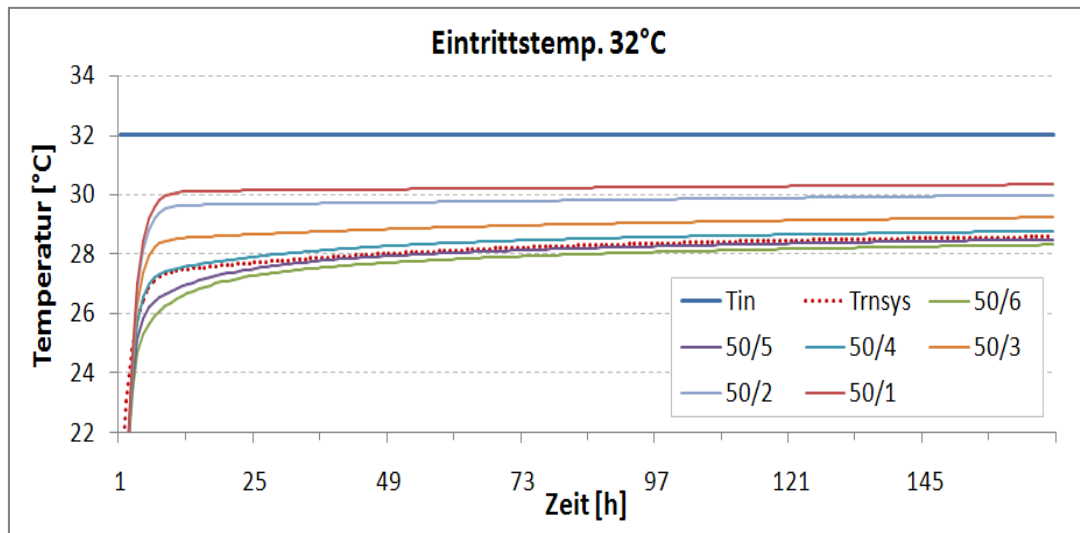


Abbildung 46: Modellvalidierung – Vergleich erdsonde.bw gegen TRNSYS (unterschiedliche Anzahl der Zonen in x,y-Richtung 50 Schichten in z-Richtung, mittlere Erdreichtemperatur: 17 °C, Eintrittstemperatur: 32 °C)

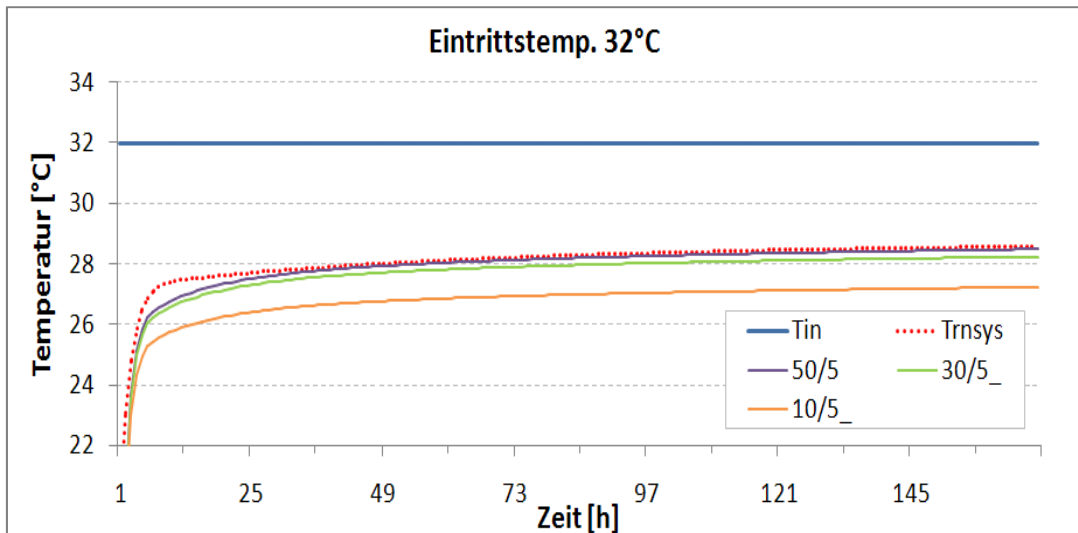


Abbildung 47: Modellvalidierung – Vergleich erdsonde.bw gegen TRNSYS (unterschiedliche Anzahl der Schichten bei konstant 5 Zonen in x,y-Ebene)

Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse für die Variation der Schichten bei gleichbleibender Zonenanzahl von fünf Erdreichzonen. Auffällig ist hier, dass eine Reduktion der vertikalen Auflösung des mathematischen Modells von ca. 40 % (von 50 auf 30 Schichten, grüne Kurve) kaum Einfluss auf die Abbildungsgenauigkeit hat. Die Reduktion auf 20 % der ursprünglichen Auflösung (orange Kurve) zeigt jedoch erhebliche Abweichungen in der berechneten Rücklauf-temperatur.

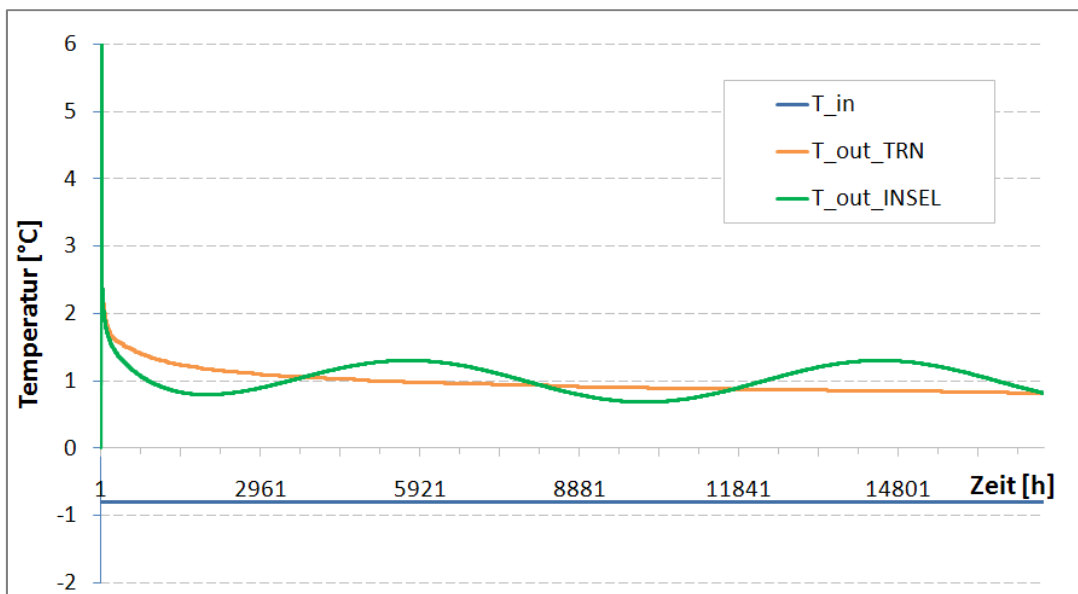


Abbildung 48: Eintrittstemperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich: 11 K , mittlere Erdreichtemperatur: 10,2 °C (Region Stuttgart) ganzjährig Heizen $T_{in} = T_{erde} - 11$ Kelvin

Bei der zweijährigen Simulation für Heizen wie in **Abbildung 48** dargestellt sollte der Einfluss der jahreszeitlich schwankenden Erdreichtemperatur der ersten 15 Meter unter Geländeoberkante auf die Rücklauf-temperatur untersucht werden. Die blaue Kurve ist die Eintritts-

temperatur in die Sonde, in Orange ist die berechnete Rücklauf­temperatur des TRNSYS Types 451 a dargestellt und in Grün die jahreszeitlich schwankende Kurve der Rücklauf­temperatur für erdsonde.bw. Da es sich bei dargestellter Simulation um keinen realen Lastfall handelt, da ganzjähriges Heizen hierzulande unüblich ist, ist vor allem die Temperaturverteilung im Winter (Stunden 1-3000) von Bedeutung. Die TRNSYS-Kurve prognostiziert hier eine günstigere Rücklauf­temperatur als erdsonde.bw, die den Einfluss der oszillierenden Bodentemperatur der oberen Schichten berücksichtigt.

Ähnlich verhält es sich mit dem in **Abbildung 49** dargestellten Kühlfall. Allerdings handelt es sich bei diesem Anwendungsfall eher um ein realistisches Szenario, da z.B. im Einzelhandel der Lebensmittelbranche ganzjährig gekühlt werden muss. Auch hier kann man in der Zeit, in der die Hauptkühl­last abgeführt werden muss (Sommer: Stunde 3500-6500), erkennen, dass die Vorlauf-/Rücklauf­spreizung bei der INSEL-Simulation deutlich geringer ausfällt.

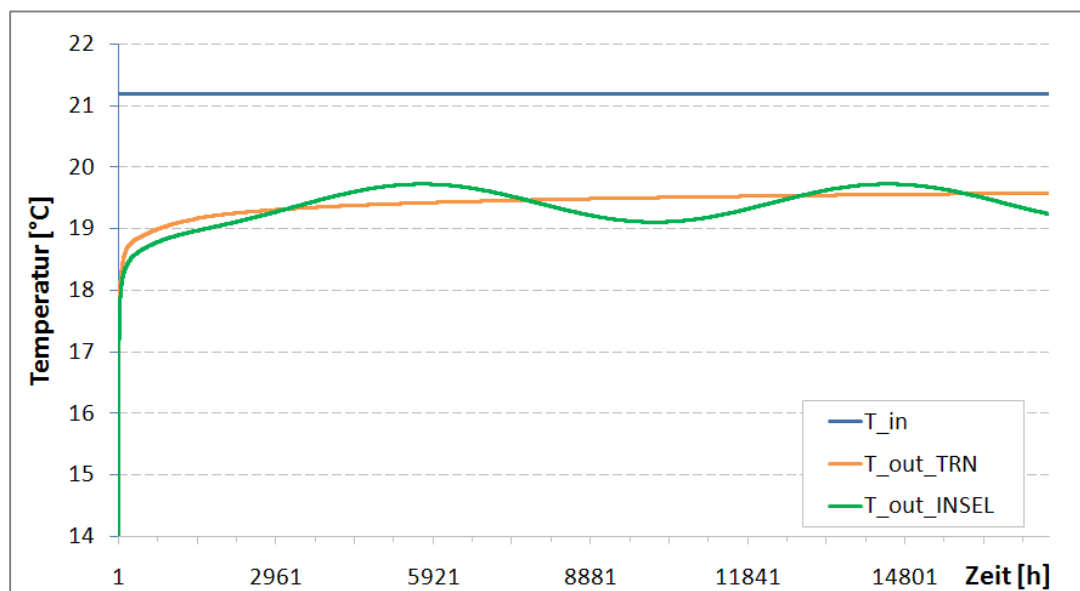


Abbildung 49: Modellvergleich – Eintrittstemperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich: 11 K , mittlere Erdreich­temperatur: 10,2 °C (Region Stuttgart) ganzjährig Kühlen $T_{in} = T_{erde} + 11$ Kelvin

In **Abbildung 50** dargestellt sind die Rücklauf­temperaturen für eine Vergleichssimulation mit wechselnder Last für TRNSYS und erdsonde.bw. Hierbei wurde über einen Zeitraum von zwei Jahren im halbjährigen Wechsel mit den nach VDI 4640 zulässigen maximalen/minimalen Vorlauf­temperaturen geheizt bzw. gekühlt (blaue Linie). Die maximale Vorlauf­temperatur für Kühlen liegt 11 K über der Jahresmitteltemperatur (für Stuttgart bei 10,2 °C), also bei 21,2 °C. Die minimale Eintrittstemperatur für die Heizanwendung liegt bei -0,8 °C. Im Schaubild orange dargestellt ist die Rücklauf­temperatur nach TRNSYS, grün die der erdsonde.bw. Besonders deutlich zu erkennen, dass im Kühlfall (Stunde des Jahres ca. 2000

bis ca. 6500) die simulierte grüne Kurve unter der orangenen liegt. Die kühleren Rücklauf-temperaturen der erdsonde.bw für den Kühlfall fußen auf mehreren Gründen. Zum einen könnte der Einfluss des Nahfeldes, das beim TRNSYS Type 451 a mit den g-functions genähert wird, einen größeren Effekt auf die Rücklauf-temperatur der Sonde haben, sodass es deshalb zwischen den beiden Simulationsmodellen zu Unterschieden kommt. Günstigere Rücklauf-temperaturen des INSEL-Modells können auch für den Heizfall beobachtet werden, was den Schluss nahe legt, dass die Beeinflussung des Sondennahfeldes durch die jahreszeitlich wechselnde Be- und Entladung des Erdreichs durch g-functions, die für den eingeschwungenen Zustand der Sonde ermittelt werden, nicht ausreichend genau abgebildet wird. Ein weiterer Grund für die differierenden Ergebnisse beider Simulationswerkzeuge könnte der zuvor beschriebene Unterschied in der Berücksichtigung jahreszeitlich schwankender Temperatur der oberflächennahen Erdreichschichten sein.

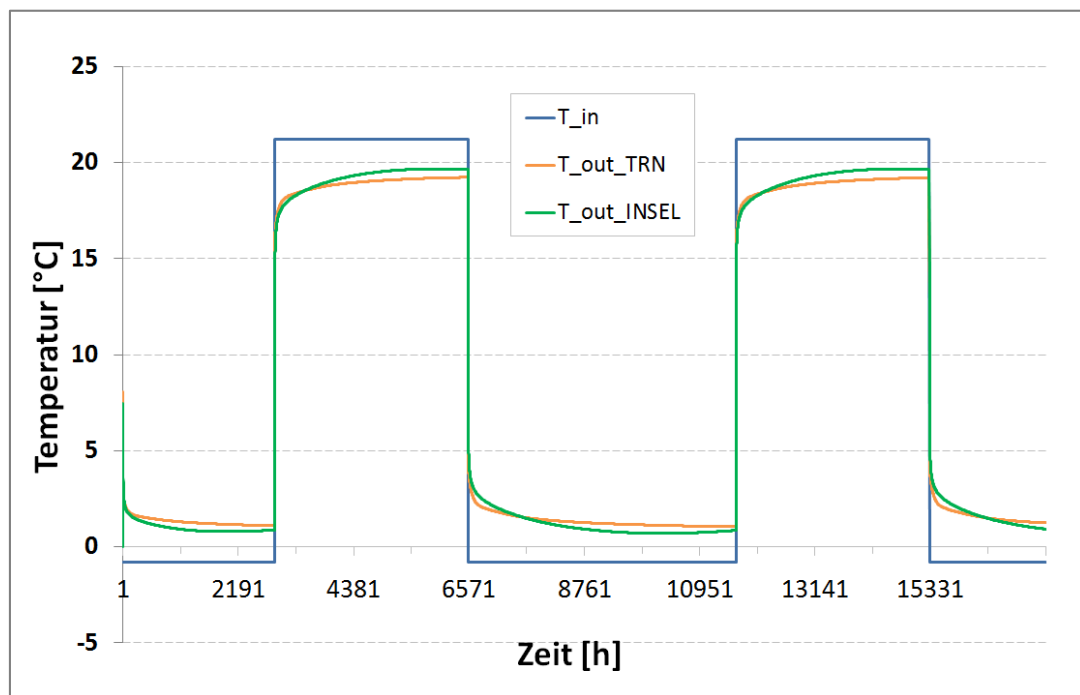


Abbildung 50: Modellvergleich – Eintrittstemperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich: 11 K, mittlere Erdreich-temperatur: 10,2 °C (Region Stuttgart) Heizen+Kühlen: 4320 h Heizen, 4320 h Kühlen pro Jahr

Die Unterschiede schlagen sich ebenfalls in ermittelten jährlichen spezifischen Energiemengen wie in **Abbildung 51** zu sehen nieder. Auch hier sind die Werte der INSEL-Sonde sowohl bei reinem Kühl-/Heizbetrieb als auch im kombinierten Betrieb (Heizen und Kühlen im Wechsel wie in **Abbildung 50**) höher als für den Type 451 a.

Angemerkt an dieser Stelle sei jedoch, dass trotz aller ermittelten Unterschiede die Ergebnisse der beiden Simulationsmodelle nicht derart differieren, dass nicht von einer guten Deckung der prognostizierten Austrittstemperaturen beider Modelle gesprochen werden könnte. Die Unterschiede sind unter Berücksichtigung der zuvor genannten Simulationstiefe erklärbar, sodass, da es sich beim Type 451 a um ein mit Messwerten validiertes Programm handelt, für die INSEL-Sonde im trockenen Betrieb von einem validen Programm ausgegangen werden kann.

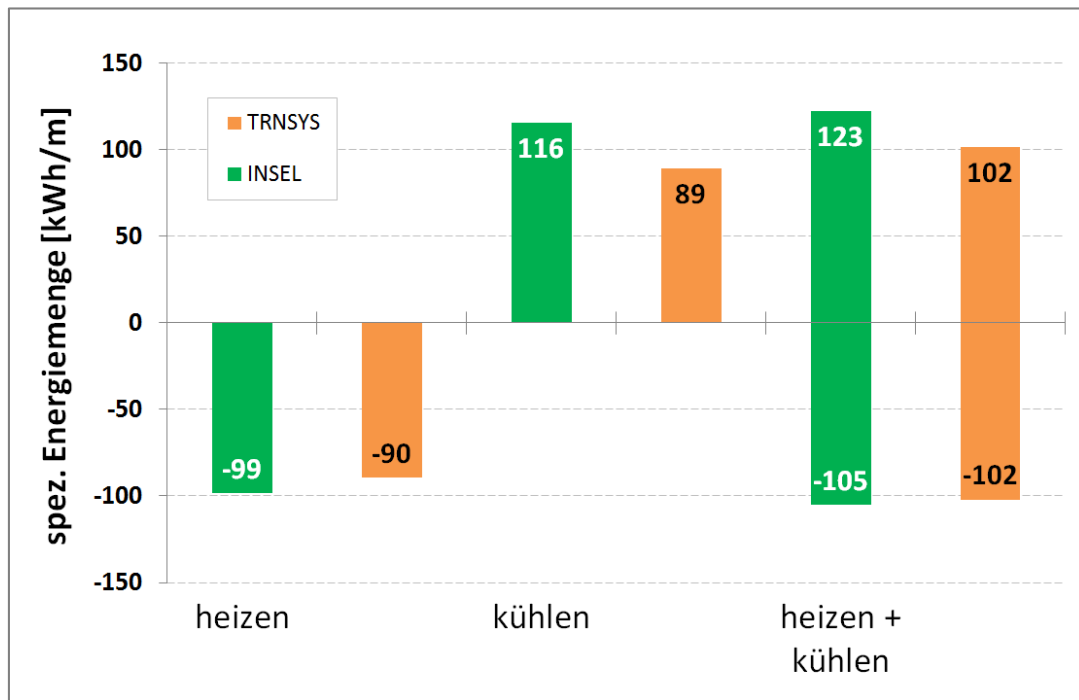


Abbildung 51: Jährliche Energiemenge beim Heizen, Kühlen und ganzjähriger Erdsondennutzung. Vergleich erdsonde.bw mit kommerziellem Planungstool TRNSYS Type 451 a

7.2.9 Langzeitstabilität von Sondenfeldern

Bei den Untersuchungen mit dem Simulationstool erdsonde.bw konnte wie zuvor beschrieben bereits festgestellt werden, dass sich nach zwei Jahren der thermischen Nutzung der Untergrund hinsichtlich seines Temperaturniveaus stabilisiert und kaum mehr verändert. Dieser Effekt wird auch in **Abbildung 52** deutlich, für dessen Erstellung die Simulation einer Anlage über einen Zeitraum von 10 Jahren erfolgte. Während die spezifischen Energiemengen zwischen dem ersten Jahr und dem zweiten noch etwas differieren, kann man ab dem zweiten Jahr bei gleichbleibender Beaufschlagung des Untergrundes von einem „eingeschwungenen“ Verhalten reden. Bei der untersuchten Variante kommt es somit zu keiner nennenswerten Degradation des Temperaturniveaus, das mit einer Leistungsminderung einhergehen würde. Aus anlagentechnischer Sicht genügt somit bei gleichbleibender Last die Simulation der ersten 2-3 Jahre um valide Daten für das Langzeitverhalten ableiten zu können.

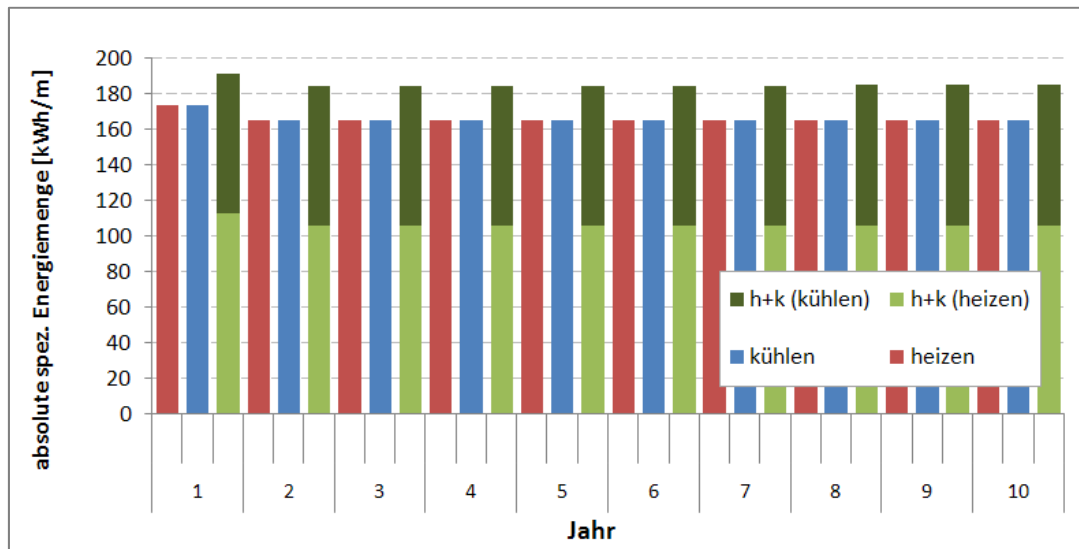


Abbildung 52: Langzeitstabilitätsanalyse mittels erdsonde.bw

7.2.10 Modellvalidierung am Versuchsaufbau VEGAS

Das weitere Vorgehen konzentrierte sich auf die Validierung des neu entwickelten Grundwassermoduls, das im Folgenden beschrieben wird.

Die Abbildungen 54/1-4 dokumentieren den Messaufbau in der Versuchshalle der VEGAS an der Universität Stuttgart am Standort Vaihingen. Die beiden oberen Abbildungen zeigen die Montage der Messtechnik an den abzutäufenden Erdwärmesonden (oben links). Gleich rechts daneben der Sondenkopf der Erdwärmesonde vier vor der Einbringung in die Quarzsandschüttung. Unten links eine Draufsicht auf den Versuchsbehälter mit Bohrgerät (Raupefahrzeug). Rechts unten Behälterabschnitt für die Grundwasserströmungsmessungen mit benachbartem Behältersegment mit einem anderen Messaufbau.

Das Behältersegment, das zur Grundwasserströmungsuntersuchung zur Verfügung steht, hat folgende Abmessungen:

- Länge 9,00 m
- Breite 6,00 m
- Höhe 4,50 m

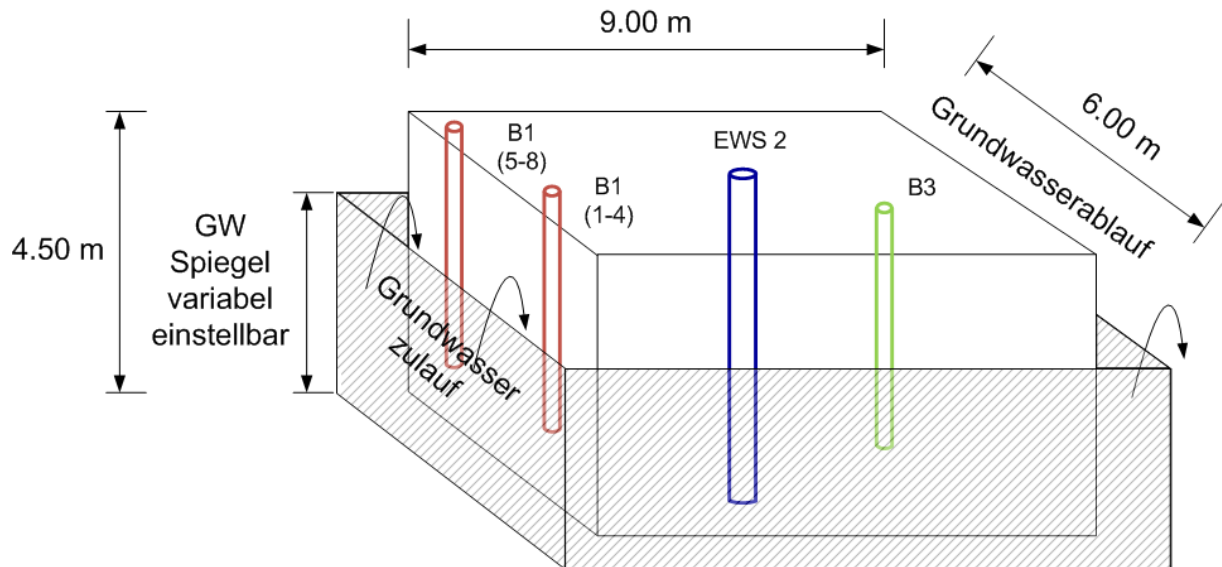


Abbildung 53: stark vereinfachtes Schema des Versuchsbehälters mit ausgewählten Messstellen

In **Abbildung 53** zu sehen ein Schema der Versuchsanlage an der Universität Stuttgart. Der eigentliche Behälter mit der Quarzsandschüttung ist in der Bildmitte als transparenter Quader dargestellt. Exemplarisch sind im Quader zwei Messlanzen zur Bestimmung des Temperaturprofils am Grundwasserzulauf (rot) dargestellt ($B1_{(1-4)}$ und $B1_{(5-8)}$), sowie eine der vier Erdwärmesonden (EWS 2) in Blau und die zur Validierung des Modells verwendete Messstelle B3 in Grün. Die Grundwasserfließgeschwindigkeit wird über die Zu- und Ablaufhöhe des Wasserspiegels links wie rechts des Versuchsaufbaus (schraffierter Bereich) geregelt. Das Wasser des simulierten Grundwasserflusses speist sich aus einem großen Behälter in Technikräumen unter dem eigentlichen Versuchsaufbau mit nahezu konstanter Temperatur von ca. 17 °C.



Abbildung 54: Messaufbau an der Universität Stuttgart Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Alllastensanierung (VEGAS)

Ein Grundriss des Versuchsaufbaus kann **Abbildung 55** entnommen werden. Die blau markierten Sonden wurden ca. 4 m unter Behälteroberkante in die Quarzsandschüttung abgetäuft. Die rot-orange markierten Messlanzen wurden hingegen nicht durch ein Bohrverfahren eingebracht, sondern eingerammt. Die vertikale Auflösung der Messpunkte kann der **Abbildung 56** entnommen werden. Ebenfalls ersichtlich aus dieser Abbildung die vertikale Schichtung der Quarzsandschüttung. Alle Schichten sind hinsichtlich des eingesetzten Materials identisch und unterscheiden sich ausschließlich in der Körnunggröße.

Für die in **Abbildung 55** grün hinterlegte Messstelle B3 stellt sich am 21.05.2011 nach vierwöchiger Messung und Simulation das dargestellte Temperaturprofil ein (**Abbildung 56**).

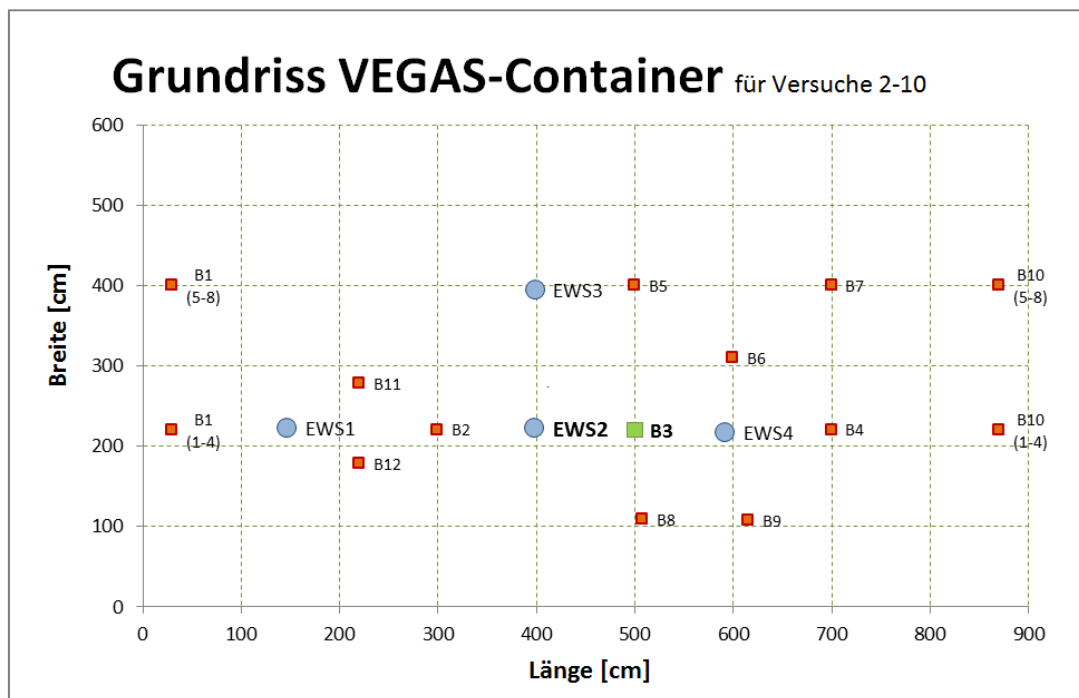


Abbildung 55: Grundriss des VEGAS-Versuchscontainers (Validierung Grundwassermodul erdsonde.bw)

VEGAS-Containerversuch

Vertikale Temperaturverteilung an der
Messstelle **B3** am 21.05.2011 13:21:04

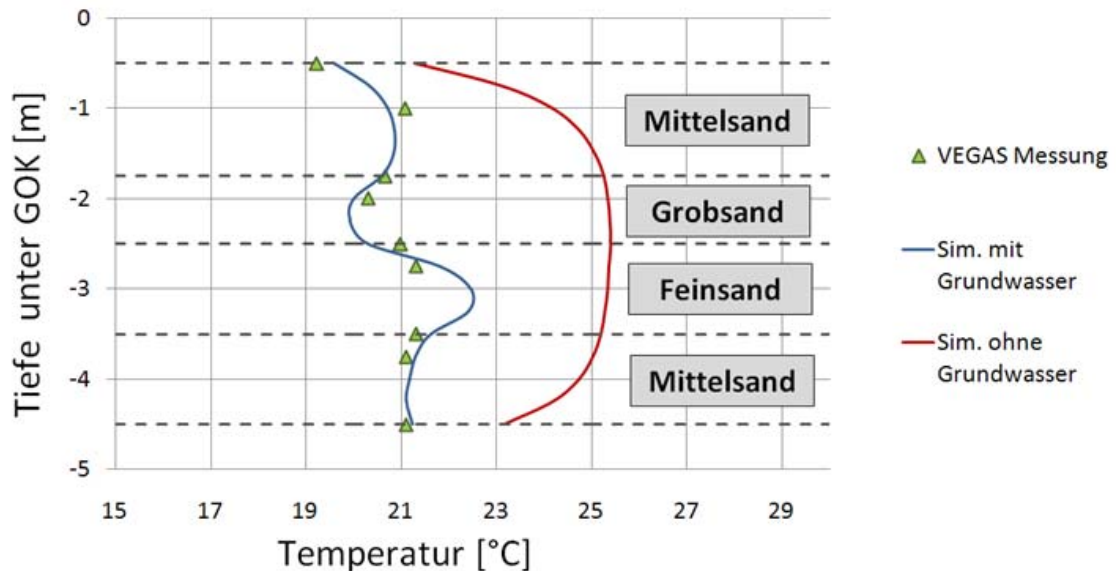


Abbildung 56: Gemessenes und simuliertes Temperaturprofil an der Messstelle B3

Zum Vergleich kommen bei der **Abbildung 56** zum einen die diskret erfassten Messpunkte (grüne Dreiecke) und die über die Tiefe kontinuierlich ermittelte simulierte Temperaturverteilung in Blau. Zusätzlich wurde eine Simulation ohne Grundwasserströmung durchgeführt und mit in den Graphen geplottet (rot). Ziel der Verteilung der Messpunkte war es in jeder Quarzsandschicht zwei Messpunkte zu erhalten, was sich aber bei dem gewählten Einbringverfahren als schwierig erwiesen hat, sodass in der Feinsandschicht, in der die simulierte Kurve die höchsten Temperaturwerte prognostiziert, ein zusätzlicher Messpunkt in der Mitte der Schicht hilfreich wäre, um den Fehler, ähnlich wie in der oberen Mittelsandschicht, abschätzen zu können. Hiervon abgesehen sind simulierte und gemessene Werte gut zur Deckung gebracht, sodass vor allem auch im Vergleich mit der Messung ohne Grundwassereinfluss von einer guten Übereinstimmung vom gewählten Grundwasseralgorithmus und den realen Verhältnissen im Boden ausgegangen werden kann.

Die im Projekt entwickelten Softwarebibliotheken sind open source und werden nach dem Ende der Projektlaufzeit allen interessierten Nutzern unentgeltlich zur Verfügung gestellt.

7.2.11 Simulationsmodelle und -grenzen

Simulation stellt in der Regel eine mathematische Näherung realer physikalischer Vorgänge dar. Um der Realität ein mathematisches Modell gegenüberstellen zu können, welches die wesentlichen Effekte wie Stoff- und/oder Energieströme sowie Temperaturverteilungen realistisch abbildet, müssen die wesentlichen von den untergeordneten Einflüssen getrennt werden. Mathematische Modellbildung beinhaltet daher naturgemäß Vereinfachungen und Schematisierung. Der Grad der Vereinfachung wiederum bestimmt den Rahmen innerhalb dessen simuliertes und reales System zur Deckung gebracht werden können. Wird die Geothermieanlage als Teil der Gebäudetechnik simuliert, um bei wechselnden Lasten das Verhalten der Anlagenkomponenten prognostizieren zu können, müssen dynamische Wärmeleitprozesse mit abgebildet werden. Simulationsmodelle, die auf den Arbeiten Eskilsons aufbauen, wie der Earth Energy Designer (EED) oder das teilnumerische Simulationsprogramm EWS (Erdwärmesondenprogramm) bedienen sich der dimensionslosen g-Functions zur Berechnung des Fernfeldes (EWS) oder des gesamten Simulationsgebietes (EED). Der Nahbereich der Sonde, der im TRNSYS Type 451 a wie im EWS-Programm durch ein eindimensionales Crank-Nicholson-Verfahren numerisch genähert wird, bildet die zweidimensionale Sondengeometrie innerhalb eines Berechnungshorizontes nicht ab. Um betriebsbegleitende Simulationen von Sondenfeldern in porösen Grundwasserleitern durchführen zu können, müssen Energiebilanzen für das Feld als Ganzes (dreidimensional) oder zumindest zweidimensional innerhalb eines Berechnungshorizontes gelöst werden. Hierzu ist es zweckmäßig die zwei- bzw. dreidimensionale Temperaturverteilung um die Sonde abzubilden, um in einem zweiten Schritt den Temperaturein- bzw. austrag durch Grundwasserströmung darstellen zu können. Der konvektive Anteil an der Gesamtenergiebilanz ist nicht unerheblich [36]. Mit dem entwickelten Modell steht somit ein numerisches Simulationswerkzeug zur Verfügung, das auf Basis finiter Differenzen die Temperaturverteilung im Erdreich auch bei wechselnden Lasten bzw. dynamischen Wärmeströmen innerhalb der Modellgrenzen ausreichend genau beschreibt. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass der zur Grundwassersimulation verwendete Algorithmus innerhalb der im Erdreich zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeit von wenigen Metern pro Tag hinreichend genau die physikalischen Verhältnisse abbildet. Bei Strömungsverhältnissen, wie sie in offenen Grundwasserleitern anzutreffen sind, z.B. im klüftigen Untergrund, stößt das Modell an seine Grenzen, sodass für diese Bodenverhältnisse keine aussagekräftigen Prognosen mit der Software angestellt werden können.

7.3 Wärmetechnische Untersuchung an Erdsonden

7.3.1 Experimentelle Untersuchungen an der Pilotanlage in Stuttgart-Vaihingen

Das zafh.net verfügt über eine Versuchsanlage einer thermischen Absorptionswärmepumpe/Kältemaschine mit zwei Erdsonden von 80 m Tiefe.

Die Pilotanlage wird als Kältemaschine zur Temperierung eines Laborraumes über Umluftheiz-/kühlgeräte eingesetzt. Die installierte Messtechnik ermöglicht eine detaillierte Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Rückkühlungskombinationen. Insbesondere durch die Koppelung der Geothermiesonden mit dem bereits vorhandenen Kühlturm, der bis dato für die gesamte Rückkühlung der Anlage genutzt wurde, ergeben sich für die experimentelle Untersuchung dieser Anlage die in **Abbildung 62** dargestellten Varianten. Die Gliederung der Berichterstattung für dieses Arbeitspaket folgt dem chronologischen Ablauf der Bautätigkeiten. Somit werden zunächst kurz die bereits vorinstallierte Messtechnik und der Bauablauf der erstellten Anlagengewerke beschrieben, um dann zu den neu erstellten Komponenten überzugehen.

Die Erdsonden haben einen Abstand von 6 m und damit gleichartige geologische Randbedingungen. Verfüllt wurde eine Erdsonde mit einem üblichen Verfüllmaterial aus Bentonit-Zement, während die andere mit thermisch verbessertem Hochleistungsmaterial verfüllt wurde. Von Interesse hierbei ist die Auswirkung auf die thermische Entzugsleistung der Erdsonden in Abhängigkeit der Hinterfüllung in Bezug auf kurzzeitige Lastspitzen sowie den mittleren Jahresertrag.

Die Erdsonden sind in ein System mit einer rein thermisch angetriebenen Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen eingebunden, sodass sie sowohl als Wärmequelle (im Heizbetrieb) als auch Wärmesenke (im Kühlbetrieb) Verwendung finden. Die Wärmebilanz thermischer reversibler Wärmepumpen unterscheidet sich deutlich von den üblichen elektrischen Systemen: Aufgrund niedriger Leistungszahlen ist die Sondenentzugsleistung im Verhältnis zur Antriebsleistung geringer als bei elektrischen Systemen und im Sommer dagegen die Rückkühlleistung höher. Der Einfluss dieser Verschiebung auf den Untergrund soll in Arbeitspaket „Untersuchung der Pilot-Anlage Stuttgart-Vaihingen“ im Langzeitversuch untersucht werden. Da die Erdsonden des zafh.net aus dem Regelbetrieb ausgekoppelt werden können, sind Parameterstudien unter definierten Randbedingungen möglich.

Beschreibung der bestehenden Anlagenteile

7.3.1.1 Die Erdsondenanlage

Nach der Erteilung der Bohrgenehmigung für die Erdwärmesonden durch das Umweltamt der Stadt Stuttgart und das Universitätsbauamt Stuttgart wurden im Juni 2007 zwei Sonden mit einer Länge von je 80 m hergestellt (siehe **Abbildung 57**).



Abbildung 57: Bohrarbeiten zur Herstellung der Erdwärmesonden

Um den Einfluss der Bohrlochverfüllung auf die Leistungsfähigkeit der Erdsonden untersuchen zu können, wurden die beiden Sonden unterschiedlich verfüllt – die eine mit einer Standardverfüllmasse aus Bentonit und Zement, die andere mit einer Hochleistungsverfüllmasse mit hohem Quarzanteil. Die entsprechenden Nennwärmeleitfähigkeiten der beiden Verfüllmassen liegen bei ca. 0,8 W/m.K und 2,0 W/m.K. Das detaillierte Bohrprofil der beiden Sonden mit der Aufschlüsselung der anstehenden Gesteine unter Geländeoberkante sowie die ermittelten Grundwasserhorizonte für die Bohrabschnitte können Anhang A (Erdsondenausbau – Vaihingen) entnommen werden.

7.3.1.2 Die Kältemaschine

Das Arbeitsprinzip der DAKM, die an der Hochschule für Technik entwickelt wird, kann **Abbildung 58** entnommen werden. Im Wesentlichen gliedert sich der Anlagenprozess in fünf Stoffzyklen, von denen der Kältemittel-, der Hilfgas- und der Lösungsmittelkreislauf innerhalb

des Aggregats in direktem Kontakt zueinander stehen, während der Solarkreislauf über einen Wärmetauscher die zum Betrieb der Anlage notwendige thermische Leistung liefert und ein nasser Kühlturm die Rückkühlung der Anlage sicherstellt. Das verwendete Kältemittel dieses Prototyps ist Ammoniak (NH_3). Im Verdampfer wird das flüssige Kältemittel unter Aufnahme der Wärme Q_0 verdampft. Diese Wärme stellt die Nutzkälte der DAKM dar. Sie wird dem Gebäude entzogen. Die für den linksläufigen thermodynamischen Kreisprozess notwendige Trennung in einen Kondensationsbereich (Hochdruck) und einen Niederdruckbereich wird durch den zirkulierenden Hilfsgaskreislauf (Helium) ohne mechanische Drosselung erbracht. Der Kältemitteldampf wird im Absorber von der Ammoniak-Wasser-Lösung (NH_3 -arme Lösung) absorbiert. Die freiwerdende Absorptionswärme Q_A wird an die Wärmesenke (hier: Kühlturm) abgegeben. Die NH_3 -angereicherte Lösung wird im Lösungswärmetauscher vorgewärmt und im Austreiber durch Zufuhr von Antriebswärme Q_H zum Sieden gebracht. Dabei wird das Kältemittel ausgetrieben. Das NH_3 kondensiert bei hohem Druck, dabei wird die Kondensationswärme Q_K an die Wärmesenke (Kühlturm) abgegeben.

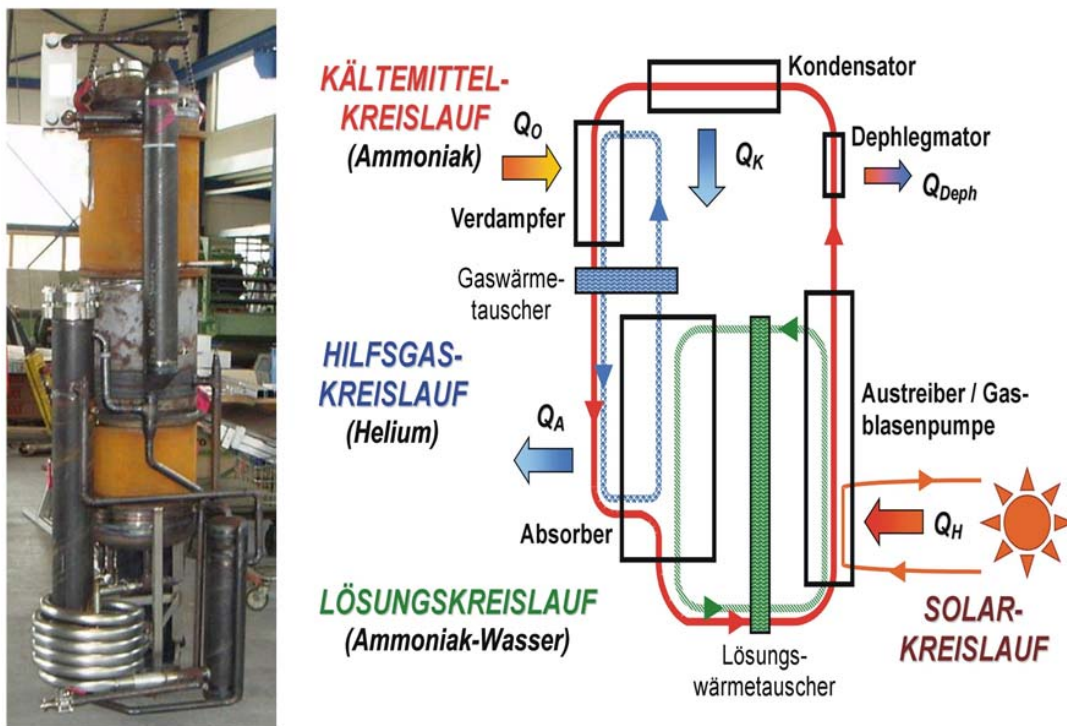


Abbildung 58: Prototyp und Prozessschema des DAKM

Die Rückkühlung der Anlage nur über den Kühlturm oder ausschließlich über die Sonden bzw. der kombinierte Betrieb beider Rückkühlwerke (parallel/seriell) ist mit der erfolgten Einbindung der Geothermieanlage möglich.

7.3.1.3 Zusätzliche Komponenten

Zum jetzigen Stand des Anlagenausbaus wird der Generator der DAKM mit einer elektrischen Heizung betrieben und die Rückkühlung mit einem offenen Nasskühlturm realisiert (siehe **Abbildung 59** und **Abbildung 60**). Die verwendeten Bauteile sind in Anhang A (Komponenten) aufgeführt.

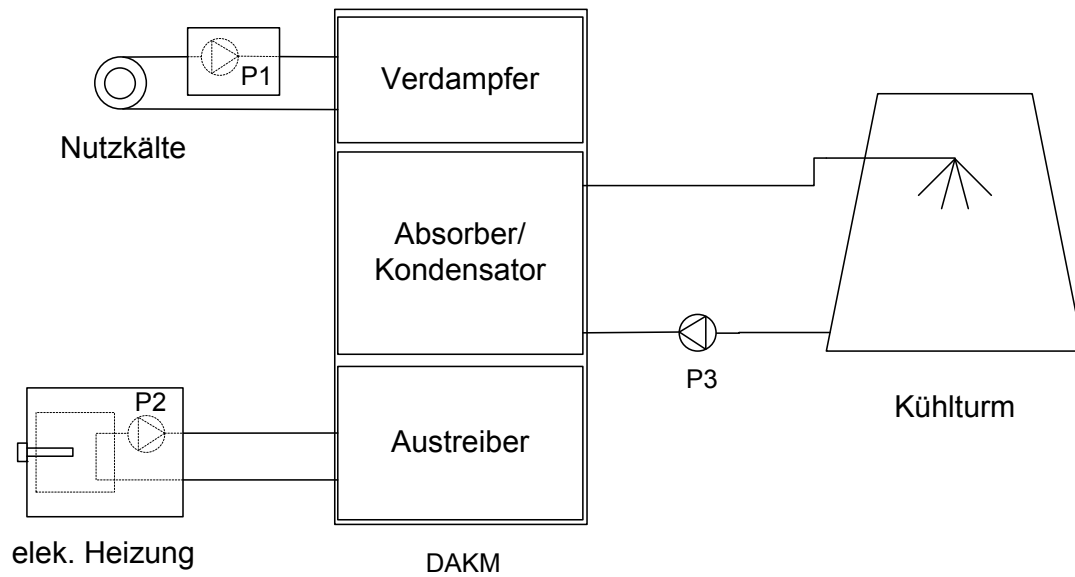


Abbildung 59: Schema der bestehenden Anlage



Abbildung 60: elek. Heizung (links), Kühlturm (Mitte), Fan coils (rechts)

7.3.2 Integration der Geothermieanlage in den Rückkühlkreis der DAKM

7.3.2.1 Erweiterung der Hydraulik

Die Hydraulik der bestehenden Anlage wurde erweitert, um die Erdwärmesonden im Rückkühlkreis der DAKM zu integrieren (siehe **Abbildung 61**). Da es sich beim bestehenden Kühlturm um ein offenes System mit Wasser als Kühlmittel handelt, die Erdwärmesonden jedoch als ein geschlossenes System mit einem Wasser-Glykolgemisch als Wärmeträger realisiert

wurden, ist ein zusätzlicher Wärmetauscher notwendig. Vorgaben für die Hydraulikauslegung sind die in 7.3.2.2 genannten vier Rückkühlvarianten.

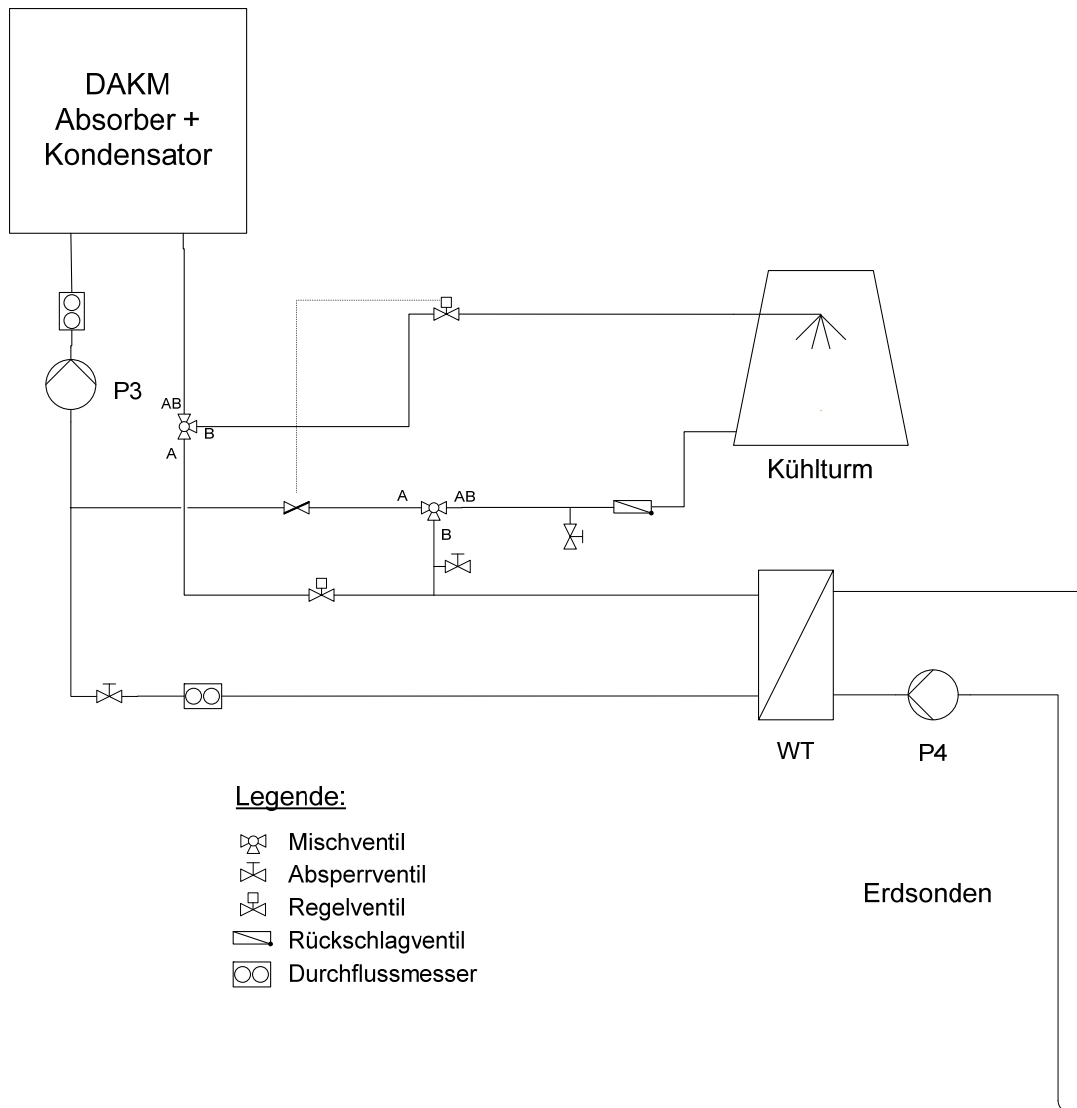


Abbildung 61: Hydraulikschema der Rückkühlkreis

7.3.2.2 Rückkühlungsvarianten

Durch die Verschaltung der beiden Rückkühlkomponenten werden die in **Abbildung 62** dargestellten Rückkühlvarianten möglich.

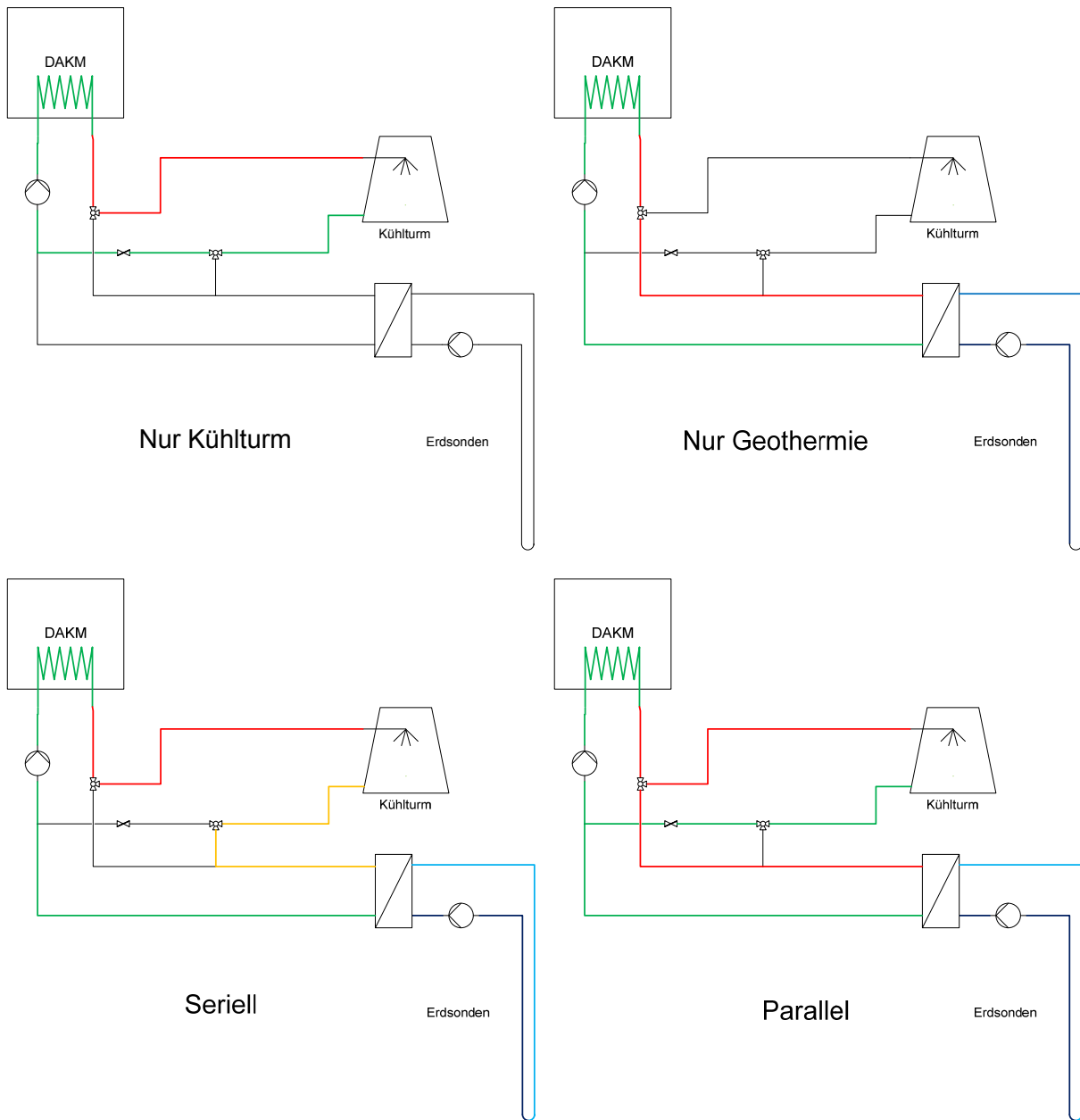


Abbildung 62: Rückkühlungsmöglichkeiten

7.3.3 Messtechnik

Das bestehende Kälteaggregat war bereits mit Sensoren ausgestattet. Zusätzliche Sensoren wurden installiert, um Temperaturen und Volumenstrom im Rückkühlkreis erfassen zu können (siehe **Abbildung 63**).

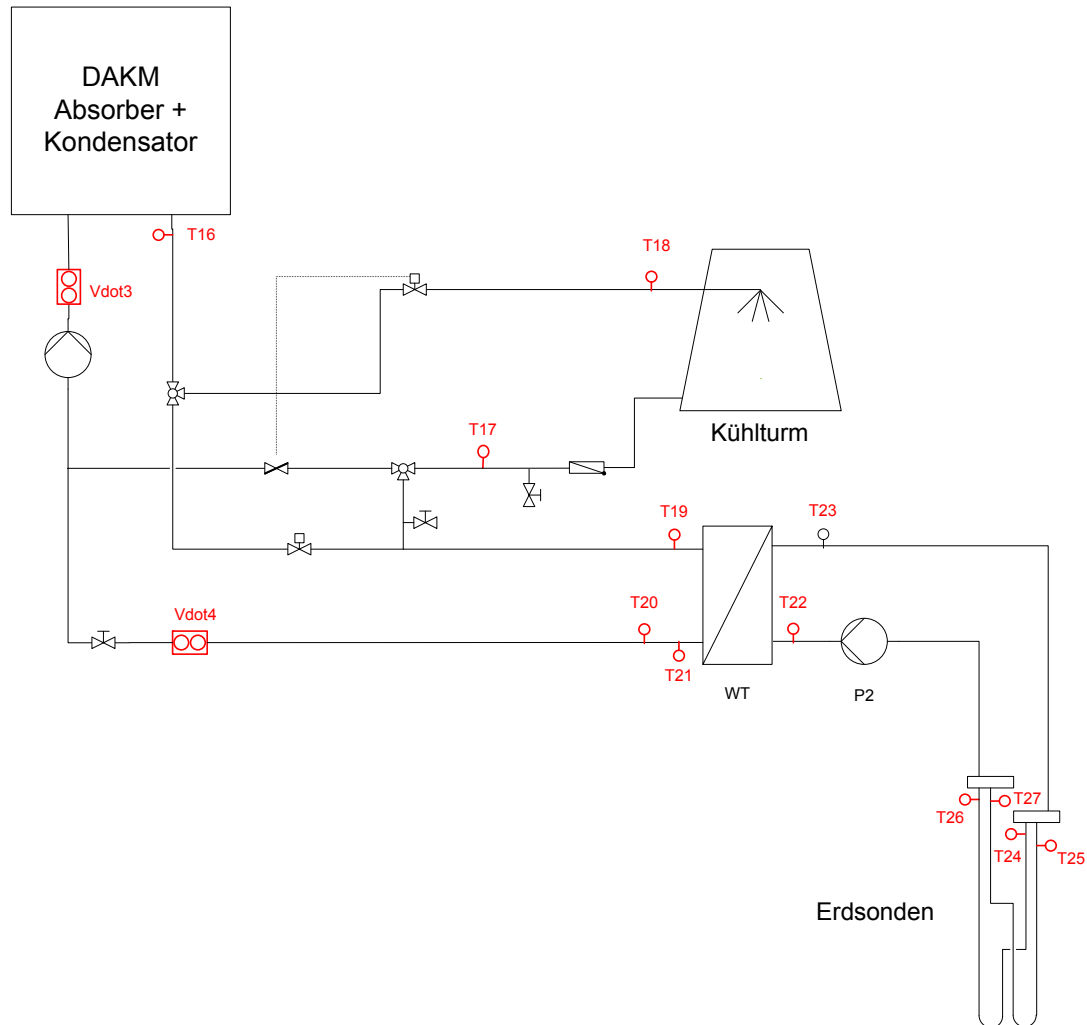


Abbildung 63: Messtechnik

Die Signale der Sensoren werden mit einem Messdatenscanner des Typs 34970 A der Firma Hewlett Packard (siehe Anhang A - Sensoren) erfasst und über eine RS 232 Schnittstelle an einen PC übertragen. Der Bezug und die Art der verwendeten Sensoren sind in Anhang A aufgeführt.

7.3.4 Zusammenstellung der bisher erfolgten Messungen

7.3.4.1 Geothermieanlage

Nach dem Anschluss der Sonden an den Sammler im Technikraum der Versuchshalle wurden mehrere Thermal Response Tests (TRT) durchgeführt. Hierfür wurde jeweils eine Sonde vom Kreislauf abgesperrt und die andere mithilfe eines Temperiergerätes mit konstantem

Volumenstrom (26.5 l/min) und einer konstanten Heizleistung (3 kW) beaufschlagt. Siehe Tabelle 4 und Abbildung 64.

Tabelle 4: Thermal-Response-Test

Datum	Sonde 1	Sonde 2
17.06.2008 - 24.06.2008 (7 Tage)	X	
24.06.2008 - 02.07.2008 (8 Tage)		X
02.07.2008 - 09.07.2008 (7 Tage)	X	
09.07.2008 - 16.07.2008 (7 Tage)		X

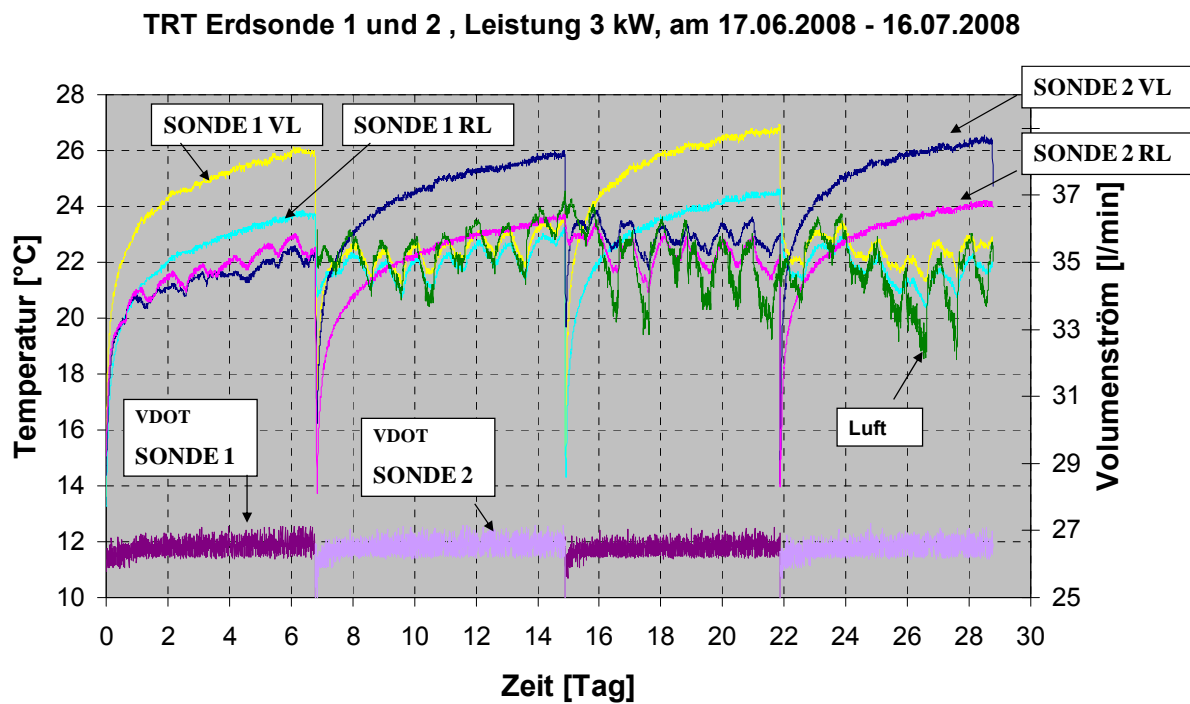


Abbildung 64: Temperaturverlauf der TRT

7.3.4.2 Diffusions-Absorptions-Kältemaschine

Die DAKM wurde in verschiedenen Betriebsmodi gemessen (siehe **Abbildung 65**).

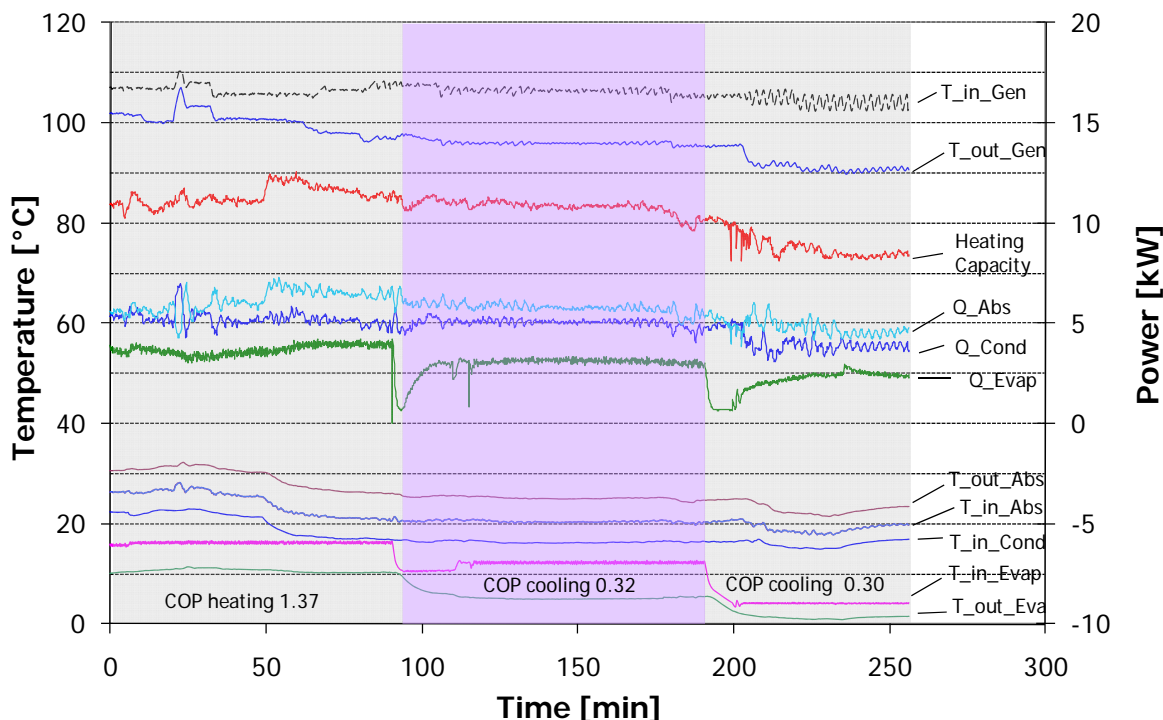


Abbildung 65: Messungen der DAKM im Kühl- und Heizmodus

Bei normalen Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur 25-35 °C und relativer Luftfeuchtigkeit 40-80 %) liegt die Kälteleistung der DAKM zwischen 2 und 5 kW für Antriebstemperaturen zwischen 100-140 °C. Die Leistungszahl liegt hierbei zwischen 0,2 und 0,4.

7.3.5 Geothermie & DAKM

Aus energetischer Sicht ergeben sich zwei Vorteile für die Kopplung von thermisch getriebenen Kältemaschinen und Erdwärmesonden als Rückkühlung. Erstens liegt die ungestörte Erdreichtemperatur vor allem im Sommer tiefer als die Umgebungstemperatur (bzw. die Feuchtkugeltemperatur der Umgebungsluft), wodurch sich niedrigere Rücklauftemperaturen durch die Nutzung von Sonden erzielen lassen. Als Konsequenz hieraus stellt sich neben einer Verbesserung der Energy-Efficiency-Ratio (EER) auch eine Leistungserhöhung der Kältemaschine ein. Der zweite Grund, der für die Verwendung von Sonden zur Rückkühlung spricht, ist der geringe Anteil an benötigter elektrischer Hilfsenergie im Vergleich zu konventionellen Kühltürmen Eicker 2012 [15]. Bedingt ist dies durch den Umstand, dass Erdwärmesonden mit nur einer Umwälzpumpe betrieben werden können, während Kühltürme zusätzlich Leistung für den Ventilatorbetrieb aufnehmen.

Die verschiedenen hydraulischen Verschaltungen, wie im Abschnitt 7.3.2.2 dargestellt, wurden experimentell untersucht (siehe **Tabelle 5**)

Tabelle 5: Rückkühlung Messungen

Datum	Seriell	Parallel	Nur Geothermie
16/02/2012	X		
29/02/2012			X
06/03/2012	X	X	
15/03/2012	X	X	

Im laufenden Betrieb der DAKM müssen durch die Rückkühlung ca. 15 kW_{th} aufgenommen werden, wodurch der Betrieb ohne Kühlturm (nur Sonden) nur für kurze Zeit „gefahren“ werden konnte, da die maximale Kühlleistung der Sonden bei nur 8 kW_{th} liegt.

7.3.6 Annahmen für die Vergleichsrechnung

Die verwendete Umwälzpumpe im Geothermiekreis hat eine Nennleistung von 1.5 kW_{el}. Für die Messung am 29.02.2012 ist das Verhältnis von eingesetzter Hilfsenergie pro Kilowatt abgeführter Rückkühlleistung im besten Fall 115 W_{el}/kW_{th}. Dies ist aus unterschiedlichen Gründen unverhältnismäßig hoch:

- Die Leitungslänge vom Wärmetauscher an der DAKM bis zu den Erdwärmesonden ist aufgrund der baulichen Gegebenheiten sehr lang. Deshalb ist der Druckverlust viel höher als im Normalfall.
- Die verwendete Solepumpe ist überdimensioniert.

Gewöhnlich sollte dieser Wert viel geringer sein. Eicker 2012 [15] errechnete Werte von weniger als 3 W_{el}/kW_{th} für 120 m tiefe Erdwärmesonden mit einer konstanten spezifischen Übertragungsleistung von 30 W/(m-Sonde). Allerdings wurde bei diesen Berechnungen nur der Druckverlust in den Sonden berücksichtigt. Wenn der Druckverlust in den Zuleitungen und dem Wärmetauscher mit einbezogen werden, sollte ein konservativer Wert von 6 W_{el}/kW_{th} angenommen werden. Um die Sonden mit konventionellen Kühltürmen vergleichen zu können, müssen Leistungswerte für offene nasse Kühltürme herangezogen werden. In Anlehnung an DIN 18599 Teil 7 können Werte zwischen 18-30W_{el}/kW_{th} für die Rückkühlung angenommen werden. Für die hier erfolgte Berechnung wurde ein mittlerer Wert von 25 W_{el}/kW_{th} angesetzt (siehe **Tabelle 6**).

Tabelle 6: Spezifischer Stromverbrauch bei Nennleistung

Rückkühlwerk	Stromverbrauch (W_{el}/kW_{th})
Nasser Kühlturm	25
Erdwärmesonden	6

Wenn der Ventilator des Kühlturms drehzahlregelt ist, kann dieser Wert reduziert und mit folgender Formel genähert werden:

$$P_{el} = P_{el,nom} \left(\frac{P_{th}}{P_{th,nom}} \right)^3 \quad \text{Gleichung 4}$$

7.3.6.1 Messung vom 16.02.2012: Serieller Betrieb

Während dieser Messung wurden für die Rückkühlung der Absorptionskältemaschine Sonden und Kühlturm in Serie geschaltet, z.B. wurde das Kühlwasser von der DAKM kommend zunächst vom Kühlturm und dann durch die Erdsondenanlage gekühlt. Zu Beginn wurde der Kühlturm mit voller Ventilatorleistung betrieben. Der Beitrag der Geothermie ist in diesem Fall sehr klein. Dann wurde die Ventilatorleistung reduziert, um den Anteil der Sonden an der Deckung der Rückkühlleistung zu erhöhen.

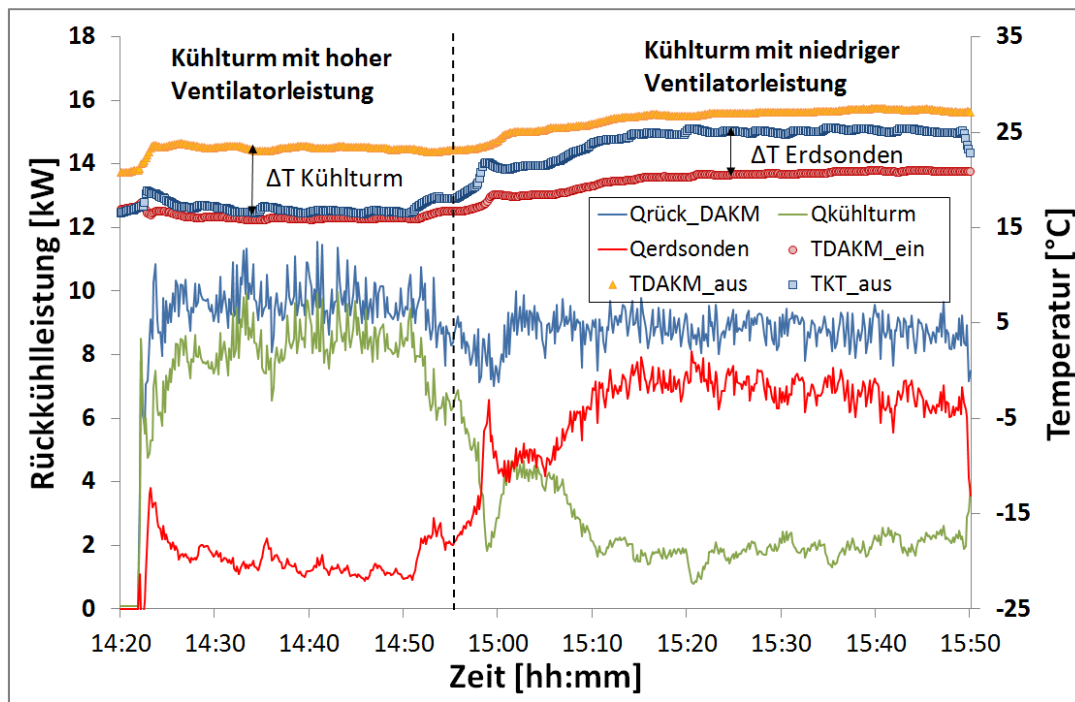


Abbildung 66: Serieller Betrieb am 16. Februar

Mit den zuvor genannten Annahmen wurde ein einfacher Vergleich der jeweils notwendigen elektrischen Hilfsenergie für die beiden Betriebsmodi angestrengt. Hierbei wurde angenommen, dass die Nennrückkühlleistung des Kühlturms den Werten am Ende des ersten Datensatzes entspricht.

Diese Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt. Wie aus Tabelle 7 ersichtlich, kann der spezifische elektrische Hilfsenergieverbrauch für den Hauptteil der Rückkühllast um den Faktor 4 ($22 \text{ W}_{el}/\text{kW}_{th}$) gesenkt werden.

Tabelle 7: Vergleich des Stromverbrauchs der Rückkühlvarianten (16.02.2012)

Messung	mittlere Rückkühlleistung (kW_{th})	mittlere Rückkühlleistung des Kühlturms (kW_{th})	mittlere Rückkühlleistung der Geothermieanlage (kW_{th})	mittlerer Gesamtstromverbrauch (W_{el})	Verhältnis Stromverbrauch/Rückkühlleistung ($\text{W}_{el}/\text{kW}_{th}$)
14:30-14:50	9.5	8	1.5	209	22
15:20-15:50	8.5	2	6.5	42.1	5

Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass die Kühlwassereintrittstemperatur in die Absorptionskältemaschine im zweiten Messabschnitt rund 2 K höher liegt als im ersten.

Dies hat Einfluss auf die Kälteleistung und die EER des Kälteaggregats. Eine bessere Aufteilung der Last zwischen Kühlturm und Geothermie würde zur Verringerung des elektrischen Hilfsenergieverbrauchs führen, ohne die Leistung der DAKM zu beeinflussen.

7.3.6.2 Messung vom 29.02.2012: Nur Geothermie

Die Rückkühlung der Absorptionskältemaschine wurde zunächst nur mit dem Kühlturm gedeckt und dann ausschließlich über die Geothermiesonden (siehe **Abbildung 67**). Die Temperaturschwankungen des Kühlwassers (**Abbildung 67**) haben ihre Ursache in einer Fehlfunktion eines Ventils der DAKM. Aufgrund des anstehenden Drucks leckt heißes Wasser vom Deplegmator vermutlich durch das Ventil (was scheinbar geschlossen ist) und mischt sich mit Wasser aus dem Kühlturm, was zu periodischen Temperaturerhöhungen im Kühlwasser führt. Ein Vergleich der erforderlichen elektrischen Hilfsenergie beider Messabschnitte wurde wie in **Tabelle 8** dargestellt gezogen.

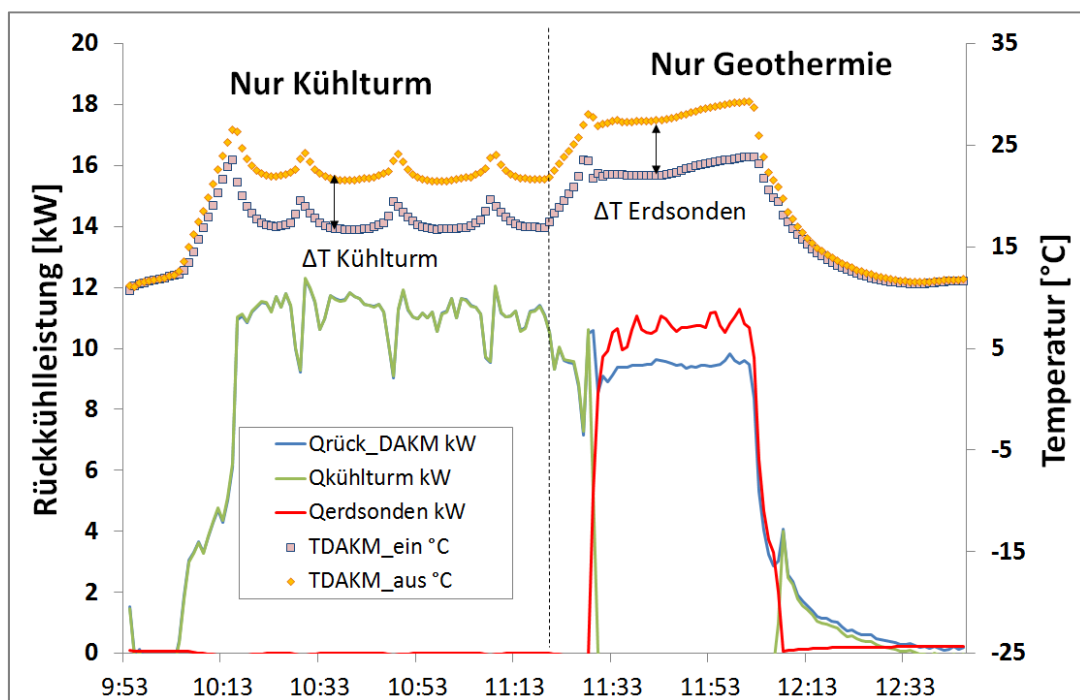


Abbildung 67: Nur Geothermie Betrieb (29/02/2012)

Tabelle 8: Vergleich des Stromverbrauchs der Rückkühlvarianten (29.02.2012)

Messung	mittlere Rückkühlleistung (kW_{th})	mittlere Rückkühlleistung des Kühlturms (kW_{th})	mittlere Rückkühlleistung der Geothermieanlage (kW_{th})	mittlerer Gesamtstromverbrauch (W_{el})	Verhältnis Stromverbrauch/Rückkühlleistung (W_{el}/kW_{th})
Nur Kühlturm	11	11	0	275	25
Nur Geothermie	10.5	0	10.5	57	6

7.3.6.3 Messung vom 06.03.2012

Beide, Kühlturm und Erdwärmesonden, wurden parallel betrieben (siehe **Abbildung 68**). Die erneut auftretenden Temperaturschwankungen resultieren auch hier aus der Fehlfunktion des Ventils. Die Analyse des elektrischen Energieverbrauchs ist in **Tabelle 9** aufgeführt.

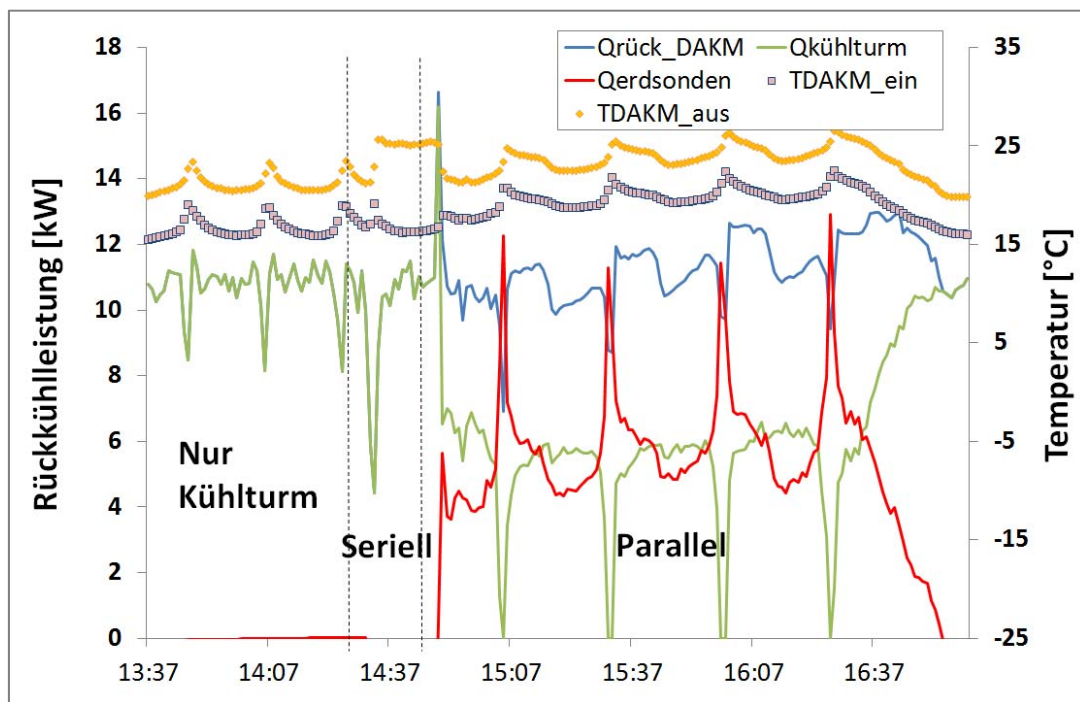


Abbildung 68: Parallelbetrieb am 06/03/2012

Tabelle 9: Vergleich des Stromverbrauchs der Rückkühlvarianten (06.03.2012)

Messung	mittlere Rückkühlleistung (kW_{th})	mittlere Rückkühlleistung des Kühlturms (kW_{th})	mittlere Rückkühlleistung der Geothermianlage (kW_{th})	mittlerer Gesamtstromverbrauch (W_{el})	Verhältnis Stromverbrauch/Rückkühlleistung (W_{el}/kW_{th})
Nur Kühlturm	11	11	0	275	25
Nur Geothermie	11	6	5	75	6.8

7.3.6.4 Zusammenfassung der Leistungsmessung an der Geothermianlage

Die zuvor als Leistung der Geothermianlage definierte Rückkühlleistung wurde am Wärmetauscher DAKM-seitig bestimmt. Sie berücksichtigt nicht die Verluste des Wärmetauschers oder die Leitungsverluste/-gewinne entlang der in der Werkhalle verlegten nicht isolierten Leitungsstränge für geothermischen Vor-/Rücklauf. Ebenfalls unberücksichtigt ist die Erhöhung der Soletemperatur durch die Umwälzpumpe.

Für die unterschiedlichen Messungen wurde die ins Erdreich eingebrachte gemessene Rückkühlleistung als Funktion der Erdreichteintrittstemperatur der Sole analysiert (**Abbildung 69**).

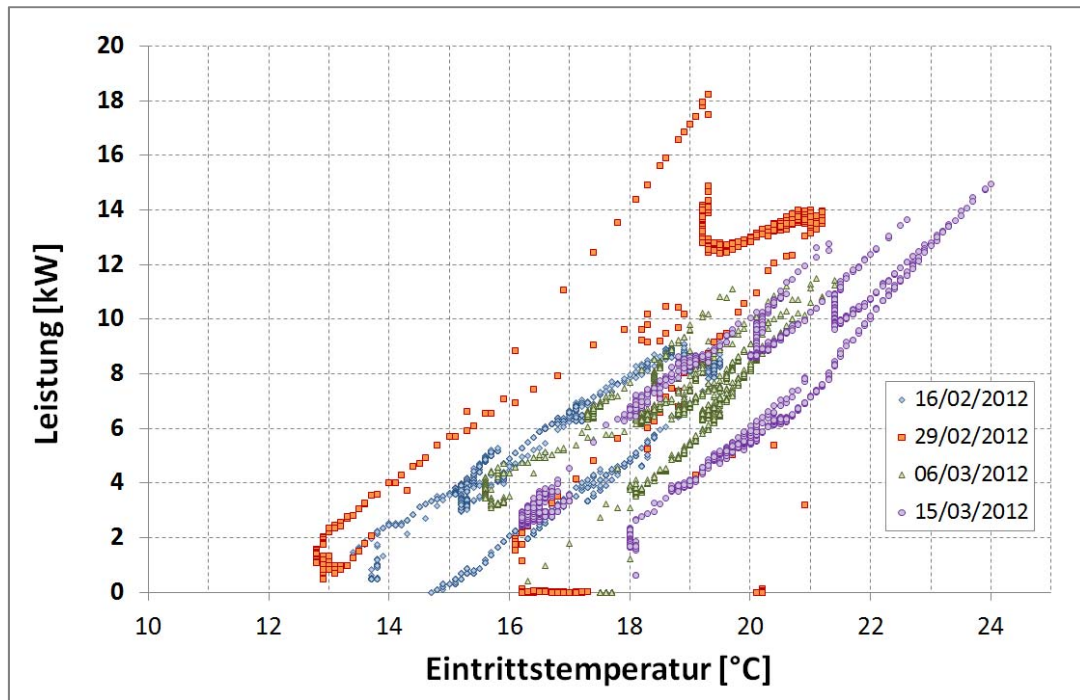


Abbildung 69: Leistung der Geothermieanlage (gesamt)

7.4 Systemtechnische Untersuchung von Referenzanlagen

7.4.1 Messtechnische Untersuchungen einer großtechnischen Anlage für Lebensmittelkühlung

Die untersuchte Handelsimmobilie hat eine Verkaufsfläche von 1816 m² und besitzt drei Energieverbünde zur Versorgung mit Kälte und Wärme: den Tiefkühlverbund TK, den Normkälteverbund NK und den Geoverbund. Abhängig von der Heizlast wird zwischen Sommer- und Winterbetrieb unterschieden.

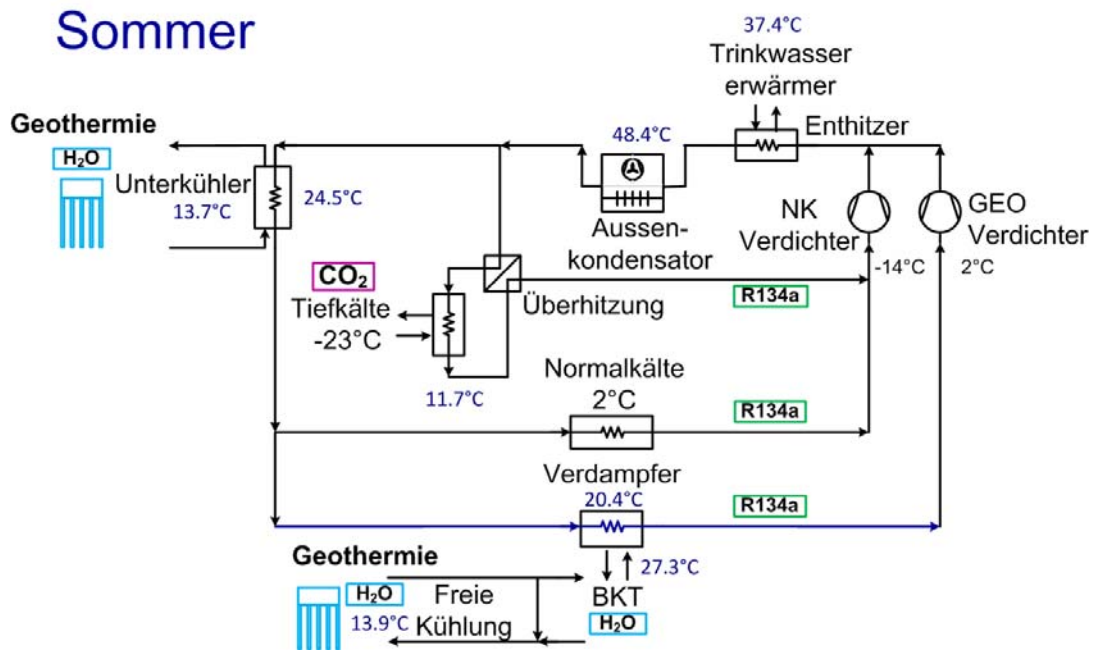


Abbildung 70: Schaltschema für den Supermarkt im Sommerbetrieb

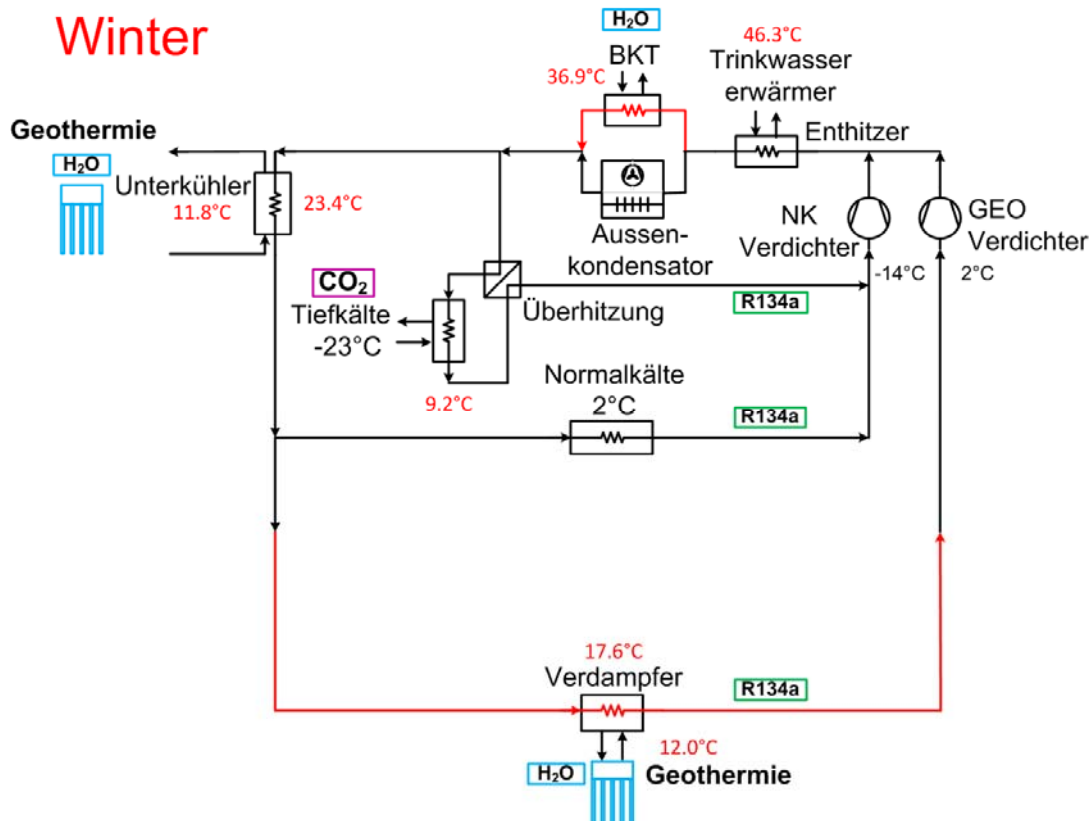
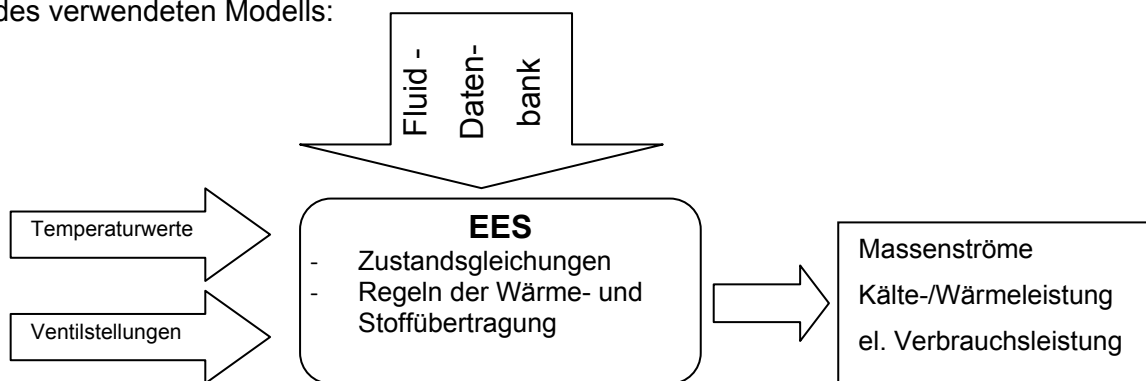


Abbildung 71: Schaltschema des Supermarktes für den Winterbetrieb

Die Anlage wurde in EES (Engineering Equation Solver) nachgebildet, und die gemessenen Temperaturwerte aus dem Zeitraum 31.08. bis 15.10.2011 wurden verwendet, um die Energiebilanzen zu berechnen. Das untenstehende Ablaufschema zeigt den allgemeinen Aufbau des verwendeten Modells:



Aufgrund fehlender Temperaturwerte wurden folgende Annahmen für einige Zustandspunkte im Prozess getroffen:

- Eine idealisierte Wärmeübertragung an den Wärmetauschern (keine Energieverluste)
- Die Sauggasüberhitzung beträgt 15 K
- Der Dampfgehalt beträgt 20 % beim Verdampfer-Eintritt
- Die Umwälzpumpe P5 verursacht eine Temperaturerhöhung um 0,8 K im Geo-Kreis

7.4.2 Ergebnisse der Wochensimulation

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus der Anlagenberechnung in EES für zwei Wochen vorgestellt (31.08. bis 06.09.2011 sowie 8.10. bis 15.10.2011).

7.4.2.1 Verlauf der Kälteleistung im NK-Kreis

In der Woche vom 31.08. bis 06.09.2011 wurden Außentemperaturen bis 27,4 °C gemessen (Sommerbetrieb). Die Raumkühlung (BKT, Lüftungskühlung und Türschleier) blieb in diesem Zeitraum abgeschaltet. Im Zeitraum 8.10. bis 15.10.2011 sank die Außentemperatur leicht unterhalb 4 °C. Die Wärmepumpe (Geo-Verbund) wurde in diesem Zeitraum zeitweise betrieben, um das Gebäude zu heizen. Ein Vergleich der berechneten NK-Kälteleistung mit dem Produkt aus Nennleistung und aufgenommenen Verdichterstufen ist in **Abbildung 72** dargestellt. Die Abweichung zwischen beiden Kurven ist auf die Ungenauigkeit der getroffenen Annahmen zurückzuführen.

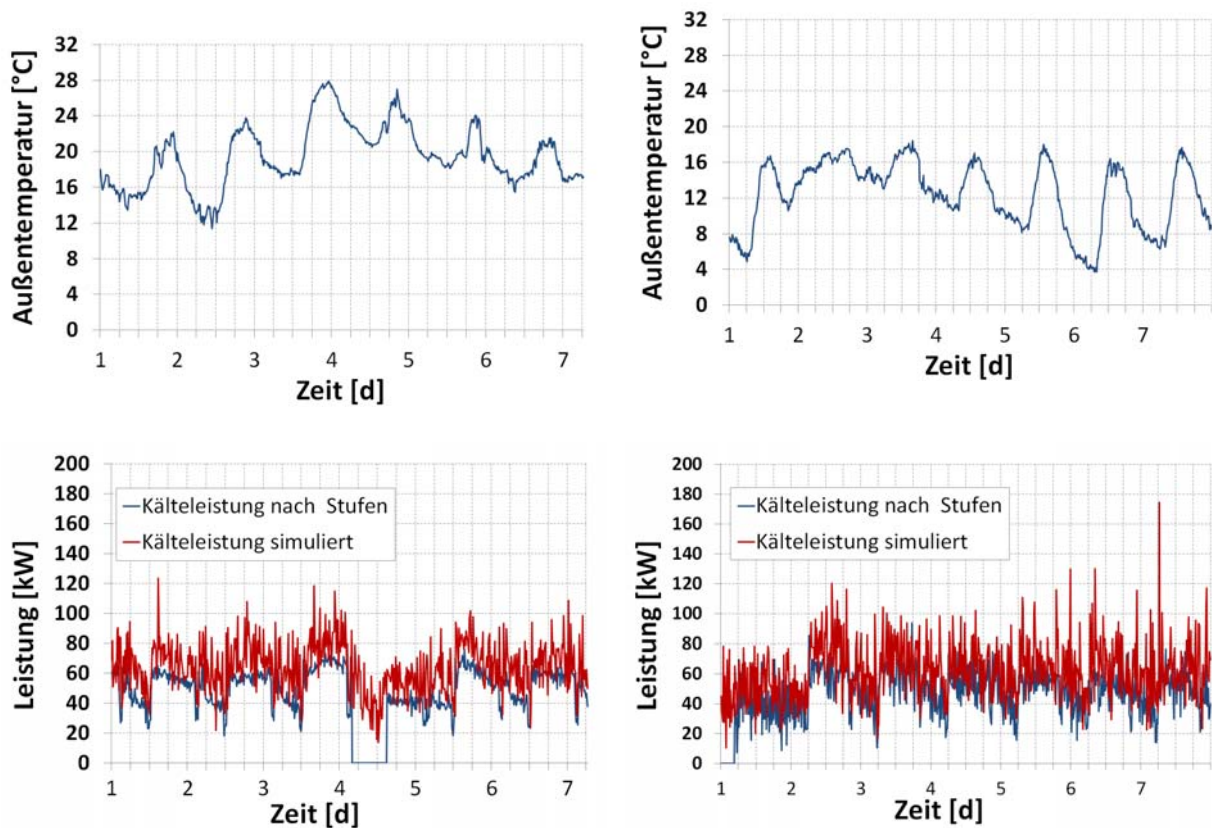


Abbildung 72: Außentemperatur und NK-Kälteleistung (links Sommer-, rechts Winterbetrieb)

Außerdem liegen die Temperaturspreizungen an einigen Wärmetauschern im Bereich des Messfehlers und erschweren damit die Bestimmung der Massenströme in diesen Punkten.

7.4.2.2 Anteile der NK, TK, Raumklimatisierung, freie Kühlung und Warmwasserzubereitung

Tabelle 10 zeigt die Anteile der verschiedenen Energieverbräuche in beiden betrachteten Wochen. Darunter sind diese in Abbildung 73 prozentual dargestellt.

Tabelle 10: Energiekonsumption nach Kältemittelkreisen

Bereich	Verbrauch Sommer [kWh]	Verbrauch Winter [kWh]
NK	8502.42	7988.93
TK	2535.1	2466.08
Raumklimatisierung	0	4306 (4500)
Freie Kühlung	0	0
Trinkwassererwärmung	490 (391)	432 (406)

*WMZ-Werte in Klammern

Kumulierter Energieverbrauch in kWh für eine Betriebswoche des Supermarktes in Schleswig-Holstein (Sommerbetrieb 2011)

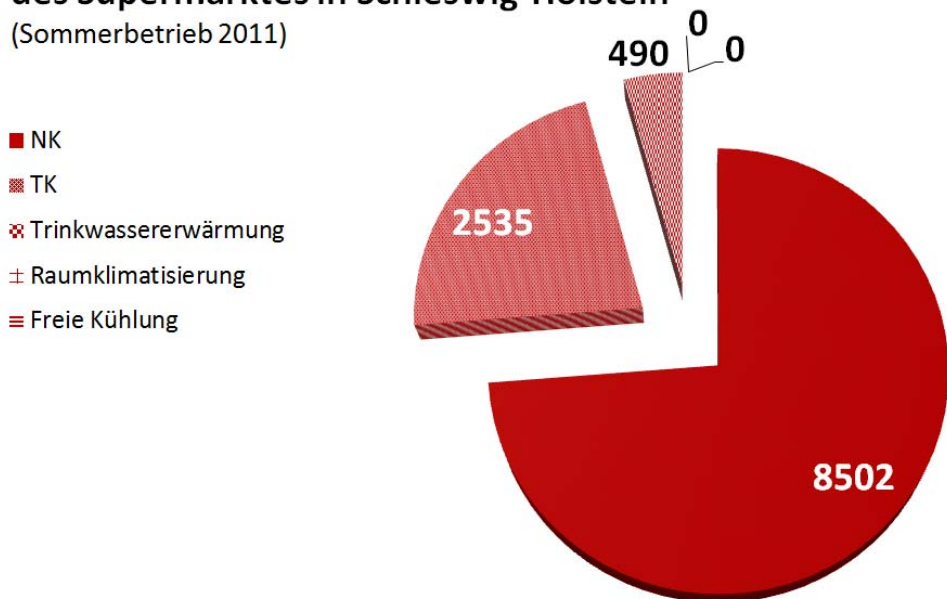


Abbildung 73: Verteilung des Energieverbrauchs

Kumulierter Energieverbrauch in kWh für eine Betriebswoche des Supermarktes in Schleswig-Holstein (Winterbetrieb 2011)

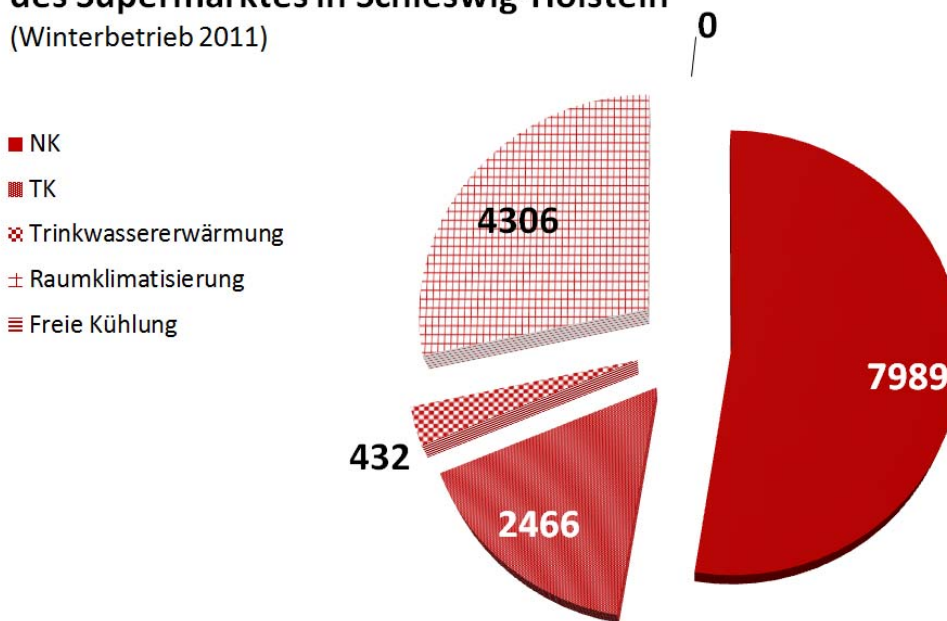


Abbildung 74: Verteilung des Energieverbrauchs

7.4.2.3 Mittlere Leistungszahlen NK und TK

Abbildung 75 verdeutlicht die Kaskade zwischen TK- und NK-Kreis. Der im ersten Kreis als Kondensator betriebene Wärmetauscher WT7 gilt als weitere Kühlstelle der Normalkühlanlage.

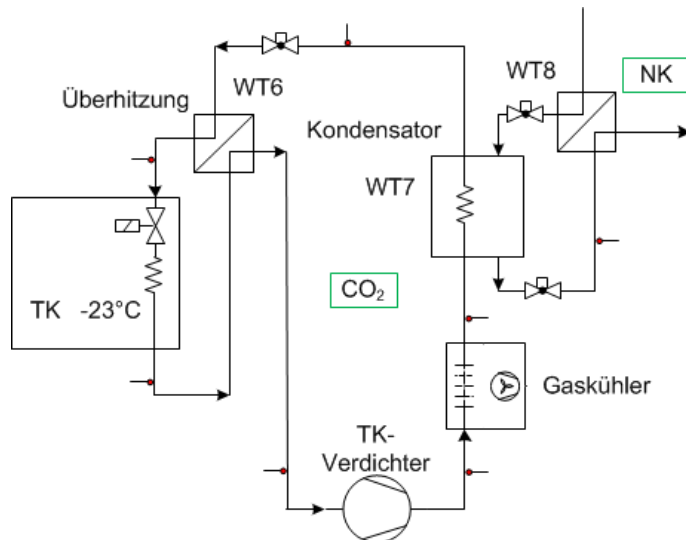


Abbildung 75: Der Tiefkühlkreis

Tabelle 11 zeigt den mittleren Wert der Aufwandszahlen (EER) für den NK- und TK-Verbund. Der elektrische Stromverbrauch im NK-Verbund wurde aufgrund der Kaskade mit dem TK-Kreis Massenstrom-anteilig auf die einzelnen Verdichtergruppen umgelegt. Der durch die CO₂-Kondensation getriebene Zusatzaufwand am NK-Verdichter wurde berücksichtigt. Die (angepasste) Aufwandszahl für den TK-Verbund wird daher gemäß folgender Gleichung berechnet:

$$EER = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{P_{TK} + (P_{NK} \cdot \frac{\dot{m}_{NK,WT7}}{\dot{m}_{NK,Gesamt}})} \quad \text{Gleichung 5}$$

mit:

- \dot{Q}_{Nutz} : die Tiefkältenutzleistung
- P_{TK} : die elektrische Leistung an den Klemmen der TK-Verdichter
- P_{NK} : die elektrische Leistung an den Klemmen der NK-Verdichter
- $\dot{m}_{NK,WT7}$: der Kältemittelmassenstrom durch WT7 bzw.
- $\dot{m}_{NK,Gesamt}$: der Kältemittelmassenstrom durch die NK-Verdichter

Tabelle 11: Energy Efficiency Ratio für Sommer-/Winterbetrieb nach Kältemittelkreisen

Bereich	EER Sommer	EER Winter
NK	2.7	2.8
TK	1.5	1.58

7.4.3 Abhängigkeit EER von der Umgebungstemperatur

Eine deutliche Abhängigkeit der Leistungszahl für den NK-Kreis konnte vor allem in der Sommerwoche festgestellt werden (vgl. **Abbildung 76**). Steigt die Außen- und damit die Kondensationstemperatur, so erhöht sich das Druckverhältnis P_c/P_0 , und der elektrische Stromverbrauch der Verdichter nimmt zu. Im Winter wird der BKT-Pufferspeicher über den Kondensator WT2 beladen. Der Kondensationsdruck ist daher weniger empfindlich gegenüber der herrschenden Umgebungstemperatur.

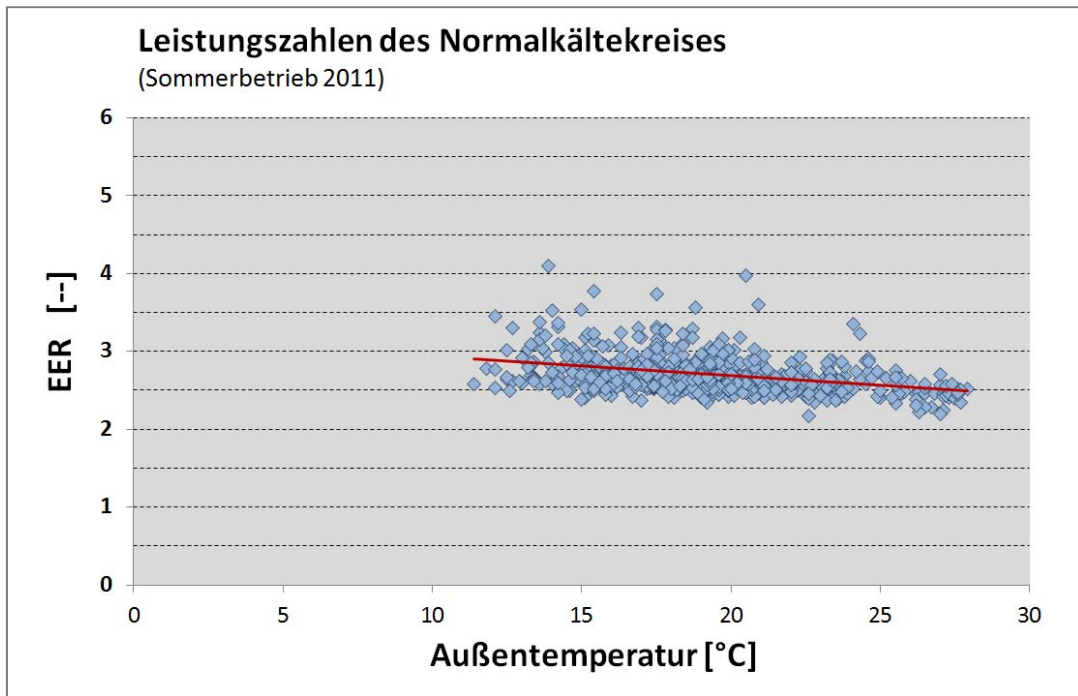


Abbildung 76: EER NK vs. Außentemperatur

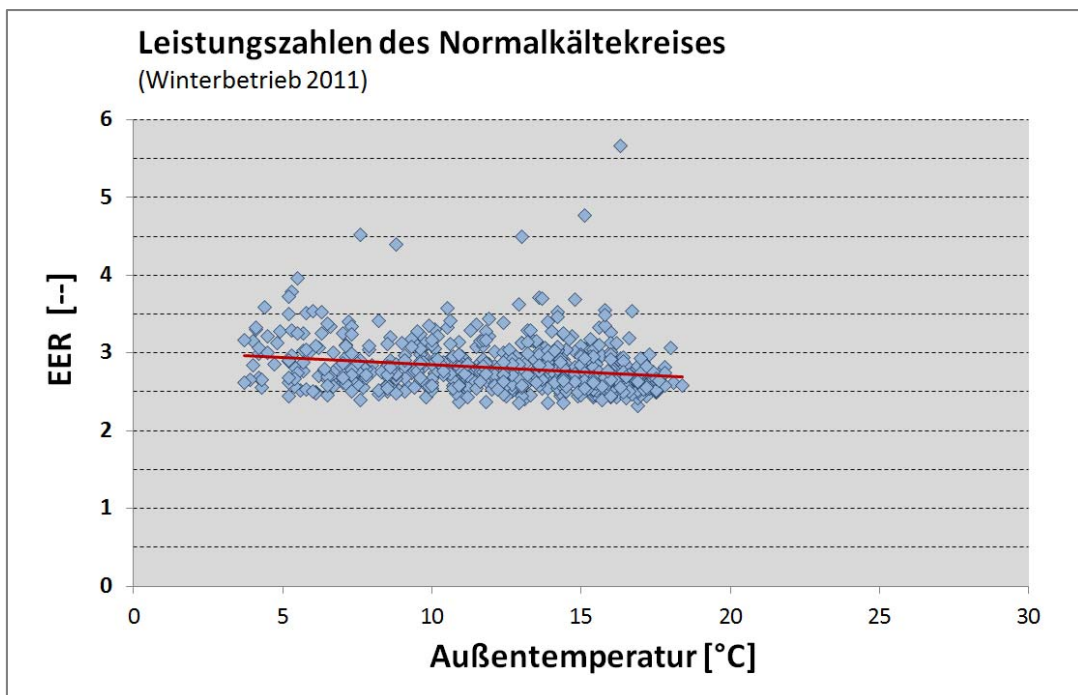


Abbildung 77: EER NK vs. Außentemperatur

7.4.4 Beitrag Geothermie

Die Unterkühlung (SC) des Kältemittels im NK-Kreis erfolgt durch die Kopplung mit den Erdsonden. Einen Vergleich der Leistungszahlen mit und ohne Unterkühlung zeigt **Abbildung 78**. Die Unterkühlung verbessert den EER des NK-Kreises um 11 % im Sommer und 10,7 % im

Winter. Eine bessere Nutzung der Erdsonden wäre durch die freie Kühlung im Sommer erreichbar. Diese blieb allerdings im betrachteten Zeitraum abgeschaltet.

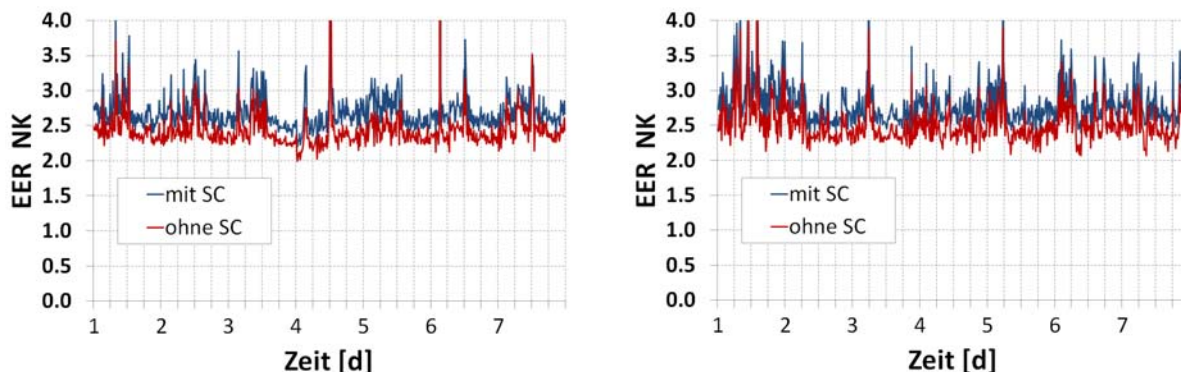


Abbildung 78: EER NK mit und ohne SC (links Sommer-, rechts Winterbetrieb)

7.4.5 Jahresrechnung

Aus den vorgestellten Diagrammen wurden Verbrauchswerte für das gesamte Jahr hochgerechnet (26 Sommerwochen und 26 Winterwochen)

Tabelle 12: jährliche simulierte Verbrauchswerte

Bereich	Verbrauch Jahr [kWh]
NK	428775
TK	130031
Trinkwassererwärmung	23979
Raumklimatisierung	111958

Durch die Geo-Unterkühlung wird 17,7 kWh pro Erdwärmesondenmeter im Jahr Wärme abgeführt. Im Vergleich zu anderen Felduntersuchungen des zafh.net liegt dieser Wert im mittleren Bereich (7 bis 25 kWh/m.a)

7.5 Verbesserungsmöglichkeiten

Der spezifische Beitrag der Erdsonden zur Wärmeabfuhr aus der Kälteerzeugung ist mit 17,7kWh/m.a relativ niedrig. Eine Erhöhung kann durch die verstärkte Nutzung der freien Kühlung über den Wärmetauscher WT9 erreicht werden. Das Gebäude wurde in der Sommerwoche weder durch die BKT noch durch die Lüftung klimatisiert. Eine Anpassung der Sollwertregelung für diesen Bereich kann den NK-Verbrauch deutlich reduzieren.

Bisher wird das Wärmeträgermedium (Wasser) im Erdsondenfeld mit einem konstanten Volumenstrom (ca. 8,5m³/h) umgewälzt. Die Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rück-

lauf liegt unterhalb 1 K. Eine Drehzahlregelung der Umwälzpumpe kann die Temperatur-
spreizung erhöhen und führt zu deutlich geringerem Stromverbrauch (vgl. **Abbildung 79**)

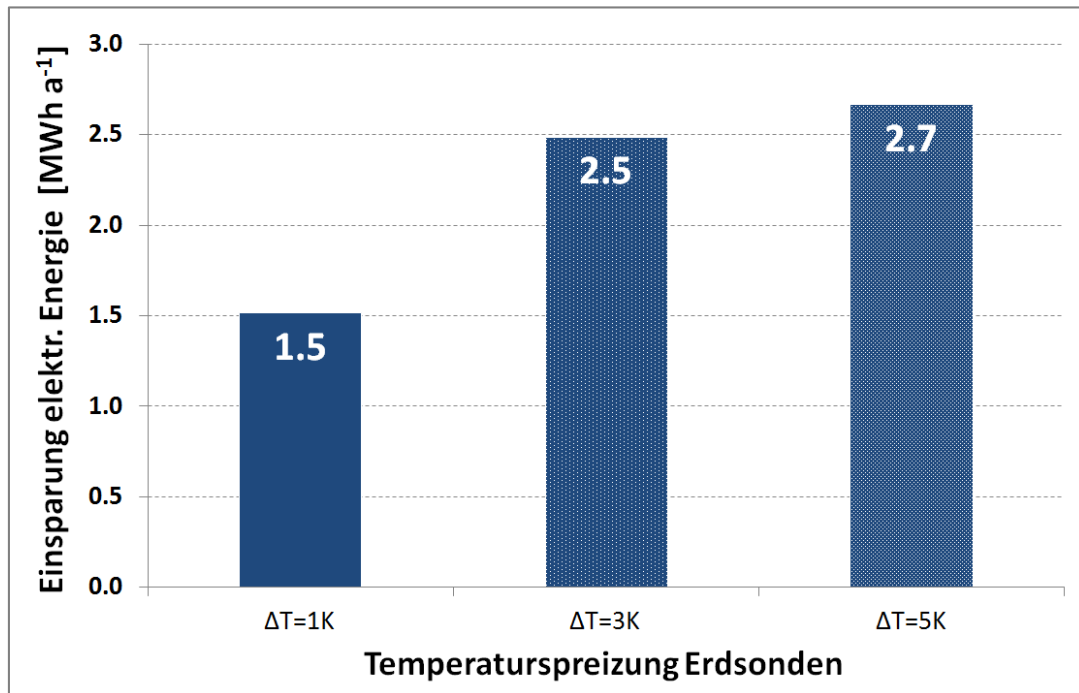


Abbildung 79: Einsparung in der Geo-Pumpenversorgung

Außerdem sollen die Regleralgorithmen für die Pumpen und Ventile in den einzelnen Strängen geprüft werden. **Abbildung 80** zeigt beispielhaft den Betriebszustand (on/off) der Pumpe P3 und des Ventils K5 am 08.10.2011. Der Zustand „off“ bzw. „zu“ ist in der **Abbildung 80** im Zentrum des Kreises dargestellt (0), während der Zustand „on“ bzw. „auf“ (1) am Kreisrand markiert wird. Die Sektoren stellen fünf-Minutenwerte dar und sind chronologisch im Uhrzeigersinn aufgetragen. Decken sich blaue Markierung der Pumpe und die rote Linie der Klappe sind beide Bauteile richtig geregelt. Ist die Klappe offen, aber die Pumpe läuft nicht, ist dies unkritisch. Deutlich zu erkennen ist im linken oberen Quadranten des Schaubildes, ein Fehlverhalten der Klappe. Obwohl die Pumpe läuft, blaue Markierung, bleibt die Klappe geschlossen rote Linie. Die Pumpe drückt somit für zehn Minuten gegen eine geschlossene Klappe des gleichen Stranges. Eine sorgfältige Überprüfung der Pumpensteuerung wird unnötigen Pumpenstrom vermeiden.

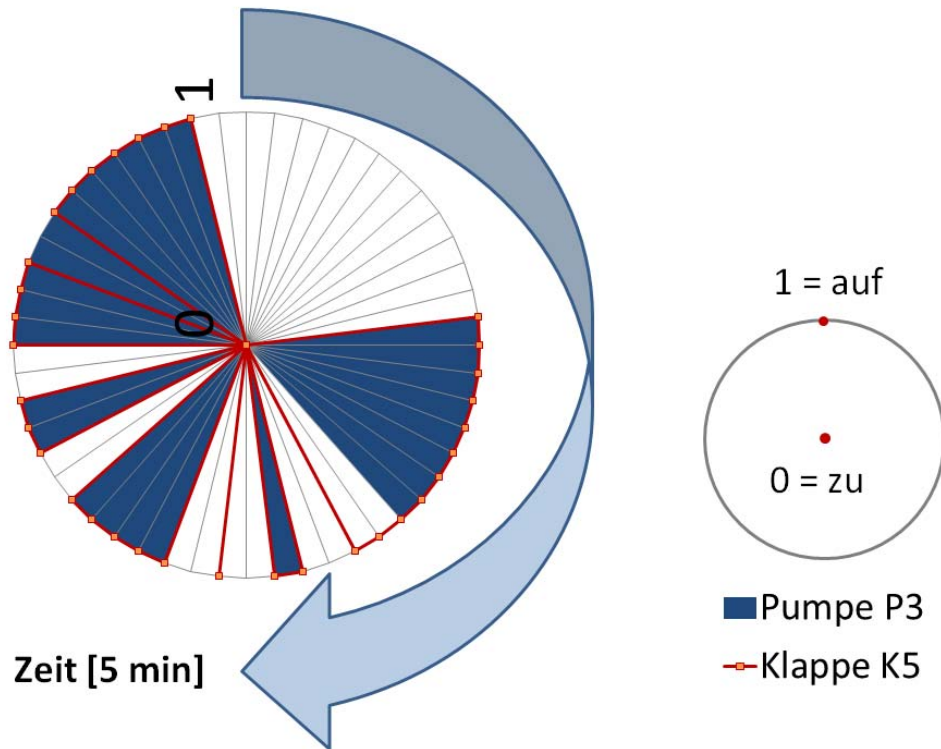


Abbildung 80: Betriebszustand Pumpe P3 und Ventil K5

7.5.1 Optimierungspotenzial durch die Trennung der NK-TK Kaskade

Die Leistungszahl des TK-Kreises im untersuchten Supermarkt liegt mit 1.5 im Vergleich zu anderen Tiefkühlverbänden mit Flüssigkeitsunterkühlung (1.85 in [6]) sehr niedrig. Der Hauptgrund dafür ist die erhöhte Leistungsaufnahme an den Klemmen der NK-Verdichter.

Als Alternative zur bisherigen Kaskade kann der TK- Kreis durch einen weiteren Luftkondensator ergänzt werden. Der Wärmetauscher WT7 würde dann zur Flüssigkeitsunterkühlung durch die Kaskade mit dem NK-Kreis verwendet (Abbildung 75). Der Einsatz des Flüssigkeitsunterkühlers steigert in einem ähnlichen Kälteverbund aus [6] den Nutzkältegewinn um über 50 % gegenüber einer Tiefkälteverbundanlage ohne Unterkuhlung. Bei gleicher Kälteleistung reduziert sich der Kältemittelmassenstrom und die Verdichter der zu bemessenen Verbundanlage können kleiner gewählt werden.

Verdichtertyp	2GSL-3K-40S
Kälteleistung	6.02 kW
Kälteleistung *	5.91 kW
Verdampferleist.	6.02 kW
Leist.aufnahme	3.08 kW
Strom (400V)	6.24 A
Spannungsbereich	380-420V
Verflüssigerleistung	8.95 kW
Leistungszahl	1.95
Leistungszahl *	1.92
Massenstrom	95.8 kg/h
Druckgastemp. Ungekühlt	122.0 °C

Abbildung 81: Daten des Ersatzverdichters

Eine weitere Option besteht in der direkten Kondensation des CO₂-TK-Kreises gegen die Erdreichtemperatur. In diesem Abschnitt wurde diese zweite Alternativschaltung untersucht mit dem Ziel, den NK-Verbund vollständig zu entlasten und die Auslastung des Erdwärmesondenfeldes zu verbessern. Der Wärmetauscher WT7 wurde in der Simulation vom Wärmetauscher WT8 entkoppelt und in den Erdsondenkreis eingebunden. Die Nutzung der bereits installierten Verdichter für eine Kondensation gegen das Erdreich wäre aufgrund des hohen Kondensationsdrucks (bei einer Kondensationstemperatur von ca. 12 °C) nicht möglich. Die vom Hersteller angeforderte Druckreserve am Verdichterausgang wäre nicht mehr gewährleistet. Aus diesem Grund wurde ein Modell für einen Verbundsatz der Baureihe 2GSL-3K mit Kondensationstemperaturen bis 15 °C eingesetzt. Das Kältemittel ist ebenfalls CO₂, und die Leistungsaufnahme an den Klemmen eines Verdichters beträgt 3 kW (vgl. **Abbildung 81**)

Der TK-Kreis wurde unter den beschriebenen Bedingungen mithilfe eines Wärmepumpenmodells in der Simulationsumgebung INSEL berechnet. Die aus der Messung erhaltenen Tiefkühltemperaturen wurden als Solltemperatur für den Verdampfer eingesetzt. Auf der Kondensatorseite wurde eine konstante Vorlauftemperatur mit 12 °C aus den Erdsonden angenommen. Der Verlauf der Rücklauftemperatur in das Erdreich ist in **Abbildung 82** für den Sommer- und Winterfall dargestellt. Mit Maximalwerten um 17 °C liegt sie im zulässigen Bereich für Einspeisetemperaturen ins Erdreich ± 11 °C.

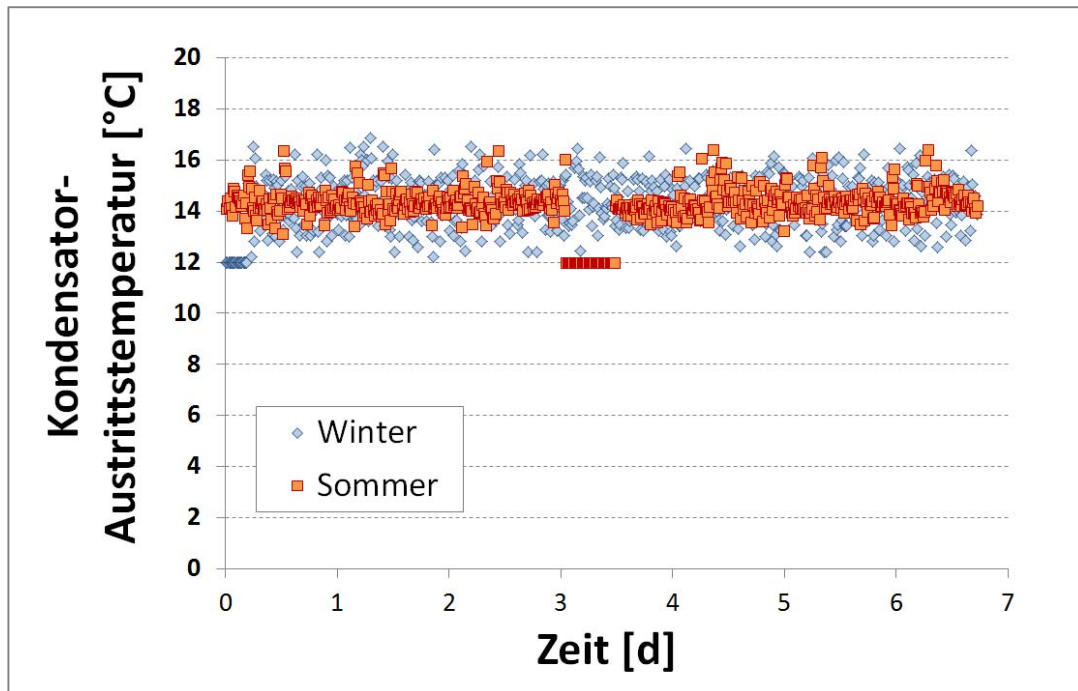


Abbildung 82: Kondensator-Austrittstemperatur

Die Stromverbräuche der Verdichterstufen für die Schaltungen mit und ohne Kaskade wurden anschließend berechnet und gegenübergestellt. Im ersten Fall wurde (entsprechend der oberen Gleichung 5) die elektrische Energie berücksichtigt, die im NK-Kreis zur Kondensation des CO₂-Kreises verbraucht wurde. In der Alternativschaltung ohne Kaskade wurde der nötige Strom zur Umwälzung des Kühlmediums (Wasser) durch den Kondensator-Wärmetauscher berücksichtigt. Weitere Hilfsenergien wurden hier nicht in Betracht gezogen. Das Ergebnis dieser Berechnung verdeutlicht **Abbildung 83**, wo die Systemleistungszahlen der beiden Varianten in der Winterwoche dargestellt sind. Unter der Annahme eines elektrischen Verdichterwirkungsgrads von 90 % würde das Tiefkältesystem 1310 bzw. 1232 kWh elektrische Energie während der Winter- bzw. Sommerwoche verbrauchen.

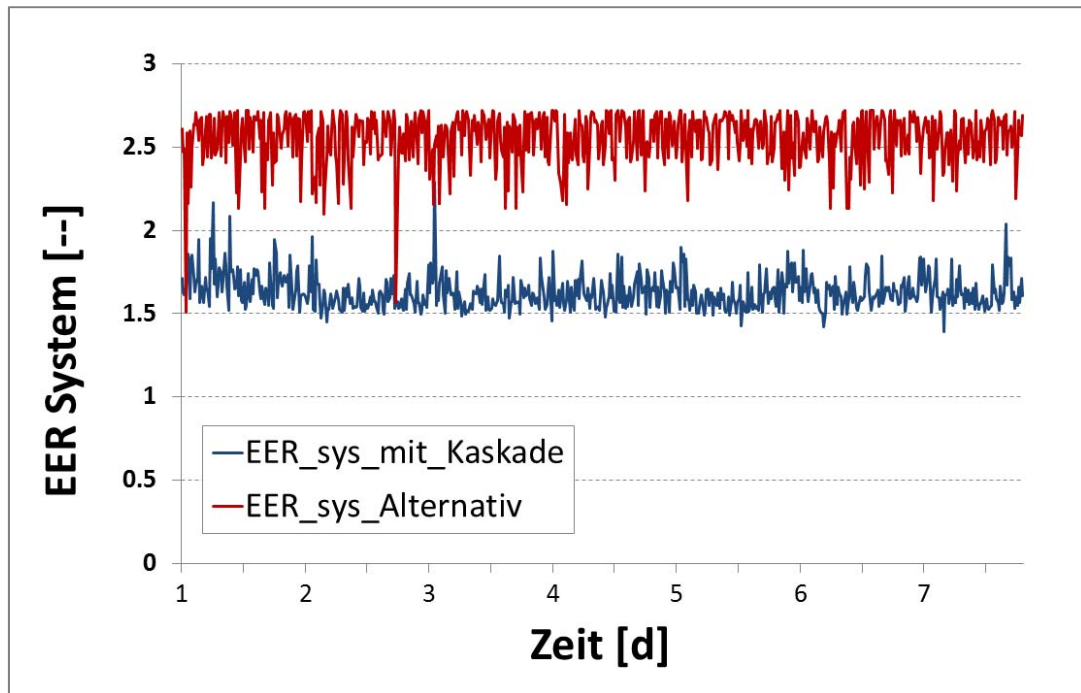


Abbildung 83: Vergleich der Systemleistungszahlen in der Winterwoche

Die Verdichterreihe alleine würde 960 bzw. 897 kWh Strom statt 1620 bzw. 1576 kWh verbrauchen. Eine Jahreshochrechnung aus den 2 Monitoring-Wochen resultiert in einer Systemverbrauchsminderung von 83.2 MWh auf 66.1 MWh, wenn die Wärme des TK-Kondensators ins Erdreich abgegeben würde.

7.6 Entwicklung eines Planungsleitfadens

Aus den Ergebnissen der Simulationsstudien und den Messungen an Objekten sollen die wichtigsten Ergebnisse im Folgenden für einen Planungsleitfaden zusammengestellt werden. Zunächst werden die wesentlichen Nutzungsmöglichkeiten der Geothermie kurz dokumentiert, um danach Auslegungsbedingungen zu konkretisieren.

7.6.1 Grundsätzliche Bemerkungen zur geothermischen Nutzung

Die Nutzung oberflächennaher Geothermie eignet sich für direkte oder indirekte Heiz- und Kühlanwendungen. Unter die gängigen Anwendungsfälle fallen vor allem die Gebäudeheizung und -kühlung, Warmwasserbereitung, Thermalbäder/Balneologie, Stromerzeugung, landwirtschaftliche Anwendungen (Gewächshäuser, Pilzzucht, Tierzucht, Trocknung etc.) sowie Rückkühlung von Kältemaschinen beispielsweise in der Nahrungsmittelindustrie.

Die Nahrungsmittelindustrie benötigt beispielsweise bezogen auf den Primärenergiebedarf ca. 70 % der deutschen Kälteerzeugung, gefolgt von der Gebäudeklimatisierung mit 15 % und der Industrie mit 9 %.

Eine Kombination aus geothermischer Wärmequelle/-senke und reversibler Wärmepumpe ermöglicht die nachhaltige Nutzung von geothermischen Anlagen als Niedertemperaturwärmequelle/-senke für Heiz- und/oder Kühlzwecke. Durch eine ganzjährige Nutzung der Erdsonden für Heiz- und Kühlzwecke lässt sich die Auskühlung des Erdreichs reduzieren und somit die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen steigern. Angesichts einer stetigen Zunahme der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung, bieten Wärmepumpen mit geothermischer Wärmeversorgung eine zukunftsweisende Technologie zur Gebäudebeheizung.

Darüber hinaus lassen sich Erdwärmesonden auch als sommerliche Wärmesenken von Kompressionskälteanlagen oder thermisch angetriebenen Absorptionskälteanlagen nutzen, wodurch die Energieeffizienz der Kältemaschine gesteigert wird und der Einsatz hygienisch problematischer offener Rückkühlsysteme vermieden wird [23]. Die Erfahrungen mit geothermischer Rückkühlung von Kältemaschinen sind jedoch bisher noch recht gering, obwohl weltweit über 500.000 Erdwärmepumpen installiert sind [22].

Die direkte Nutzung der Geothermie für Heiz- oder Kühlzwecke ist jedoch die effizienteste Variante, da für solch ein System lediglich die Hilfsenergie (für Pumpen und Ventilatoren) elektrisch aufgewendet werden muss.

Auch die Konditionierung von Frischluft durch oberflächennahe Geothermie ist gut möglich. Selbst in warmen Regionen liegt die jährliche Erdmitteltemperatur unterhalb der Spitzen-Außenlufttemperaturen, sodass ein Vorkühlen der Zuluft möglich ist [30].

Wasser- bzw. Sole-gefüllte Erdwärmetauscher werden entweder horizontal in ca. 2 Meter Tiefe als Erdkollektoren oder als vertikale Erdsonden installiert. Vertikale Erdwärmetauscher bestehen aus ein oder zwei Polyethylen-U-Rohren mit einem Sondendurchmesser von 75 bis 150 mm. Sie sind in der Regel parallel miteinander verschaltet, um den Druckabfall zu reduzieren. In Europa sind weitestgehend Doppel-U-Rohre verbreitet, während sich in den USA Einzelrohre durchgesetzt haben. Doppel-U-Rohre reduzieren jedoch den thermischen Bohrlochwiderstand um 30 bis 90 % [40].

Detaillierte Messergebnisse von mittleren und maximalen Heiz- und Kühlleistungen der Erdwärmetauscher sind selten. Oft arbeiten Hersteller mit Mittelwerten, wie die des deutschen Standards VDI 4670.

Bei oberflächennahen horizontalen Erdwärmetauschern wird die Erdtemperatur durch Oberflächeneinflüsse beeinflusst. In größeren Tiefen kann der Boden über den Winter stark abgekühlt werden, wenn beispielsweise über eine Wärmepumpe dem Erdreich Wärme entzogen

wird. Laut [26] reduziert ein unausgewogener Erdwärmeentzug durch einen Wärmepumpenbetrieb das Temperaturniveau um 6 K. Wird unausgewogen nur Abwärme einer Kältemaschine in das Erdreich abgegeben, so erreicht der Erdboden nach 13 Jahren eine Temperatur von 35 °C. Lediglich bei ausgeglichenem Wärmeentzug und Wärmebelastung des Bodens bleibt die Erdtemperatur über 30 Jahre konstant.

7.6.2 Dimensionsrichtlinien für ganzjährige Erdsondennutzung

Das im Zuge des Forschungsprojekts entwickelte Erdsondenmodell (vgl. Abschnitt 7.2) dient als Grundlage für Untersuchungen hinsichtlich der Dimensionierungsrichtlinien für ganzjährige Erdsondennutzung. Mittels Simulationen sollen unterschiedliche Parameterstudien Aufschluss über eine sinnvolle Nutzung von Erdsonden geben. Dabei werden jeweils die Erdsondenleistung sowie die jährliche zu gewinnende Energiemenge als Vergleichsgrößen herangezogen. Die Energiemenge, welche im Kühlfall ins Erdreich eingespeist und im Heizfall diesem entzogen werden kann, ist maßgeblich für die Effizienz einer Geothermieanlage verantwortlich. Je größer dieser regenerative Anteil am Endenergieverbrauch ist, desto weniger Nutzenergie muss konventionell erzeugt werden.

Für die im Rahmen der Parameterstudie durchgeführten Berechnungen wird von einem Standard-Erdsondenaufbau ausgegangen. Lediglich die zu untersuchende Größe wird variiert. Die für das Standardmodell gültigen Material- und Geometriedaten sind im Folgenden zusammengefasst.

- **Zeitschritt:** Der Zeitschritt beträgt bei allen Simulationen 1 h. Intern wird im Simulationsmodell jedoch sekundengenau gerechnet.
- **mittlere Erdreichtemperatur:** Die mittlere, ungestörte Erdreichtemperatur beträgt 10,2 °C: Es handelt sich hierbei um den Wert für die Region Stuttgart. (Nach den 15 Referenzregionen der Bundesrepublik Deutschland [10])
- **Stoffeigenschaften des Erdreichs:** Das Erdreich wird vereinfacht als homogenes Medium angenommen mit einer mittleren Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{\text{soil}}=1.5 \text{ W/m.K}$), einer mittleren spezifischen Wärmekapazität ($c_{p_{\text{soil}}}=1000 \text{ J/kg.K}$) und einer mittleren Dichte ($\rho_{\text{soil}}=2000 \text{ kg/m}^3$)
- **Bohrloch-/Sondeneigenschaften:** Es handelt sich bei den Simulationen jeweils um ein 100 m tiefes Bohrloch (Durchmesser: 22 cm), in das eine Doppel-U-Rohr-Sonde mit einem Rohrdurchmesser von 3,2 cm eingeführt ist. Die Stoffeigenschaften der

Betonverfüllung des Bohrlochs sind ebenfalls konstant: Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{\text{con}}=1.5$ W/m.K), spezifische Wärmekapazität ($c_{p_{\text{con}}}=1000$ J/kg.K), Dichte ($\rho_{\text{con}}=2400$ kg/m³)

- **Sondenfluid:** Beim Sondenfluid handelt es sich um ein Glykol-Wasser-Gemisch mit folgenden Stoffeigenschaften: Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{\text{fluid}}=0.5$ W/m.K), spezifische Wärmekapazität ($c_{p_{\text{fluid}}}=3800$ J/kg.K), Dichte ($\rho_{\text{fluid}}=1050$ kg/m³)

Die durchgeführten Simulationen sind stets ganzjährige Simulationen. Es wurden zwei identische Jahre hintereinander simuliert, jedoch nur das zweite Jahr zur Auswertung herangezogen. Somit sind verfälschende Effekte durch ein nichteingeschwungenes Erdreich zu Beginn des Jahres (zu Beginn der Simulation) ausgeschlossen. Wird im Folgenden von einer (spezifischen) Energiemenge gesprochen, so handelt es sich um die Energiemenge pro Sondenmeter eines ganzen Jahres.

Zunächst werden vereinfachte Lastprofile angenommen, die zwei Gebäudetypen stark vereinfacht beschreiben. Ein schlecht gedämmtes Gebäude wird durch eine lange Heiz- bzw. Kühlperiode von jeweils 6 Monaten nachgebildet. Die reduzierte Heiz- bzw. Kühlperiode auf jeweils 3 Monate soll ein gut gedämmtes Gebäude charakterisieren.

Tabelle 13: Zeitraum der Heiz- bzw. Kühlperiode

Heiz-/Kühlperiode	Zeitraum Heizperiode	Zeitraum Kühlperiode
3 Monate	Dezember - Februar	Juni - August
6 Monate	Oktober - März	April - September

Die unterschiedlichen Laufzeiten werden durch die Vollbenutzungsstunden pro Tag erzeugt, welche in den Untersuchungen von 4 bis 24 h/d variieren.

Heiz- und Kühlfall kann jeweils im selben Jahr untersucht werden, da sich ein inhomogener Wärmestrom (Entnahme/Einspeisung) erst nach einigen Jahren auf die Ergebnisse auswirkt.

7.6.2.1 Variation der Eintrittstemperatur

Einen großen Einfluss auf die Sondenleistung sowie die jährliche Energiemenge hat die Eintrittstemperatur des Sondenfluids ins Erdreich. Bezogen auf die ungestörte Erdreichtemperatur (T_{soil}) wird im Folgenden von einer Eintrittstemperaturdifferenz (ΔT_{in}) gesprochen. Begrenzt wird diese Temperaturdifferenz durch die Grenzwerte der VDI 4640. Diese besagt, dass bei der Nutzung des Untergrunds mittels Erdwärmesonden die Temperatur des zu der/den Erdwärmesonde(n) zurückkehrenden Wärmeträgermediums im Dauerbetrieb (Wochenmittel) den Grenzbereich von ± 11 K Temperaturänderung gegenüber der ungestörten

Erdreichtemperatur nicht überschreiten soll; bei Spitzenlast soll ± 17 K Temperaturänderung nicht überschritten werden [36].

In den Simulationen wird mit einem vereinfachten Lastprofil gerechnet. Dies sieht jeweils eine Periode von 3 bzw. 6 Monaten für den Heizfall ($\Delta T_{in} < T_{soil}$) und 3 bzw. 6 Monate für den Kühlfall ($\Delta T_{in} > T_{soil}$) vor. Die Ergebnisse im Kühlfall sind nach Definition mit positivem Vorzeichen, da dem Erdreich Energie hinzugefügt wird. Entsprechend sind die Ergebnisse im Heizfall mit einem negativen Vorzeichen definiert, hier wird dem Erdreich Energie entzogen. Die Laufzeit ergibt sich aus der Summe von 8 bzw. 16 Stunden pro Tag über den beschriebenen Zeitraum. Die Simulationen wurden mit den Eintrittstemperaturdifferenzen 2, 4, 7, 11 und 17 Kelvin durchgeführt. In **Abbildung 84** ist die spezifische mittlere Sondenleistung über der Eingangstemperaturdifferenz für unterschiedliche Laufzeiten dargestellt.

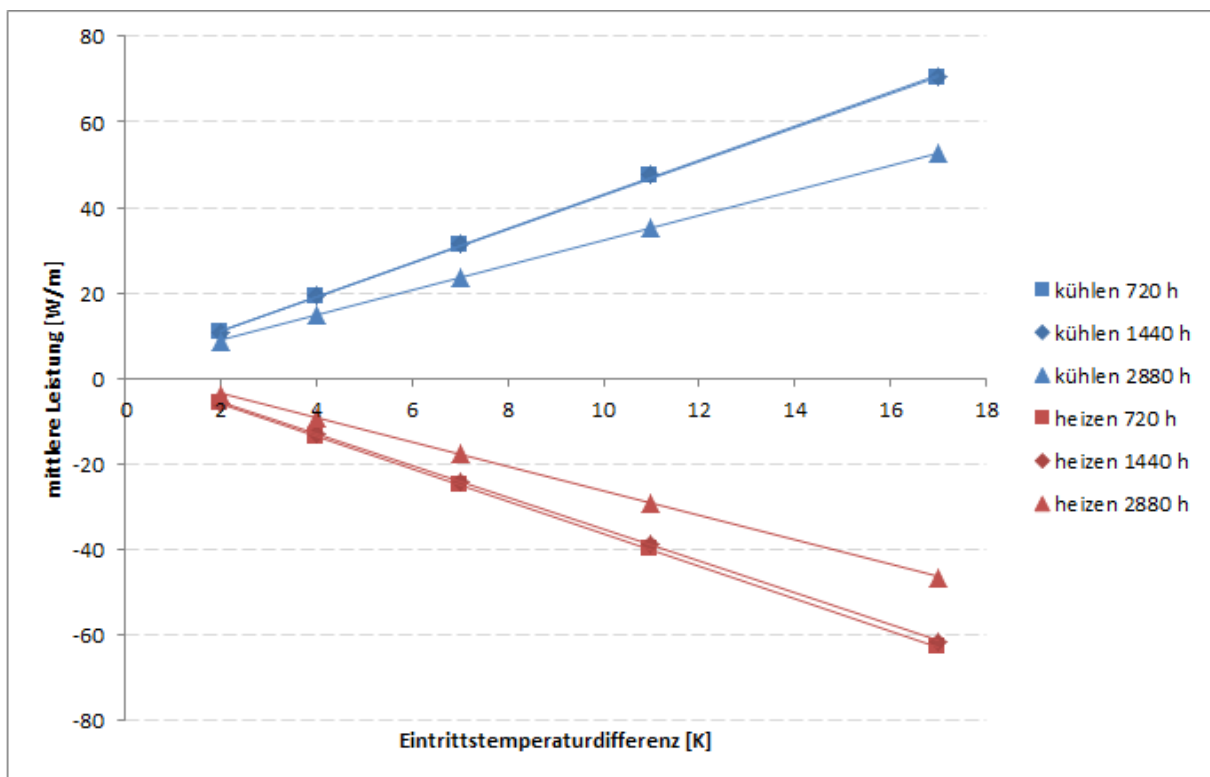


Abbildung 84: mittlere Sondenleistung bei unterschiedlicher Eintrittstemperaturdifferenz

Die mittlere Sondenleistung verhält sich sowohl im Kühlfall als auch im Heizfall linear zur Eintrittstemperaturdifferenz. Dass Heiz- und Kühlfall nicht exakt spiegelbildlich zur x-Achse verlaufen, liegt am gewählten Heiz- bzw. Kühlzeitraum. Dieser ist nicht exakt gegenläufig zur jährlichen Erdreichtemperaturschwankung, wodurch für den gewählten Kühlzeitraum etwas günstigere Erdreichtemperaturen herrschen und sich somit generell höhere Leistungen ergeben.

Die Steigung der linearen zunehmenden Sondenleistung fällt je nach Vollbenutzungsstunden unterschiedlich aus. So sind diese bei den Varianten 3 und 6 Monate, an denen die Sonden

lediglich 8 Stunden pro Tag betrieben werden, deutlich größer (in **Abbildung 84**: 720 h, 1440 h). Wird die Sonde 16 Stunden pro Tag betrieben (**Abbildung 84**: 2880 h) ist die Leistung geringer. Dieser Effekt ist auf eine längere Regenerationszeit des Erdreichs innerhalb von 24 Stunden, durch den kürzeren Betrieb, zurückzuführen.

Die, laut VDI 4640, maximal zulässige Eintrittstemperaturdifferenz von 17 °C zum ungestörten Erdreich führt zu einer mittleren jährlichen Sondenleistung von ca. 70 W/m (Kühlfall) bzw. 63 W/m (Heizfall) bei einer täglichen Laufzeit von 8 Stunden. In den Übergangsjahreszeiten wird sogar bei Zyklusbeginn eine maximale Sondenleistung von 120 W/m erreicht.

Wird die Erdsonde mit einer geringen Eintrittstemperaturdifferenz betrieben (2 K), so stellen sich mittlere Entzugsleistungen von lediglich 10 W/m (Kühlfall) bzw. 6 W/m (Heizfall) ein. Die maximale Leistung bei Zyklusbeginn liegt hier bei rund 15 W/m.

In der folgenden Grafik wird die jährliche Energiemenge in Abhängigkeit von der Eintrittstemperaturdifferenz für unterschiedliche Laufzeiten dargestellt.

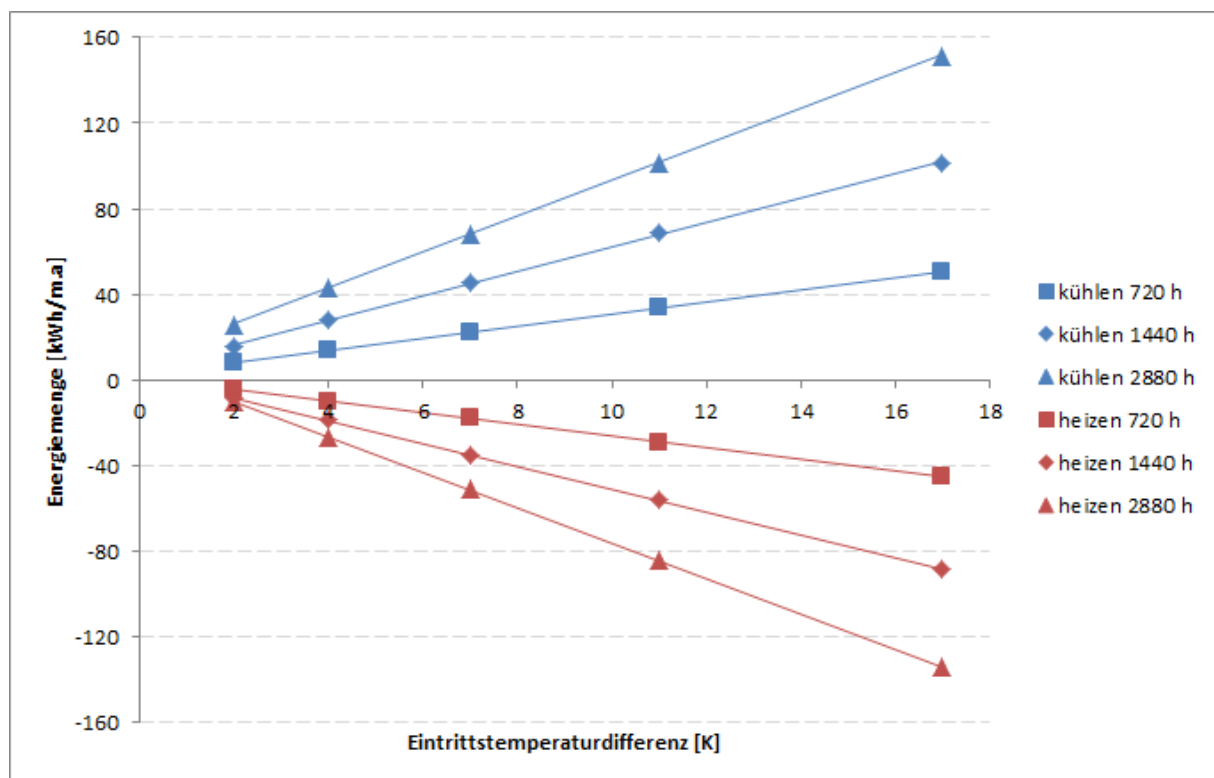


Abbildung 85: jährliche Energiemenge bei unterschiedlicher Eintrittstemperaturdifferenz

Wiederum steigt die spezifische jährliche Energiemenge mit zunehmender Eintrittstemperaturdifferenz nahezu linear. Da es sich um eine Energiemenge handelt, liegt es nahe, dass eine größere Laufzeit eine größere Steigung zur Folge hat.

Bei der nach der VDI 4640 maximal zulässigen Eintrittstemperaturdifferenz (17 K) ist eine spezifische Entzugs-/Einspeisemenge von 130 kWh/m.a (Heizfall) und 150 kWh/m.a (Kühlfall) zu erreichen.

Die Ergebnisse sind bei diesem Sondentyp mit den beschriebenen Parametern die Richtwerte für maximale Entzugs-Einspeisemengen bei ganzjähriger Erdsondennutzung. Die Laufzeit von 2880 Vollbenutzungsstunden (jeweils für Heizen und Kühlen) ist dabei die zulässige Grenze. Eine Anlage darf maximal 16 Stunden pro Tag mit einer Eintrittstemperaturdifferenz von 17 K gefahren werden, um das zulässige Tagesmittel von 11 K nicht zu überschreiten.

Tagesmittel:
$$\bar{T} = \frac{16h \cdot 17K + 8h \cdot 0K}{24h} = 11,33K \quad \text{Gleichung 6}$$

Die **Abbildung 85** zeigt, dass neben einer möglichst großen Spreizung der Eintrittstemperatur zum ungestörten Erdreich vor allem aber eine möglichst lange Laufzeit zu hohen Energiemengen führen. Je größer die jährlichen entzogenen bzw. eingespeisten Energiemengen sind, desto wirtschaftlicher ist die Anlage.

7.6.2.2 Variation der Laufzeit

Die Variation der Laufzeit soll aufzeigen, inwiefern sich diese auf den jährlichen Energieertrag (Energiemenge), aber vor allem auf die Leistung von Erdsonden auswirkt. Es werden wiederum die oben beschriebenen Parameter des Simulationsmodells verwendet. Als Eintrittstemperaturdifferenz ist für alle Laufzeituntersuchungen 11 Kelvin gewählt. Die stark vereinfachten Lastprofile für die beiden Gebäudetypen (3 und 6 Monate Betrieb) werden getrennt betrachtet.

Im ersten Schritt wird davon ausgegangen, dass jährlich 3 Monate geheizt ($\Delta T_{in} < T_{soil}$), sowie 3 Monate gekühlt ($\Delta T_{in} > T_{soil}$) wird. Mit einer Laufzeit von 4, 8, 12, 16 und 24 Stunden pro Tag ergeben sich jährliche Laufzeiten von 360, 720, 1080, 1440, 2160 Stunden.

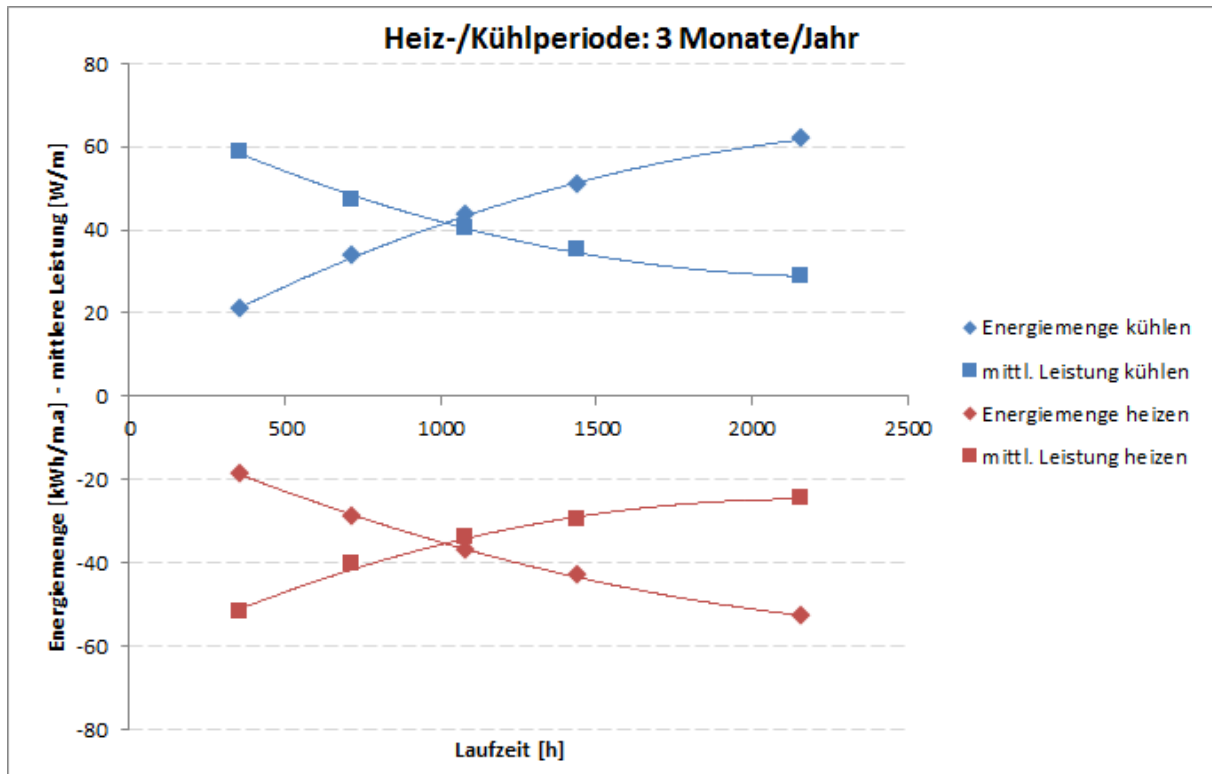


Abbildung 86: jährliche Energiemenge sowie mittlere Erdsondenleistung bei unterschiedlichen Laufzeiten für eine Heiz-/Kühlperiode von jeweils 3 Monaten pro Jahr

Die **Abbildung 86** zeigt sowohl den jährlichen Energieertrag als auch die mittlere Sondenleistung in Abhängigkeit von der Laufzeit. Es wird deutlich, dass es sich sowohl im Heizfall als auch im Kühlfall um eine gegenläufige Entwicklung handelt. Mit zunehmender Laufzeit nimmt die mittlere Leistung immer weiter ab, während die entzogene bzw. eingespeiste jährliche Energiemenge erwartungsgemäß zunimmt.

Im zweiten Schritt wird jährlich 6 Monate geheizt, sowie 6 Monate gekühlt, sodass sich jeweils Laufzeiten von 720, 1440, 2160, 2880, 4320 Stunden pro Jahr ergeben. Es ergibt sich ein ähnlicher Kurvenverlauf wie in **Abbildung 86**, jedoch durch die längeren Laufzeiten ein deutlich höheres Energiemengen-Niveau.

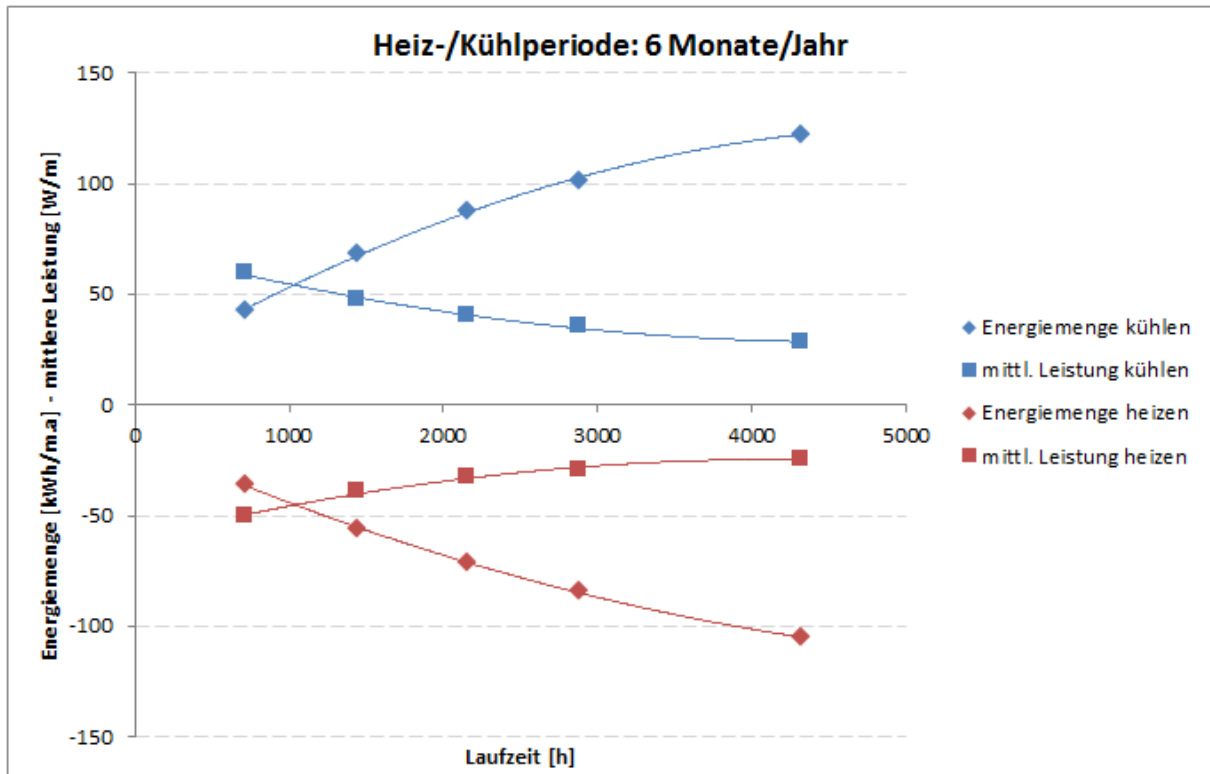


Abbildung 87: jährliche Energiemenge sowie mittlere Erdsondenleistung bei unterschiedlichen Laufzeiten für eine Heiz-/Kühlperiode von jeweils 6 Monaten pro Jahr

Mit einer Verlängerung der Laufzeit wird eine deutliche Steigerung der jährlichen Entzugs- bzw. Einspeisemenge erreicht, was sich wiederum ökonomisch und ökologisch positiv auswirkt. Das Einbrechen der mittleren Sondenleistung mit zunehmender Laufzeit fällt dabei lang nicht so gravierend aus.

Wie eingangs erwähnt, ist die jährliche Energiemenge maßgeblich für die Effizienz einer Geothermieanlage verantwortlich. Je größer dieser regenerative Anteil am Endenergieverbrauch ist, desto weniger Nutzenergie muss konventionell erzeugt werden. Nur über eine möglichst lange Laufzeit, und die gewonnene „kostenlose Energiemenge“, können die hohen Investitionskosten für die Sondenbohrungen wirtschaftlich ausgeglichen werden.

7.6.2.3 Variation des Sonden-Füllmaterials

Eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit von Erdsonden spielt die Betonverfüllung des Bohrlochs. Laut [11] ist durch die Verbesserungen am Erdwärmesonden-Füllmaterial (von $\lambda_{\text{Sondenf}} = 0.8 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{Sondenf}} = 1.6 \text{ W/mK}$) eine merkliche Steigerung der Systemeffizienz möglich (ca. 8 bis 20 %). In thermisch leicht regenerierbarem Erdreich ergibt sich sogar eine drastische Steigerung von 26 % [11].

Um dies zu überprüfen wurden Simulationen mit unterschiedlichem Sonden-Füllmaterial durchgeführt. Bei einer Eintrittstemperaturdifferenz von 11K wurde die Wärmeleitfähigkeit des Füllmaterials ausgehend vom Standardwert ($\lambda_{\text{Sondenf}} = 1.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) um $\pm 1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ variiert. Die prozentuale Abweichung vom Standardwert ist in **Abbildung 88** dargestellt.

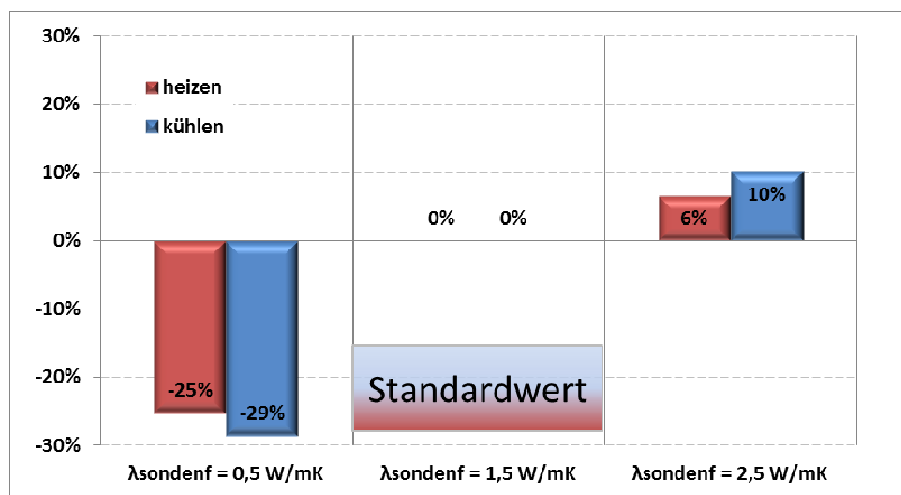


Abbildung 88: Variation der Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials

Sowohl die jährliche Energiemenge als auch die mittlere Sondenleistung verbessert/verschlechtert sich gleichermaßen. Außerdem sind die prozentualen Verbesserungen/Verschlechterungen unabhängig von der Laufzeit der Erdsonden.

Ausgehend von einer Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials von $\lambda_{\text{Sondenf}} = 1.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, ist bei einer schlechteren Wärmeleitfähigkeit ($0,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) mit einer deutlichen Reduktion der mittleren Sondenleistung sowie der jährlichen Energiemenge zu rechnen. Diese liegt in der Größenordnung 20-30 %, sowohl im Kühl- als auch im Heizfall. Wird die Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials auf $\lambda_{\text{Sondenf}} = 2.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ erhöht, so ergibt sich ausgehend vom Standardwert eine Verbesserung der Effizienzgrößen von 6-10 %.

Dass die Reduktion der Sondenleistung und jährlichen Energiemenge nicht linear zur Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials verläuft, wird in **Abbildung 89** nochmals verdeutlicht.

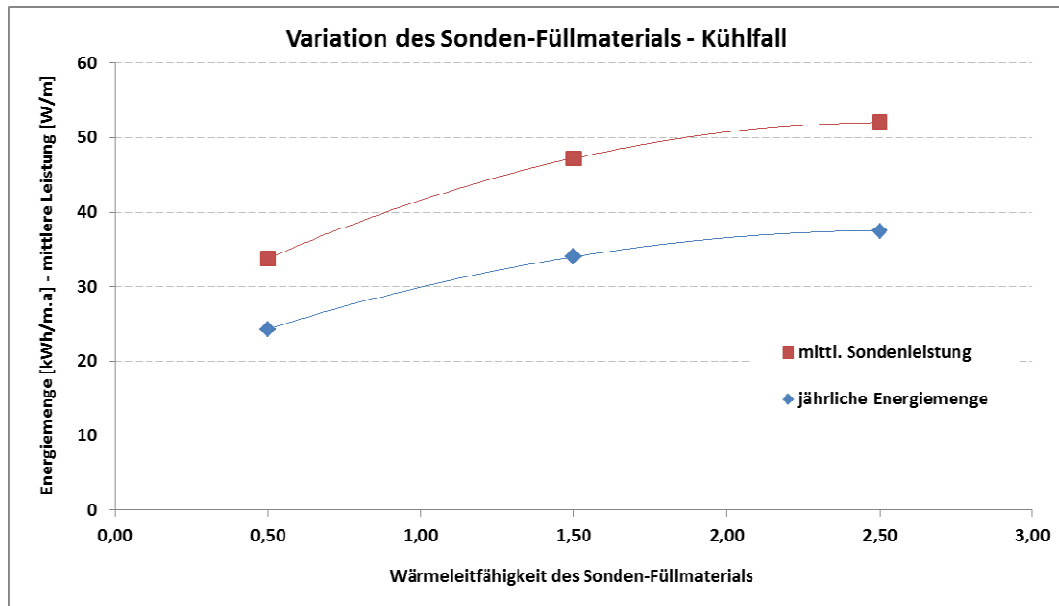


Abbildung 89: Variation der Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials für den Kühlfall

Die Grafik zeigt, am Beispiel des Kühlfalls, dass bei der vorhandenen Situation die Wärmeleitfähigkeit der Sondenfüllung von 1,5-2 W/mK ausreichend ist. Eine weitere Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit führt lediglich zu einer leichten Effizienzsteigerung.

Es ist jedoch zu beachten, dass ein Sondenkern mit einer Wärmeleitfähigkeit von $< 1,5$ W/m:K deutlich ineffizienter ist und damit weniger Energie ins Erdreich eingebracht bzw. diesem entzogen werden kann.

Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Verfüllung stellt damit eine zentrale Maßnahme zur Effizienzerhöhung von Erdwärmesondensystemen dar und ist in der Praxis gut zu realisieren.

7.6.2.4 Variation des Standorts (Bodenbeschaffenheit)

Im Folgenden wird der Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Sondenleistung untersucht. Simulationen haben ergeben, dass die hierfür relevante Stoffeigenschaft des Bodens vor allem seine Wärmeleitfähigkeit ist. Die Dichte spielt dabei ebenso wie die spezifische Wärmekapazität nur eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund wurde lediglich die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches variiert. Ausgehend von der Standard-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Erde}} = 1.5$ W/mK wurden Simulationen mit den Werten 0.5, 3.0 und 4.5 durchgeführt. Die prozentuale Abweichung vom Standardwert ist in **Abbildung 90** dargestellt.

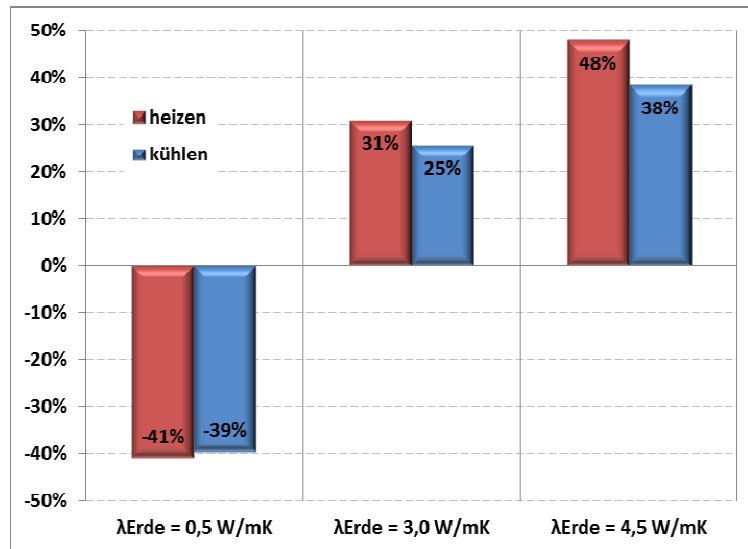


Abbildung 90: Variation der Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens

Die Grafik zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches einen großen Einfluss auf Sondereffizienz hat. In Gebieten mit schlecht leitendem Untergrund ist daher die abführbare Wärmemenge deutlich geringer als in Gebieten mit gut leitendem Untergrund.

Die VDI 4640 teilt den Untergrund in drei Gruppen ein: $\lambda_{\text{Erde}} < 1.5 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{Erde}} = 1.5 - 3.0 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{Erde}} > 3.0 \text{ W/mK}$.

Tabelle 14: Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds. Angelehnt an die Tabelle 1 der VDI 4640 Blatt1 [36]

Schlechter Untergrund (trockenes Sediment) ($\lambda < 1.5 \text{ W/mK}$)	Normaler Festgestein- Untergrund und wasser- gesättigtes Sediment ($\lambda = 1.5 - 3.0 \text{ W/mK}$)	Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda > 3.0 \text{ W/mK}$)
Ton/Schulf (trocken), Sand (trocken bis leicht feucht), Kies/Steine (trocken), Torf, Braun-/Steinkohle	Ton/Schulf (feucht), Sand (feucht), Kies/Steine (feucht), Mergel, Ton-/Schluffstein, Kalkstein	Sandstein, Dolomitstein, Sulfatgestein, Chloridgestein, Granit, Kiesel-schiefer, Gneis
Vorwiegend trockene Lockergesteine	Vorwiegend feuchte Lockergesteine und Festgesteine	Vorwiegend magmatische Festgesteine

7.6.2.5 Sonstige Variationen

Weitere Variationen bezüglich der Material- und Geometriedaten von Erdsonden sind nicht Teil dieser Parameterstudien und wurden nicht mittels eigener Simulationen belegt. Es kann

jedoch, anhand von Literaturangaben, über den Einfluss von weiteren Parametervariationen eine qualitative Aussage getroffen werden.

Einige Maßnahmen am Erdsondendesign verbessern nicht nur den Wärmeübertrag mit dem Erdreich, sondern erhöhen auch den „Kurzschlusseffekt“, der den Wärmeaustausch zwischen Vor- und Rücklauf der Doppel-U-Rohr-Sonde beschreibt. Dieser Effekt tritt immer auf, sobald ein Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf vorliegt. Im Betrieb der Erdwärmesonde ergibt sich die lokale Fluidtemperatur und damit letztendlich die Übertragungsleistung aus der Konkurrenz zwischen Kurzschlusseffekt und Wärmeübertrag mit dem Erdreich. Der Ansatz einer zusätzlichen Dämmung im Bohrloch zwischen Vor- und Rücklauf, um den Kurzschlusseffekt möglichst zu unterbinden, verspricht jedoch laut [11] keine Effizienzsteigerung. Der erhöhte Kurzschlusswiderstand führt lokal zu einer größeren Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf. Dies führt im Vorlauf zu einer erhöhten Wärmeabgabe, verglichen mit einer Erdwärmesonde ohne Zwischendämmung, während im kälteren Rücklauf eine geringere Wärmeabgabe stattfindet. Insgesamt kompensieren sich die beiden Effekte fast gänzlich, sodass sich die Maßnahme der Zwischendämmung eher als nachteilig erweist.

Eine Verbesserung des Wärmeübergangs zum Erdreich durch die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials wirkt sich laut [11] ebenfalls relativ gering aus. Es kommt lediglich zu marginalen Steigerungen der Übertragungsleistung von rund 5 %.

Der Einfluss des Rohrdurchmessers der Doppel-U-Rohr-Sonden auf die Übertragungsleistung ist laut [11] ebenfalls relativ gering. Die Auswahl des Rohrdurchmessers kann demnach eher nach strömungstechnischen und ökonomischen Gesichtspunkten erfolgen.

Simulationen des ZAE Bayern haben ergeben, dass es empfehlenswert ist, für einen maximalen Schenkelabstand von Vor- und Rücklauf der Erdsonden zu sorgen. Um die Übertragungsleistung zu erhöhen, gilt es laut [11], den durch das Bohrloch begrenzten Schenkelabstand maximal zu gestalten. Ein größeres Bohrloch ermöglicht somit auch einen größeren Schenkelabstand, sodass der Kurzschlusswiderstand zwischen Vor- und Rücklauf der Erdsonden weiterhin vergrößert wird.

7.6.2.6 Vergleich mit der VDI 4640

In der VDI 4640 Blatt 2, Tabelle 2 sind mögliche spezifische Entzugsleistungen für Erdwärmesonden kleiner Anlagen bis zu einer Heizleistung von 30 kW angegeben. Dabei wird die spezifische Entzugsleistung in Abhängigkeit vom Untergrund sowie der Laufzeit angegeben.

Die dort angegebenen möglichen spezifischen Entzugsleistungen können zur Sonden-Auslegung herangezogen werden. Die Angaben beziehen sich ausschließlich auf den Heizfall, sodass die angegebene Entzugsleistung der maximalen Wärmepumpen-Verdampferleistung entspricht.

Die Auslegung der Sondenlänge kann über folgende Formel erfolgen:

$$L_{EWS} = \frac{\hat{Q}_{EWS}}{\hat{q}_{EWS}} \text{ [m]} \quad \text{Gleichung 7}$$

L_{EWS} : benötigte Gesamtlänge der Erdwärmesonden [m]

\hat{Q}_{EWS} : maximale Entzugsleistung bzw. eingespeiste Leistung an der Erdsonde (= z.B. maximale Verdampferleistung, maximale Rückkühlleistung) [W]

\hat{q}_{EWS} : spezifische Entzugsleistung bzw. Einspeiseleistung (nach VDI, Simulation) [W/m]

Für eine korrekte Dimensionierung der Sondenlänge ist somit sowohl der Zähler (maximale Entzugsleistung an der Sonde) als auch der Nenner (spezifische Entzugsleistung) der Gleichung verantwortlich.

Ein häufiger Grund für die Überdimensionierung von Erdsonden ist die Auslegung auf die maximale Entzugsleistung. Diese entspricht im Heizfall mittels Wärmepumpe der maximalen Verdampferleistung. Da dieser extreme Auslegungspunkt meistens mit einem gewissen Sicherheitsspielraum gewählt wird und nur wenige Stunden im Jahr vorkommt, ist für den Großteil des Nutzungszeitraums die Erdsondenanlage deutlich überdimensioniert.

Des Weiteren hängt die Sondendimensionierung elementar von der Annahme der spezifischen Entzugsleistung ab (siehe Gleichung 7). Die VDI 4640 gibt wie erwähnt Richtwerte abhängig von der Bodenbeschaffenheit und der Laufzeit an. In **Abbildung 91** sind für den Heizfall die simulierten maximal zulässigen mittleren Entzugsleistungen sowie die Werte der VDI 4640 über der Laufzeit dargestellt.

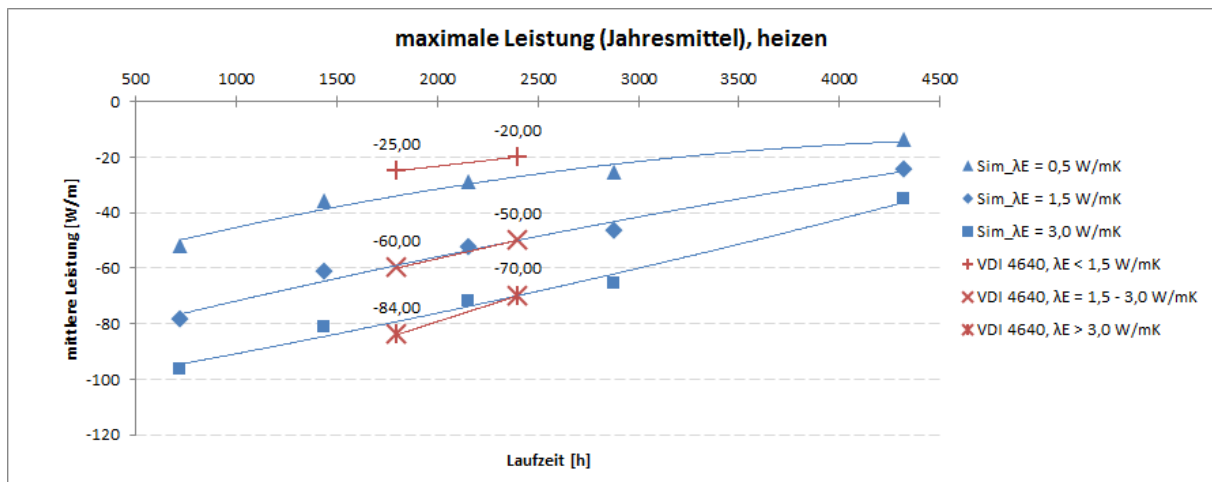


Abbildung 91: simulierte maximale Sondenleistung im Heizfall sowie die Angaben der VDI 4640

Der Begriff „maximal zulässige mittlere Entzugsleistungen“ bezeichnet die über das Jahresmittel maximal mögliche Entzugsleistung, welche die Grenzen der VDI 4640 zulassen (max. 17 K Eintrittstemperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich und nicht mehr als 11 K Eintrittstemperaturdifferenz im Wochenmittel).

Die Grafik zeigt, dass die VDI 4640 tendenziell geringere maximale Entzugsleistungen angibt, als die Simulationen ergeben haben.

Für eine Laufzeit von 2400 h bei normalem Festgestein-Untergrund und wassergesättigtem Sediment ($\lambda = 1.5 - 3.0 \text{ W/m.K}$) gibt die VDI eine spezifische Entzugsleistung von 50 W/m an. Der simulierte Wert für diese Laufzeit liegt zwischen 50 W/m ($\lambda = 1.5$) und 70 W/m ($\lambda = 3.0$). Wird zum Beispiel eine maximale Verdampferleistung von 5 kW benötigt, so kommt man bei einer Auslegung nach VDI auf 100 m Sondenlänge, bei Auslegung anhand der Simulationsergebnisse lediglich auf 83 m Sondenlänge ($5000 \text{ [W]} / 60 \text{ [W/m]}$).

Eine Auslegung bezogen auf die mittlere maximale Entzugsleistung beinhaltet ebenfalls noch einen gewissen Puffer, sodass eine Unterdimensionierung der Sonden praktisch unmöglich ist. In **Abbildung 92** ist ein Tagesgang eines Entzugszyklus dargestellt.

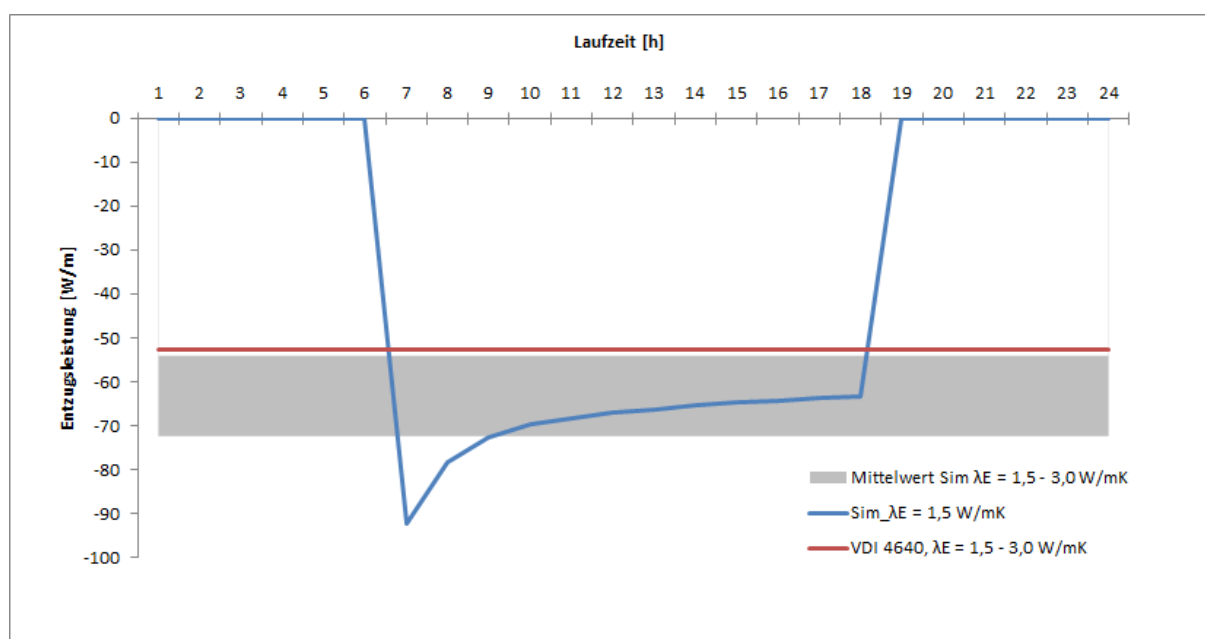


Abbildung 92: simulierter Tagesgang im Winter

Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Entzugsleistung zu Beginn des Zyklus deutlich höher ist als dessen Mittelwert. Die angegebene Entzugsleistung der VDI (rote Linie) liegt deutlich unterhalb der anzusetzenden maximalen Entzugsleistung. Maximale Verdampferleistungen beim Wärmepumpenbetrieb treten gewöhnlicherweise nur zu Beginn eines Heizzyklus auf, sodass diese Spitzen von einem regenerierten Erdreich abgefangen werden können.

7.6.2.7 Ökologischer und ökonomischer Nutzen

In diesem Abschnitt sollen die Simulationsergebnisse unter primärenergetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eingeordnet werden. Dazu muss die erzeugte geothermische

Wärmemenge ins Verhältnis zur benötigten elektrischen Hilfsenergie der Solepumpe gesetzt werden. In diesem Schritt muss die elektrische Leistung der Solepumpe bestimmt werden. Für die Dimensionierung der Solepumpen gibt es jedoch kaum ein standardisiertes Verfahren. Entsprechend streuen die Pumpenaufnahmeleistungen pro Meter Erdwärmesonde sehr stark. Im Mittel liegt die Aufnahmeleistung bei knapp 2 W/m [17].

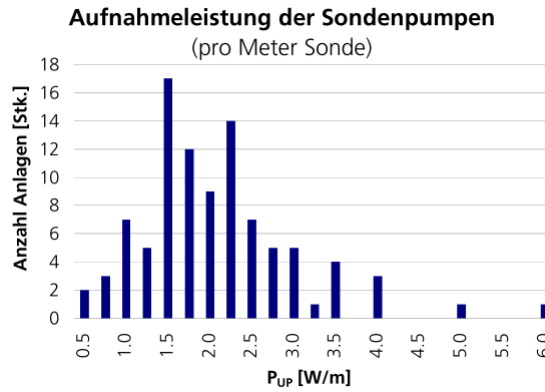


Abbildung 93: elektrische Aufnahmeleistung von Solepumpen [17]

Für die simulierte 100 m-Erdwärmesonde bedeutet dies eine Pumpenleistung von 200 W. Wie viel geothermische Energie demnach aus einer kWh elektrischer Energie entzogen werden kann, ist in **Abbildung 94** abhängig von der Eintrittstemperaturdifferenz dargestellt.

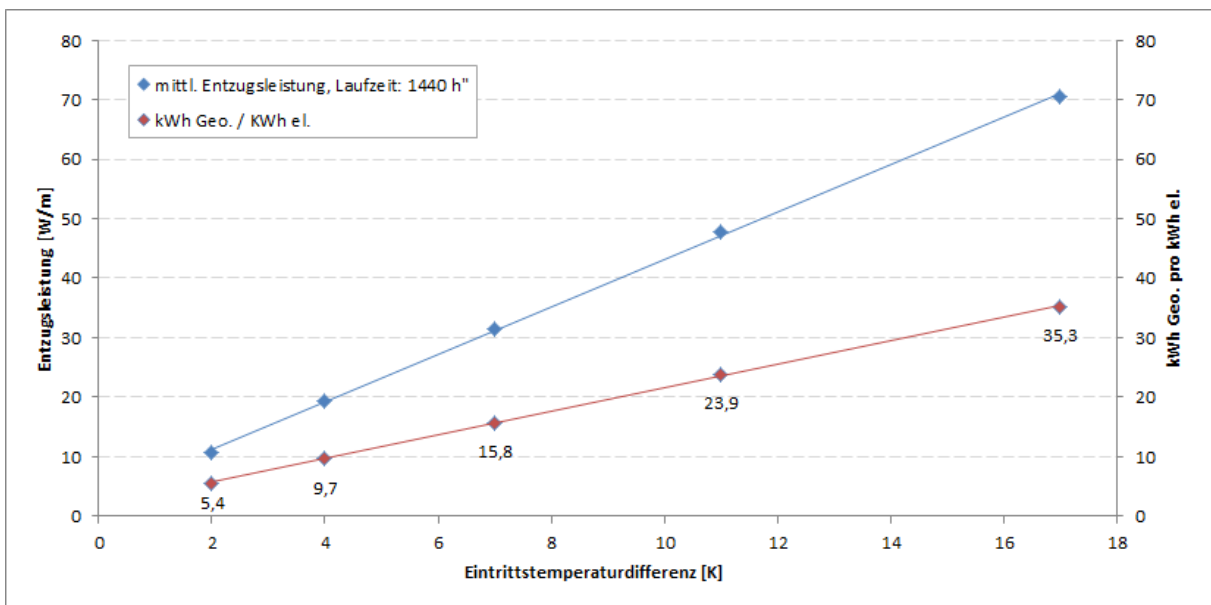


Abbildung 94: Geothermische Energie pro elektrisch aufgewendete Energie

In der Grafik ist der Kühlfall dargestellt – der Heizfall verhält sich genau spiegelbildlich. Die Eintrittstemperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich ist – wie bei der Entzugsleistung – der entscheidende Parameter für eine große geothermische Ausbeute pro kWh elektrischer Antriebsenergie.

Bilanziert man die Investitionskosten sowie die verbrauchsgebundenen Kosten nach der Annuitätenmethode der VDI 2067, so erhält man eine jährliche Gesamtannuität.

Für die Berechnung in **Abbildung 95** wurde ein Betrachtungszeitraum von 20 Jahren angesetzt, sowie ein Zinssatz von 4 % und eine Strompreissteigerung von 5 % zugrunde gelegt.

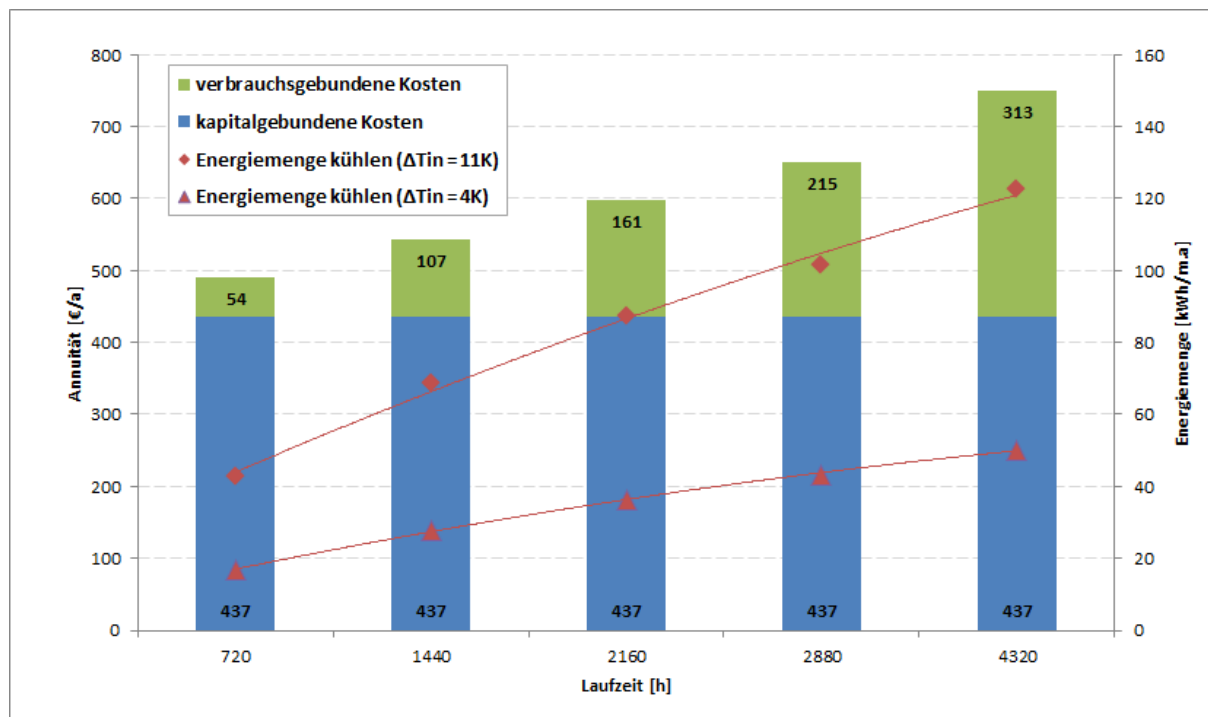


Abbildung 95: jährliche Gesamtannuität für den Kühlfall, abhängig von der Laufzeit unterteilt nach Kostenarten

Die in **Abbildung 95** angesetzten kapitalgebundenen Kosten bestehen lediglich aus den Investitionen für die Erdsonden sowie der Solepumpe. Die Erdsondenkosten sind nach [16] berechnet (für eine 100 m-Sonde: 6700 €) und mit einer Nutzungsdauer von 40 Jahren angesetzt. Die Solepumpe fließt mit Investitionskosten von 400 Euro und einer Nutzungsdauer von 10 Jahren in die Berechnung ein.

Die verbrauchsgebundenen Kosten ergeben sich aus der Multiplikation der Laufzeit der Solepumpe, die sich an den Betriebsstunden der Geothermieanlage orientieren, und der elektrischen Leistungsaufnahme der Pumpe (hier: 200 W).

Setzt man die jährliche Gesamtannuität ins Verhältnis zu der theoretischen „gewinnbaren“ geothermischen Energiemenge, so erhält man einen theoretischen geothermischen Kälte-/Wärmepreis (vgl. **Abbildung 96**).

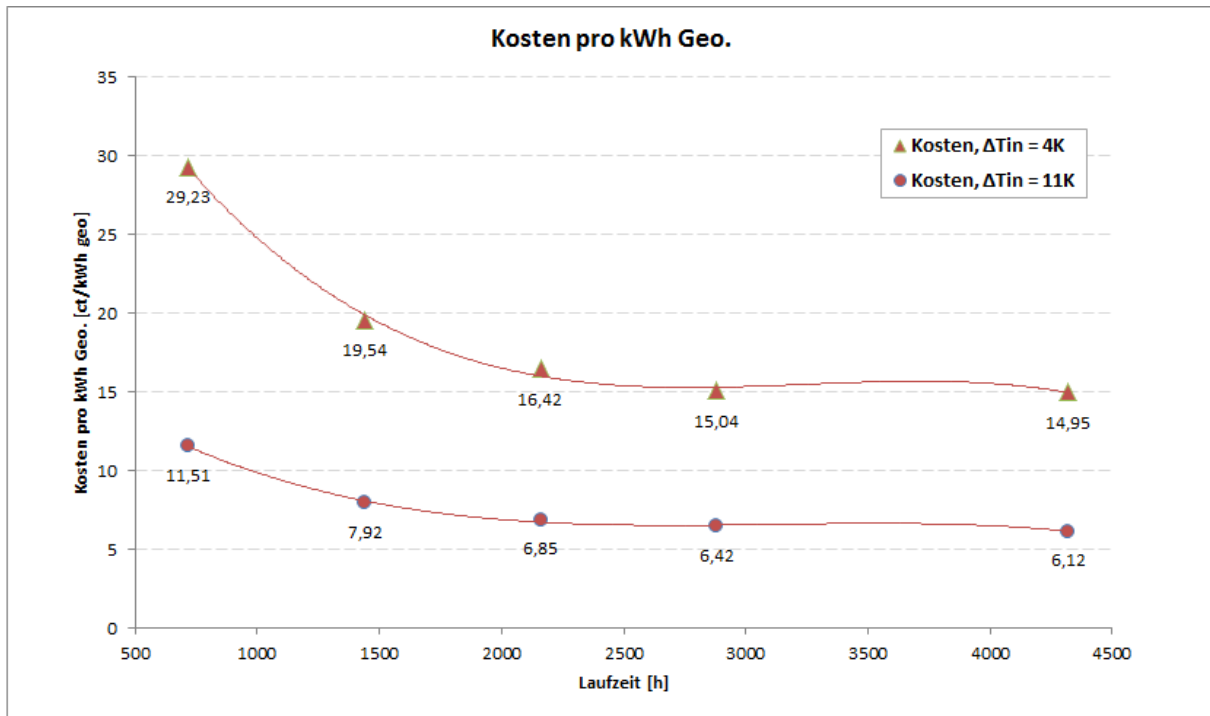


Abbildung 96: geothermischer Kälte-/Wärmepreis

Die Grafik zeigt, nach den oben getroffenen Annahmen, den Preis für eine Kilowattstunde geothermische Energie in Abhängigkeit von der Laufzeit. Dabei sind Werte für eine Eintrittstemperaturdifferenz von 4 sowie 11 K angegeben.

Schnell wird deutlich, dass eine Laufzeit von mindestens 2000 Betriebsstunden pro Jahr notwendig ist, um einen einigermaßen wirtschaftlichen Geothermiepreis zu erreichen. Ist die Eingangstemperaturdifferenz lediglich bei 4 K, wie es oft bei freier Kühlung mit Wassergeführten Systemen vorkommt, so ist der Geothermiepreis sehr hoch und schneidet gegenüber konventioneller Technik schlecht ab. Geht man davon aus, dass bei konventioneller Kälteerzeugung der Preis bei ca. 11 ct/kWh liegt, so ist eine freie Kühlung nur mit einer deutlich höheren Eingangstemperaturdifferenz und damit entsprechenden Systemtemperaturen konkurrenzfähig.

Eine ganzjährige Nutzung der Geothermieanlage (Heiz- und Kühlanwendung) erhöht die Laufzeit und trägt zur Wirtschaftlichkeit bei.

Die Feldstudie des Fraunhofer ISE gibt eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen (COP) mit Geothermie von 3,3 für Gebäude im Bestand und 3,9 für Neubauten an [27]. Gegenüber den Anlagen mit Außenluft als Wärmequelle (COP=2,6 (Bestand) bzw. 2,9 (Neubau)) ist dies eine Reduktion des elektrischen Energieverbrauches um 21 % im Bestand und 26 % im Neubau. Dies bedeutet, dass pro kWh Geothermie (kWh_{Geo}) im Be-

stand rund 0,19 kWh elektrische Energie oder 0,51 kWh Primärenergie eingespart werden und im Neubau 0,18 kWh elektrische Energie oder 0,49 kWh Primärenergie.

Geht man von einem Strompreis von rund 24 ct/kWh (Arbeitspreis + Grundpreis) aus, so entsprechen Einsparungen von 0,19 kWh ca. 4,56 ct. pro kWh Geothermie (0,18 kWh etwa 4,32 ct/kWh_{Geo}).

Vergleicht man die Ersparnisse durch die Nutzung der Geothermie als Wärmequelle gegenüber der Außenluft als Wärmequelle für Wärmepumpen mit den Kosten für eine kWh geothermische Energie (**Abbildung 96**), so ist nach diesen Berechnungen der wirtschaftliche Nutzen noch nicht gegeben. Einsparungen von rund 4,5 ct/kWh_{Geo} stehen Kosten durch Investition und Betreiben der Erdsonden von rund 6 ct/kWh_{Geo} gegenüber.

Es muss jedoch beachtet werden, dass diese Berechnung lediglich auf Mittelwerten beruht. Die Feldstudie [27] enthält durchaus Wärmepumpenanlagen mit Geothermienutzung mit deutlich höheren Jahresarbeitszahlen, wodurch sich eine höhere Einsparung ergibt. Es ist also mit möglichst großen Übertragerflächen zu arbeiten, um z. B. im Heizfall mit niedrigem Temperaturniveau an der Wärmesenke auszukommen, was zu einer höheren Wärmepumpeneffizienz (größerer COP) führt. Ebenfalls muss bedacht werden, dass der Pumpenstrom der Erdsonden in der obigen Überschlagsberechnung doppelt bilanziert wurde: zum einen in der Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätenmethode und zum andern steckt dieser Stromverbrauch im COP der Gesamtanlage. Außerdem wichtig für ein wirtschaftliches Betreiben ist eine saubere Regelung der Solepumpe. Diese sollte direkt mit dem Verdichter der Wärmepumpe (Kältemaschine) geregelt sein, um unnötiges Umwälzen der Sole und den damit unnötig anfallenden Stromverbrauch zu vermeiden.

Die Berechnung zeigt jedoch, wie gut abgestimmt das System sein muss, um eine ökonomische Nutzung von oberflächennahen Geothermie zu gewährleisten.

7.6.3 Energetische wie wirtschaftliche Bewertung

Innerhalb der energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Geothermieanlagen wird im Folgenden das tatsächliche Leistungsvermögen unterschiedlicher Erdwärmetauscher-Systeme dargestellt und Optimierungsmaßnahmen diskutiert. Dazu dienen Messergebnisse aus fünf Gebäudeprojekten mit oberflächennaher Geothermienutzung.

Wenn die Betonkernaktivierung als Verteilsystem der Kühlung genutzt wird, fällt die abgeführte thermische Leistung des Erdwärmetauschers auf 5 bis 10 W/m.

Zwei Faktoren beeinflussen die reduzierte Leistung: Die Temperaturdifferenz zwischen der Fußbodenkühlung (18-22 °C) und dem Erdreich ist geringer als die zwischen Lüftungsanlage und Erdreich bei Außenlufttemperaturen bis 35 °C. Ferner ist die Wärmeübertragungsfläche zwischen Fußboden und Raumluft mit 157 m² eher gering. Bei etwa 20 W/m² Kühlleistung einer Betonkernaktivierung können mit dieser Fläche nur 3 kW vom Fußboden übertragen werden, was weniger als 10 W pro Sonden-Meter entspricht.

Die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf des Erdwärmetauschers liegt durchschnittlich bei 3 K und ist damit geringfügig höher als bei Benutzung der Lüftungsanlage, da der Volumenstrom aufgrund des hohen Druckabfalls im Betonfußboden reduziert ist. Eine Steigerung der Pumpenleistung könnte die Temperaturspreizung verringern und dadurch die mittlere Oberflächentemperatur um 1-1,5 K absenken. Dies würde jedoch die Kühlleistung im Gebäude nicht signifikant steigern. Eine größere Betonkernaktivierungsfläche würde die Leistung des Erdreichwärmetauschers verbessern. Im Sommer 2006 wurden die Messungen wiederholt mit einem ähnlichen Ergebnis.

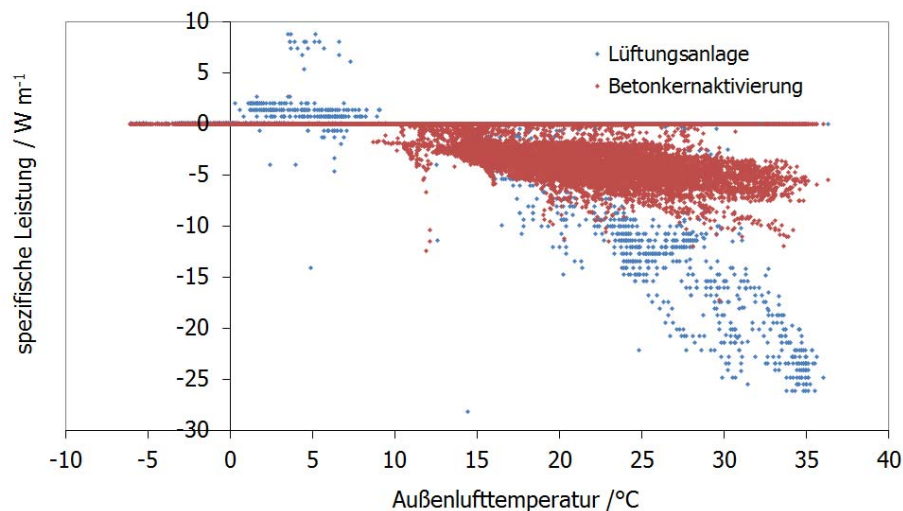


Abbildung 98: Gemessene Leistung des vertikalen Erdwärmetauschers bei entsprechender Außenlufttemperatur im Freiburger SIC-Gebäude 2006

Wenn man die abgegebene Leistung des Erdwärmetauschers gegenüber der Fluideintrittstemperatur in das Erdreich darstellt, verringert sich die Streuung der Leistungswerte. Diese Soleeintrittstemperatur schwankt im Sommer zwischen 16,5 und 24 °C.

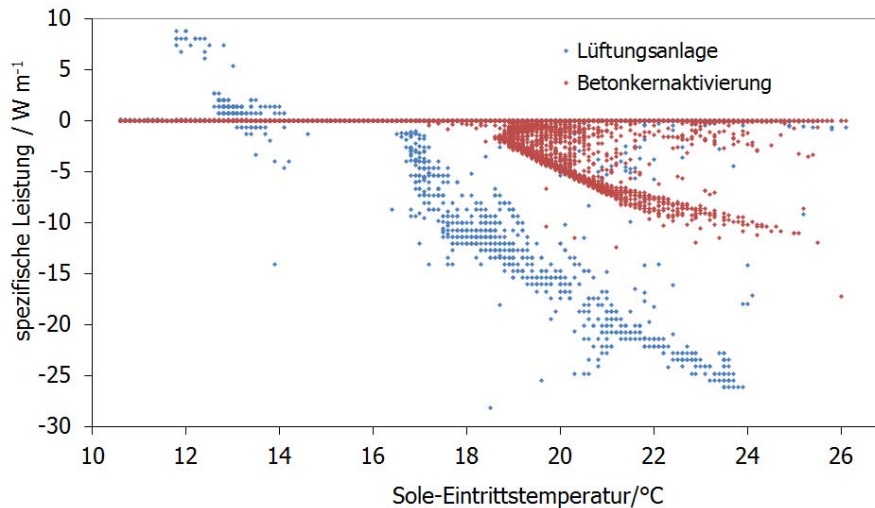


Abbildung 99: Gemessene Leistung als Funktion der Sole-Eintrittstemperatur in das Erdreich (2006)

Je nach Betriebsstunden der Anlage wurde in den beiden Messjahren pro Meter Sonde maximal 7 kWh Heizenergie und 12 kWh Kühlenergie gemessen.

Die niedrige Arbeitszahl für Heizen im Jahr 2006 beruht auf der Tatsache, dass die geothermische Anlage oft bei einer geringen Temperaturdifferenz von Umgebungsluft und Erdwärmetauscher und damit geringer Heizleistung betrieben wurde.

Tabelle 15: Zusammenfassung der gemessenen Ergebnisse für 400 m vertikale Erdwärmetauscher des SIC-Gebäudes in Freiburg.

Jahr	Kühlenergie / kWh	Heizenergie / kWh	Arbeitszahl Kühlen	Arbeitszahl Heizen	Stunden Kühlen Seminar	Stunden Fußboden-Kühlen	Stunden Heizen
2005	2759	2846	20.1	12.8	233	2289	856
2006	4873	246	13.5	5.2	327	2911	289

7.6.3.1.2 Vertikalsonden für indirekte Nutzung für Heizung

Ein 2006 fertiggestelltes Jugendzentrum in Ostfildern mit 474 m² Bruttogeschossfläche wurde nahezu im Passivhausstandard gebaut, nur die großen Fensterflächen sind als 2-fach Wärmeschutz-Verglasung ausgeführt.

Der Energiebedarf wird durch eine zweistufige Sole/Wasser-Wärmepumpe gedeckt (Vitocal 300 Typ BW mit 16,6 kW Heizleistung (Betriebspunkt B0/W35)), die an zwei 134 m tiefe Doppel-U-Erdwärmesonden angeschlossen ist. Die Sonden sind mit einer Sole (Monoethylglykohl-Wasser-Gemisch mit einer Konzentration von 25 %) gefüllt. Die Umwälzung der Sole erfolgt durch eine Pumpe mit 300 W elektrischer Anschlussleistung.

Die Fußbodenheizung, mit 35 °C maximalem Vorlauf, sowie die Lüftungsanlage werden über einen Pufferspeicher versorgt. Das Jugendzentrum hat hervorragende Heizenergie-Verbrauchswerte von 14 kWh/m².a (2008), 15 kWh/m².a (2009) und 20 kWh/m².a (2010).

Die Arbeitszahl oder Seasonal Performance Factor (SPF) der Wärmepumpe ist ein Qualitätsmerkmal für eine Wärmepumpe und beschreibt das Verhältnis der Nutzenergie (Heizung) zum Aufwand (elektrische Energie). Die gemessene Jahresarbeitszahl ohne Hilfsenergie liegt im Jahr 2010 bei 3,94. Wird die elektrische Energie der Solepumpe berücksichtigt, sinkt die Jahresarbeitszahl jedoch auf 2,63.

Speziell in der Übergangsperiode (März, April, Mai, September, Oktober) ist die Solepumpe nahezu durchgehend in Betrieb, selbst wenn die Wärmepumpe nicht in Betrieb ist. Mit korrekter Regelung der Solepumpe basierend auf der Kompressorlaufzeit, könnte eine deutlich höhere Arbeitszahl von 3,14 erreicht werden.

Die spezifische Leistung der Erdsonden liegt maximal bei etwa 66 W/m (siehe **Abbildung 100**), wenn beide Verdichterstufen der Wärmepumpe in Betrieb sind. Ist nur ein Verdichter in Betrieb, was in den meisten Fällen der Fall ist, liegt die maximale Leistung der Erdsonden bei ca. 40 W/m, was einer Absolutleistung von rund 10 kW entspricht.

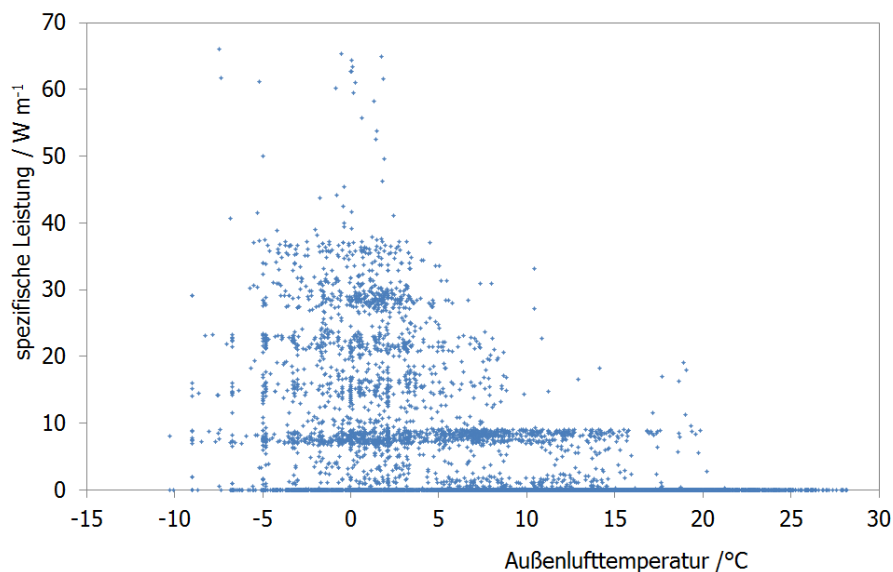


Abbildung 100: spezifische Leistung der Erdsonden in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Die spezifische Leistung korreliert besser mit der Sole-Eintrittstemperatur ins Erdreich, da die Temperaturdifferenz zwischen Erdreich und Sole die Leistungsübertragung bestimmt.

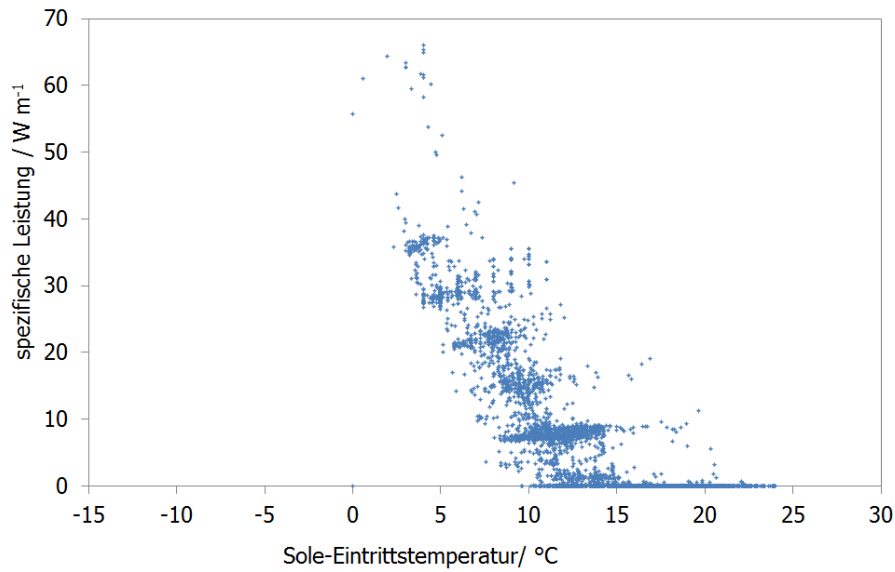


Abbildung 101: Leistungsübertragung als Funktion der Sole-Eintrittstemperatur ins Erdreich.

Die wenigen Leistungsspitzen der Erdsonden treten hauptsächlich morgens auf, wenn die Wärmepumpe zum ersten Mal eingeschaltet wird und hohe Heizleistungen angefordert werden.

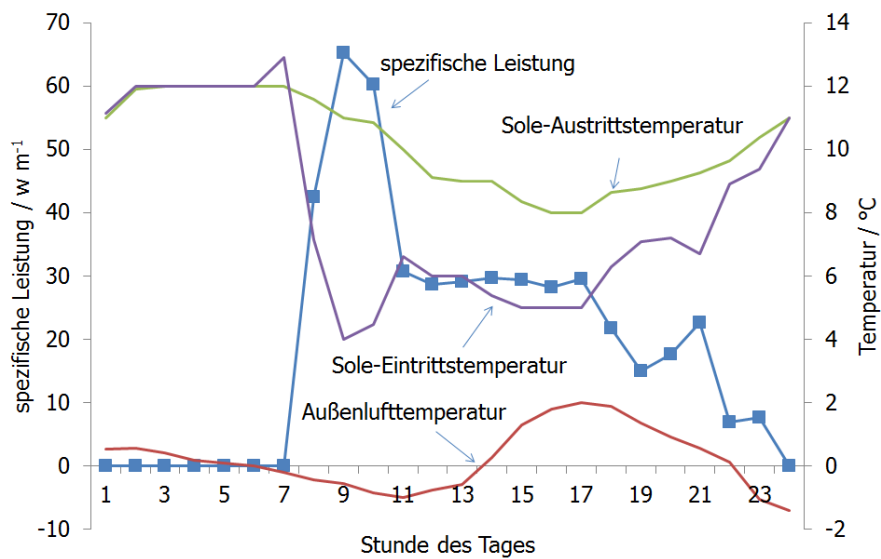


Abbildung 102: zeitlicher Verlauf der Erdsondenleistung und Temperaturen während des Betriebs der Wärmepumpe.

7.6.3.1.3 Vertikalsonden in Gründungspfähle

Das Bürogebäude der Firma Elektror GmbH mit einer Nutzfläche von 2962 m² wurde 2008 in Ostfildern erbaut. Heizenergie und Kühlung über thermische Absorptionskälte werden von

einem mit Biomasse betriebenen Nahwärmenetz bereitgestellt. Die Verteilung der Wärme/Kälte erfolgt über Betonkernaktivierung kombiniert mit berippten Radiatoren in den Lüftungsauslässen.

Zusätzlich wird die Zuluft der mechanischen Lüftung mit einem Volumenstrom von $6550 \text{ m}^3/\text{h}$ durch die Erdwärmetauscher, welche in den Gründungspfählen integriert sind, vorgewärmt bzw. vorgekühlt.

Insgesamt wurden 104 Fundamentpfähle (FRANKpfähle) mit integrierten U-förmigen Rohren von jeweils 4 bis 8 m Länge (Gesamtlänge 624 m) ausgestattet. Die Pfähle liegen recht nah beieinander (zwischen 2,5 m und 7 m Abstand).

Abbildung 103 zeigt die Leistungsübertragung der Fundamentpfähle in Watt pro Meter als Funktion der Außenlufttemperatur für das gesamte Jahr 2010. Die Gesamtleistung der Anlage liegt im Bereich von 7 kW Heizen und 14 kW Kühlen, was einem Maximum von 24 W m^{-1} Kühlleistung bei 36 °C Außentemperatur und 14 W/m Heizleistung bei -5 °C entspricht.

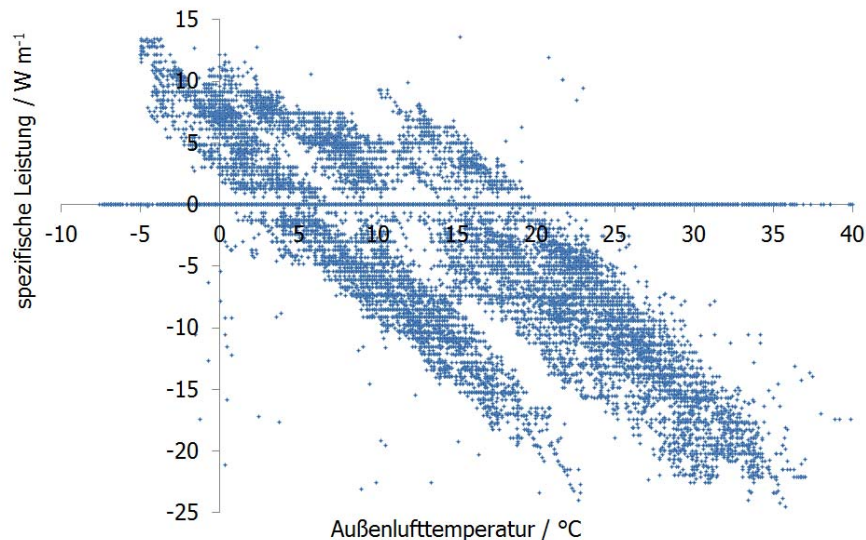


Abbildung 103: Leistung des Gründungspfahl-Wärmetauschers als Funktion der Außenlufttemperatur.

Die Sole-Eintrittstemperatur in den Gründungspfahl Wärmetauscher bewegt sich in einem relativ geringen Temperaturbereich zwischen $15,5$ und $24,5 \text{ °C}$, ähnlich zu der Anlage des SIC-Gebäudes in Freiburg mit 80 m tiefen vertikalen Wärmetauschern.

Die Leistungsübertragung ist vergleichbar mit dem eines vertikalen Wärmetauschers.

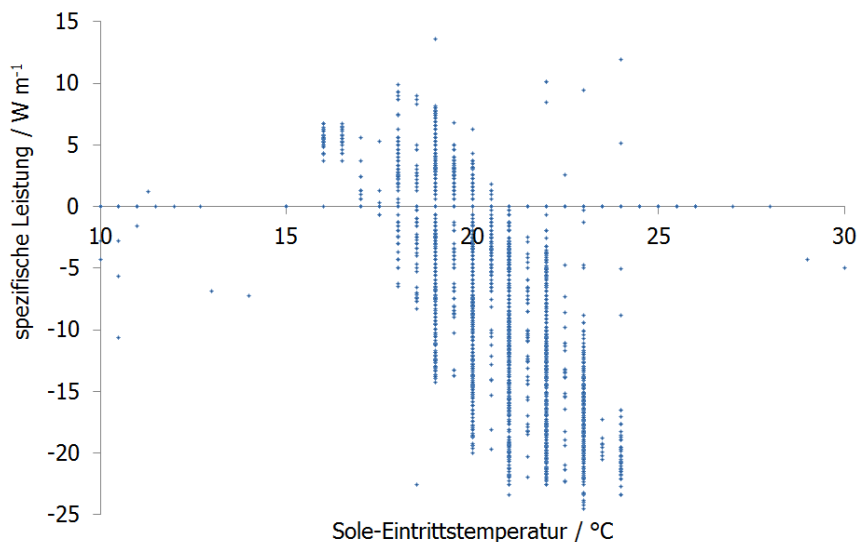


Abbildung 104: Übertragungsleistung der Gründungspfähle als Funktion der Eintrittstemperatur.

Die Außenluft wird im Mittel um etwa 5 K abgekühlt, während die Sole-Temperatur über diese zwei heißen Wochen von 19 °C auf 21 °C ansteigt. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf-Temperatur des Erdwärmetauschers liegt bei 1 bis 2 K.

Der Effizienz der Wärmeübertragung zwischen Solekreis und Luft in der Messperiode ist relativ niedrig zwischen 46 bis 54 %.

7.6.3.1.4 Luft-Erdwärmetauscher in dem Passivstandard Bürogebäude Lamparter

In dem Passivstandard Bürogebäude der Firma Lamparter in Weilheim/Deutschland kühlt ein Luft-Erdwärmetauscher die Zuluft, mit der das Gebäude versorgt wird. Der Erdwärmetauscher ist um das Gebäude positioniert und besteht aus zwei 90 m langen Polyethylen Rohren mit einem Durchmesser von 0,35 m. Die Rohre liegen in einer durchschnittlichen Tiefe von 2,80 m im Erdreich und sind im Abstand von 0,9 m zueinander verlegt.

Der Luft-Erdwärmetauscher des Bürogebäudes ist hauptsächlich für das Vorwärmen der Außenluft im Winter konzipiert. Er reduziert den Lüftungwärmebedarf und vermeidet das Einfrieren der Wärmerückgewinnungsanlage. Im Sommer wird er zur Vorkühlung der Frischluft verwendet. Bei einem Volumenstrom von 1900 m³/h und einem Druckverlust von 175 Pa wird eine Luftwechselrate von 0.6 h⁻¹ bereitgestellt.

Innerhalb der Rohre des Luft-Erdwärmetauschers sind im Abstand von 9 m Temperatursensoren angebracht. Die durchschnittliche Kühlleistung in den 3 Messjahren liegt bei 6 bis 10 W/m. Die mittlere Heizleistung zwischen 6 und 9 W/m. Dies entspricht einer jährlichen Käl-

temenge von 25 kWh/m sowie einer Wärmemenge von 17 kWh/m. Die maximale Kühlleistung beträgt 45 W/m und die maximale Heizleistung 34 W/m.

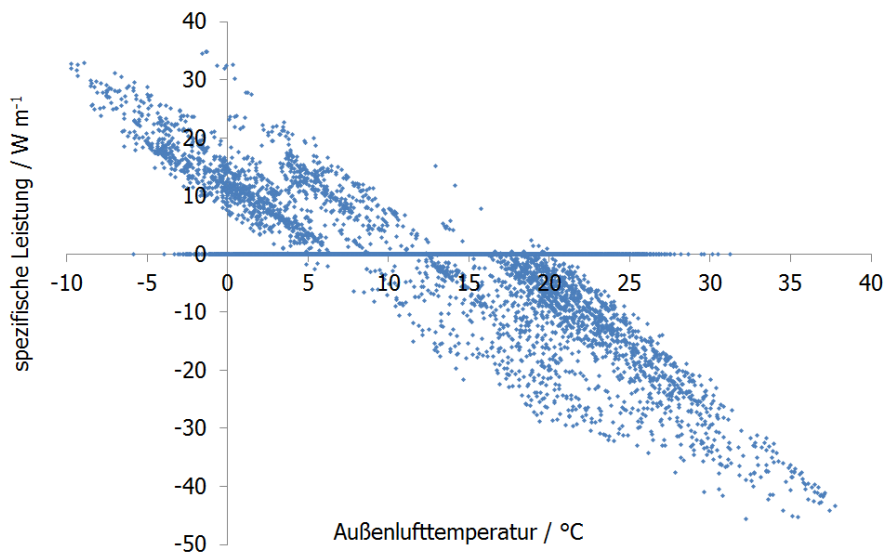


Abbildung 105: Leistung des Luft-Erdwärmetauschers vom Lamparter-Gebäude als Funktion der Umgebungstemperatur, was ebenfalls der Eintrittstemperatur entspricht.

Die Jahresarbeitszahl wird über die Summe von Heiz- und Kühlleistung dividiert durch die zusätzliche elektrische Energie für den Druckverlust des Erdreichwärmetauschers berechnet. Sie erreicht exzellente Werte von 50, 35 und 38 in den Jahren 2001 bis 2003. Allerdings kann der Erdwärmetauscher nicht die volle tägliche Kühllast des Gebäudes abführen, da der hygienische Luftwechsel die Leistung beschränkt. Von den durchschnittlichen täglichen internen Kühllasten von 131 Wh/m², führt der Erdwärmetauscher 24 Wh/m² ab, also 18 %.

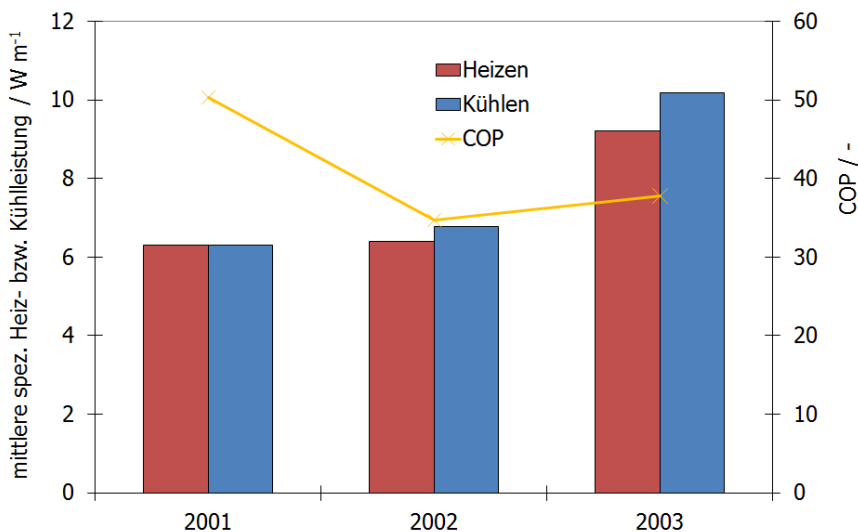


Abbildung 106: Gemessene mittlere Leistungen des Luft-Erdreich-Wärmetauschers und Jahresarbeitszahlen.

7.6.3.1.5 Horizontalabsorber

Eine Alternative zum direkten Luft-Erdreich-Wärmetauscher ist die Zirkulation einer Solelösung durch bodennahes Erdreich und damit die indirekte Kühlung der Luft über einen Sole-Luftwärmetauscher.

In einem auf Passivhausstandard sanierten Bürogebäude in Tübingen wurde ein solcher Horizontalabsorber verlegt. Für das Luft-Vorwärmen und -Vorkühlen des Ebök Gebäudes wurden fünf horizontale Erdwärmetauscher mit einer jeweiligen Länge von 100 m ca. 1,2 m unter der Erdoberfläche installiert. Die Einbindung in das mechanische Lüftungssystem erfolgt ebenfalls über einen Wärmetauscher in der Zuluft, vergleichbar wie beim SIC-Gebäude in Freiburg (vgl. **Abbildung 105**). Während des Sommers wird dieser zur Vorkühlung der Zuluft verwendet. Der Zuluft-Volumenstrom beträgt tagsüber $1750 \text{ m}^3/\text{h}$.

Die Erdreichtemperatur wurde über 2 Jahre zwischen den Rohren in 1,2 m Tiefe und mit 0,5 m Abstand vom Gebäude gemessen und mit den unbeeinflussten Bodentemperaturen verglichen.

Während des Betriebs des Erdwärmetauschers, zum Beispiel für 2 Monate im Sommer 2006, stieg die durchschnittliche Erdreichtemperatur um 2-3 K an.

Während einer heißen 14-tägigen Messperiode im Juni 2005 wurde eine durchschnittliche Kühlleistung von 1,5 kW mit einem Maximum von 3,5 kW gemessen. Wegen dem geringen Abstand und der geringen Tiefe der Rohre liegt die maximale Leistung eines Rohres nur bei 7 W pro Meter.

Der zusätzliche Druckverlust durch den Sole/Wasser-Wärmetauscher beträgt nur 12 Pa. Der verwendete Ventilator benötigt eine elektrische Leistung von 30 W, um diesen Druckverlust zu überwinden, während die Solepumpe ca. 60 W Anschlussleistung benötigt. Das Ergebnis ist eine durchschnittliche Arbeitszahl von 18,4 bei einer maximalen Leistungsahl von 40. Außerdem wird sichtbar, dass sich während einer warmen Phase in den letzten zwei Mess-tagen das Erdreich stark erwärmt hat und so keine Kühlung der Zuluft mehr möglich ist. Diese hohe Erdreichtemperatur ist hauptsächlich durch die geringe Tiefe der Rohre im Erdreich bedingt.

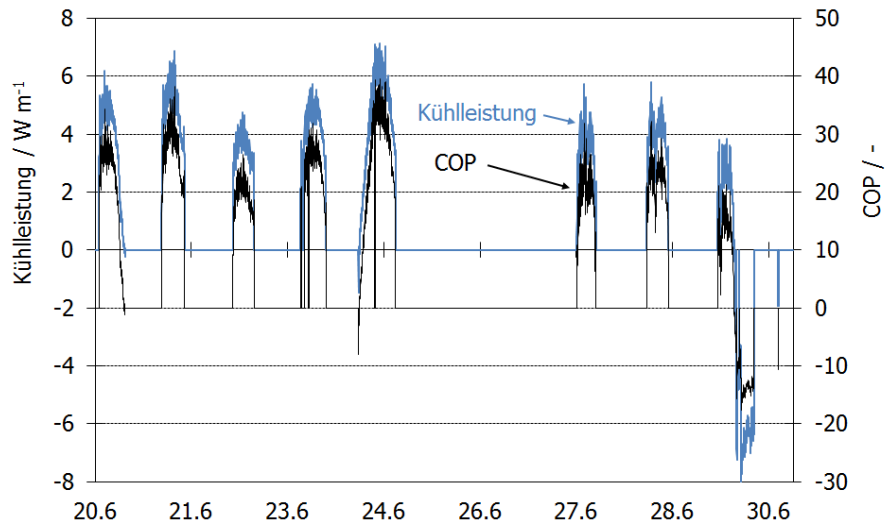


Abbildung 107: Gemessene Kühlleistung pro Meter des horizontalen Wärmetauschers und die zugehörige Leistungszahl (COP).

Die Außenluft kann durch den Wärmetauscher bis zu 7 K gekühlt werden. Trotzdem liegt die Zulufttemperatur des Gebäudes tagsüber immer noch bei 28 °C. Die Erdreichtemperatur steigt Ende Juli auf bis zu 20 °C an.

Der durchschnittliche logarithmische Temperaturunterschied zwischen Sole- und Lufttemperatur liegt am Wärmetauscher bei 6,3 K.

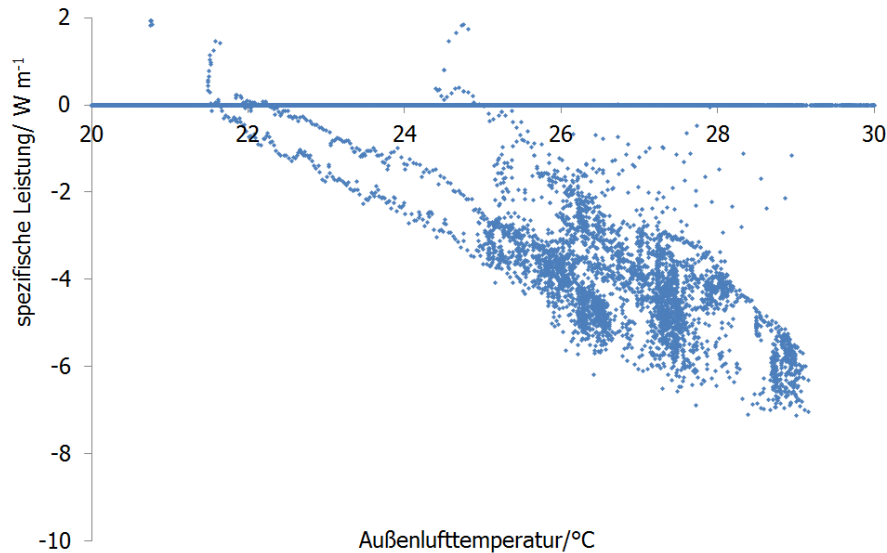


Abbildung 108: Abgegebene Wärme an das Erdreich als Funktion der Außenlufttemperatur für den horizontalen Wärmetauscher.

Die abgeführte Leistung an das Erdreich steigt mit steigender Außenlufttemperatur, jedoch mit einer viel geringeren Steigung als für den direkten Wärmeaustausch der Außenluft mit dem Erdreich.

Wiederum ist die Korrelation besser, wenn man die ans Erdreich abgegebene Wärme gegenüber der Sole-Eintrittstemperatur darstellt. Es wird deutlich, dass sich die Eintrittstemperatur in einem ziemlich schmalen Temperaturband (zwischen 20 und 24 °C) bewegt.

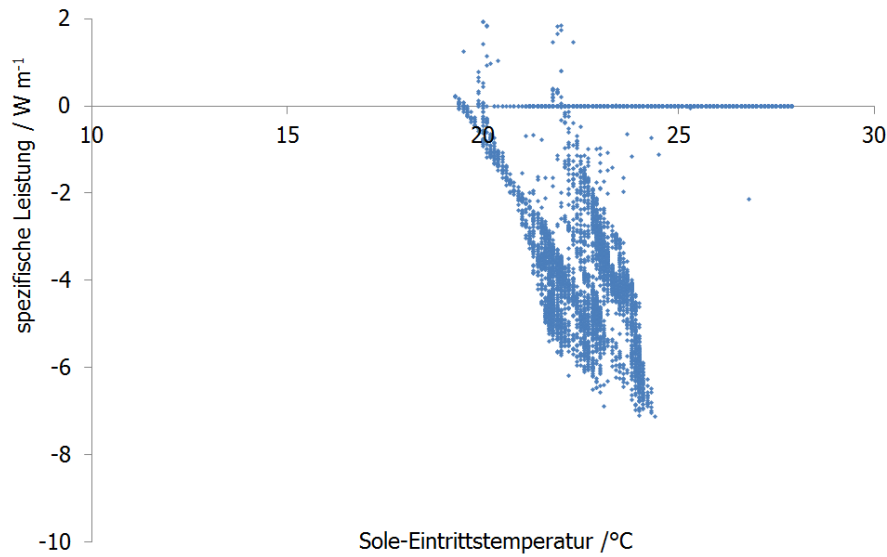


Abbildung 109: Abgegebene Wärme an das Erdreich als Funktion der Sole-Eintrittstemperatur für den horizontalen Wärmetauscher

7.6.3.1.6 Zusammenfassung der messtechnischen Untersuchungen

In diesem Abschnitt wurden direkte und indirekt genutzte Erdwärmetauscher mit den Medien Luft und Sole anhand von Messdaten beschrieben und analysiert. Die gemessenen Leistungszahlen sind in **Tabelle 16** zusammengefasst.

Tabelle 16: Zusammenfassung der Leistungsmessungen der untersuchten Anlagen

Gebäude		SIC Freiburg	Jugendhaus Ostfildern	Ebök Tübingen	Elektror Ostfildern	Lamparter Weilheim
Wärmetauscher Typ		Vertikale Sonden (80 m)	Vertikale Sonden (134 m)	Horizontaler Erdkollektor (in 1,20m Tiefe)	Vertikalsonden in Gründungspfählen (4-8m)	Luft-Erdwärmetauscher (in 2 m Tiefe)
Wärme/ Kälte-Verteilung		Lüftungsanlage / BKT	Wärmepumpe	Lüftungsanlage	Lüftungsanlage	Lüftungsanlage
Installierte Sondenlänge	m	400	268	500	624	180
Spez. Massenstrom	kg h ⁻¹ m ⁻¹	6,0 / 0,83	9,3	1,05	9,3	-
Eintrittstemperatur ins Erdreich	°C	13 - 25	2 - 15	19 - 25	16 - 24	-10 - 37
Spez. Heizenergie	kWh m ⁻¹	7	36	-	4	17
Spez. Kühlenergie	kWh m ⁻¹	12	-	-	17	25
Max. Heizleistung	W m ⁻¹	16	66	-	14	34
Mittlere Heizleistung	W m ⁻¹	3	13	-	6	9
Max. Kälteleistung	W m ⁻¹	26 / 10	-	7	24	45
Mittlere Kälteleistung	W m ⁻¹	1,5	-	3	10	10
Mittlerer COP für Heizen / Kühlen	-	12,8 / 20			12,5 / 22	

In Gebäuden mit direkter Nutzung von Erdwärmetauschern für Luftkonditionierung und Betonkernaktivierung lag die Kühlleistung höher als die Heizleistung. Sowohl Heiz- als auch Kühlleistung steigen mit steigender Temperaturdifferenz von Fluideintritt ins Erdreich und Erdreichtemperatur. Die höchste gemessene Entzugsleistung von 66 W/m wurde im Winter Wärmepumpenbetrieb mit 4 °C Eintrittstemperatur erhalten, was einer Temperaturdifferenz zum Erdreich von 9 K entspricht. Für das Kühlen lag die höchste Leistung bei 45 W/m, die von einem oberflächennah liegenden Erdreich/Luft-Wärmetauscher von nur 2 m Tiefe erreicht wurde, bei einer Lufteintrittstemperatur von 35 °C und einer Temperaturdifferenz zum Erdreich von 15 K. Im Vergleich dazu lag die maximale Kühlleistung eines 80 Meter tiefen, vertikalen Erdwärmetauschers nur bei 26 W/m, bei einer maximalen Eintrittstemperatur ins Erdreich von 22 °C aus dem Wärmetauscher der Lüftungsanlage. Nahezu das gleiche Resultat wurde für oberflächennahe Gründungspfähle erhalten, mit einer maximalen Kühlleistung von 24 W/m.

7.6.3.2 Wirtschaftlichkeit

Neben den energetischen Bewertungsgrößen der Nutzung von oberflächennaher Geothermie spielt die Wirtschaftlichkeit der beschriebenen Technologien eine wichtige Rolle. Das übliche Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsberechnung ist die Annuitätenmethode nach VDI 2067 [35]. Das Annuitätenverfahren gestattet es, einmalige Zahlungen/Investitionen

und laufende Zahlungen mithilfe des Annuitätsfaktors während eines Betrachtungszeitraumes zusammenzufassen. Die Kosten werden in einmalige Kosten und laufende Kosten unterteilt.

Der hier angestellte Vergleich beschränkt sich auf kapitalgebundene und verbrauchsgebundene Kosten. Außerdem werden bei den Varianten mit kombinierter Heiz- und Kühlanwendung (ganzjähriger Betrieb) die eingesparten Heizkosten als Erlös gutgeschrieben. Von hohen betriebsgebundenen Kosten (z.B. Wartung) ist nicht auszugehen, daher werden diese in der Untersuchung nicht betrachtet. Außerdem werden sonstige Kosten (z.B. Versicherungen) nicht berücksichtigt.

7.6.3.2.1 Kapitalgebundene Kosten

Bei kapitalgebundenen Kosten handelt es sich um einmalige Investitionen der Anlagenkomponenten. Kosten für die Planung der Anlage werden nicht berücksichtigt. Anhand der detaillierten Revisionsunterlagen können am Beispiel des Jugendhauses Ostfildern die kapitalgebundenen Kosten für die dort ausgeführte Erdsondenanlage zusammengestellt werden.

Die Hälfte der Investitionskosten kommen durch die reinen Bohrkosten zustande (ca. 18000 €). Hinzu kommen Kosten für das Sondenmaterial (ca. 3000 €), die Solefüllung (ca. 3800 €), sowie die Anbindung der Erdsonden an die Wärmepumpe (ca. 6000 €), sodass sich unter Berücksichtigung der ausgeführten Sondenanzahl und -länge spezifische Investitionskosten von 129 €/m ergeben.

Andere Beispiele (z.B. Anlagen in Spanien) ergaben deutlich geringere spezifische Investitionskosten (ca. 50 - 60 €/m). Eine Studie des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg ergibt einen linearen Zusammenhang zwischen Investitionen und Sondenlänge von 58 €/m + 900€ [16]. Die Zusammensetzung der Kosten und, ob die Anbindung der Sonden berücksichtigt ist, wird nicht weiter erläutert [16].

Die Investitionskosten für die Erdsonden in Gründungspfählen stammen direkt von den Angaben des Elektror-Gebäudes in Ostfildern. Die Brutto-Gesamtkosten der Gründungspfähle belaufen sich auf 89798 Euro, was spezifischen Kosten von 143 € pro Meter Pfahl entspricht. Der Anteil der eingebrachten Sonden war 14033 Euro, was 15 % der Gesamtkosten entspricht. Daraus resultieren 22,5 €/m Investitionskosten für die Vertikalsonden in den Gründungspfählen. Dabei sind Leitungs- und Anbindungskosten zum Gebäude sowie Kosten für Wärmetauscher und Wärmemengenzähler nicht enthalten. Für den wirtschaftlichen Vergleich wurden deshalb Investitionskosten für Vertikalsonden in Gründungspfählen von 30 € m⁻¹ angenommen.

Die Investitionskosten für einen Luft-Erdwärmetauscher (L-EWT) belaufen sich laut dem L-EWT Handbuch von 2001 auf 38 €/m [4].

7.6.3.2 Verbrauchsgebundene Kosten

Unter verbrauchsgebundenen Kosten versteht man die Kosten für Energie und Betriebsstoffe. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass die benötigte Hilfsenergie (Sole-Umwälzpumpe, Ventilatoren) der jeweiligen Variante elektrisch bereitgestellt wird. Der Stromverbrauch wurde anhand der mittleren jährlichen Arbeitszahlen für Kühlen und Heizen der jeweiligen Anlage berechnet. Hierbei ist anzumerken, dass teilweise nur ein Datensatz von einem einzelnen Jahr vorlag.

Beim Preis der Hilfsenergie (Strompreis) handelt es sich um Preise des Energieversorgers EnBW (Stand: Sept. 2011).

7.6.3.3 Einzahlungen (Erlöse)

Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen beziehen sich hier nur auf die sommerliche Anwendung, also die passive Kühlung von Gebäuden durch Geothermie. Da die Anlagen ganzjährig in Betrieb sind, werden die Wärmegewinne in der Winterperiode als Erlös der Investition gutgeschrieben. Dabei wird von einem Fernwärmepreis von 9.29 ct/kWh (EnBW) ausgegangen, der durch die ganzjährige Nutzung der Geothermieanlage eingespart werden kann. Ebenfalls wird dabei eine Preissteigerung von 3 % angenommen.

7.6.3.2.4 Berechnung nach der Annuitätenmethode

Der Berechnung nach VDI 2067-1 wurde ein Zinssatz von 4 % zugrunde gelegt. Die Energiepreissteigerung wurde mit 3 % angesetzt. Als Betrachtungszeitraum wurde die minimale Nutzungsdauer einer Erdsondenanlage (40 Jahre) gewählt. Eine weitere Variante legt eine erhöhte Nutzungsdauer von 80 Jahren zugrunde.

Die Auswertung beinhaltet drei der beschriebenen Beispielobjekte: eine vertikale Erdsondenanlage (SIC Freiburg), eine Gründungspfahl-Anlage (Elektor Ostfildern) und ein Luft-Erdwärmetauscher (Lamparter Weilheim).

In der folgenden Grafik ist die Gesamtannuität der verschiedenen Varianten für eine Nutzungsdauer von 40 bzw. 80 Jahren, unterteilt nach den Kostenarten, dargestellt.

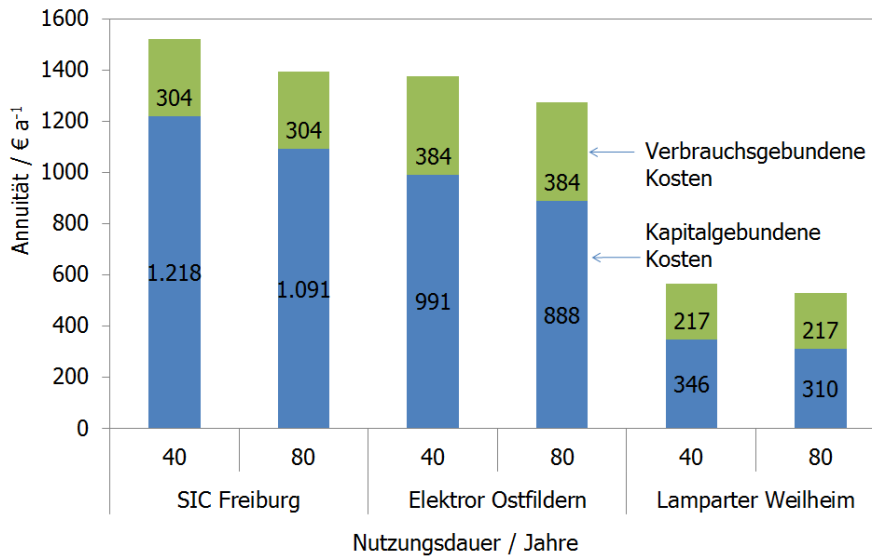


Abbildung 110: Jährliche Gesamtannuität nach Kostenarten

Dieser ökonomische Vergleich zeigt, dass sich durch die Verdopplung der Nutzungsdauer keine großen Reduktionen der jährlichen Gesamtannuität ergeben. Die kapitalgebundenen Kosten werden nur leicht durch die längere Nutzungsdauer reduziert.

Der Luft-Erdwärmetauscher weist aufgrund der geringen Investitionskosten die deutlich geringste jährliche Annuität auf. Teilt man die jährliche Gesamtannuität durch die erzeugte Kältemenge, so erhält man einen spezifischen Kältepreis für die jeweilige Anlage.

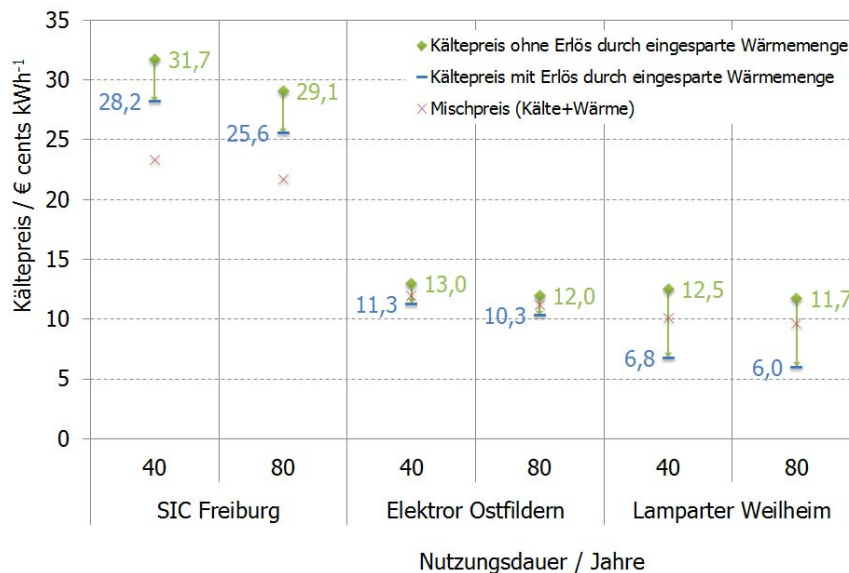


Abbildung 111: spezifischer Kältepreis der einzelnen Varianten

Der Kältepreis wird weiter durch die Berücksichtigung der eingesparten Wärmemenge reduziert. Wie bereits erwähnt, werden die hier untersuchten Anlagen ganzjährig betrieben und

decken somit im Winter einen Teil des Wärmebedarfs. Die Auswertungsvariante, die einen Mischpreis (Kälte- und Wärmepreis) berechnet, ergibt ähnliche Resultate.

Ein Vergleich mit konventionell elektrisch erzeugter Kilowattstunde kWh Kälte im Bürobau Elektror mit Kältekosten von 11 ct/kWh zeigt, dass nur der Luft-Erdwärmetauscher unterhalb dieser Kosten liegt. Die anderen Anlagen liegen bei den Kosten über der konventionellen Technik.

7.6.4 Zusammenfassung

In den vorliegenden Untersuchungen wurden sowohl reale Projekte mit oberflächennaher Geothermienutzung, als auch Simulationen mit unterschiedlichen Parametervariationen zusammengestellt.

Auffallend ist, dass die hier beschriebenen Projekte nur selten die Potenziale der installierten Geothermieanlagen ausnutzen und damit wirtschaftlich nicht sinnvoll erscheinen. Welches Potenzial in dieser Technologie steckt, wurde mittels Simulation gezeigt. Dass dieses in den seltensten Fällen erreicht wird, liegt vor allem an der Überdimensionierung der Geothermieanlagen. Das Hauptproblem liegt dabei darin, dass die Anlagengröße direkt vom maximalen Wärme-/Kältebedarf des Objekts abgeleitet wird. Dieser muss meist zu einem frühen Planungsstadium bestimmt werden und beinhaltet einen gewissen Puffer. Erfolgt die Dimensionierung der Erdsonden dann anhand der Anhaltspunkte der VDI 4640 für die spezifische Entzugsleistung, führt das zu einer weiteren Überdimensionierung. Wie die Simulationen in Abschnitt 7.6.2 gezeigt haben, sind die Angaben der VDI für den maximalen Auslegungsfall tendenziell zu pessimistisch gewählt. Bei der Auslegung auf den maximalen Wärme-/Kältebedarf sind deutlich höhere spezifische Entzugsleistungen zu erwarten. Des Weiteren gibt die VDI spezifische Entzugsleistungen an lediglich zwei Betriebsstunden-Punkten (1800 h, 2400 h). Häufig können die Betriebsstunden der Anlage in einem frühen Planungsstadium nicht exakt bestimmt werden und werden als 1800 h oder 2400 h angenommen. In der Praxis werden diese Werte jedoch oft über-/unterschritten, was zu deutlich anderen Auslegungsvoraussetzungen führt (vgl. **Abbildung 91**).

Die Auslegung auf den maximalen Wärme-/Kältebedarf des Objekts setzt jedoch voraus, dass in diesem Fall mit einer maximal zulässigen Eingangstemperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich in die Erdsonden gefahren werden kann. Ohne eine Zusatzkomponente (Wärmepumpe im Heizfall, Kältemaschine im Kühlfall) ist dieser notwendige Temperaturhub für maximale Leistungen kaum möglich.

In Abschnitt 7.6.2.7 wurde gezeigt, dass eine Geothermieanlage an mindestens 2000 Betriebsstunden eine Eingangstemperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich von 11 K aufweisen muss, um einen einigermaßen wirtschaftlichen geothermischen Kältepreis (ähnlich verhält es sich beim Wärmepreis) zu erhalten (vgl. **Abbildung 96**). Die sich dadurch ergebenden Temperaturniveaus sind völlig unrealistisch für eine direkte Beheizung (ca. 0 °C Heizrücklauf) und nur schwer umsetzbar bei einer direkten Kühlung (ca. 21 °C Rücklauf), wie die in Abschnitt 7.6.3.1 beschriebenen Objekte gezeigt haben. Die Ausnahme ist die direkte Kühlung mit Luft. Hier werden deutlich höhere Temperaturdifferenzen zum Erdreich erreicht. Bei der indirekten Nutzung der Geothermie mittels Wärmepumpe im Heizfall und Kältemaschine im Kühlfall können diese hohen Temperaturdifferenzen zum ungestörten Erdreich, für

eine maximale Sondenleistung erreicht werden. Damit dies über einen längeren Zeitraum geschieht ($\Delta T_{in} > 11$ K mindestens 2000 Betriebsstunden), dürfen die Sonden nicht überdimensioniert sein. Eine Auslegung auf Spitzenlasten eignet sich daher nicht. Diese sollten mittels einer Zusatzheizung/Kühlung abgedeckt werden.

Durch immer besser gedämmte Gebäudehüllen sind 2000 Betriebsstunden mit ausschließlichem Heizbetrieb kaum noch zu erreichen. Daher eignet sich umso mehr eine ganzjährige Nutzung der Geothermieanlage, um auf die wirtschaftlich sinnvollen Betriebsstunden bei entsprechender Eintrittstemperaturdifferenz zu kommen. Eine Kombination aus Heizen mit Wärmepumpe im Winter und direkte Kühlung im Sommer kann dabei durchaus sinnvoll sein.

8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms

Das Förderprogramm BWPlus verfolgt das Ziel, ...Projekte der anwendungsorientierten Umweltforschung zu fördern, die für Baden-Württemberg im besonderen Maße relevant sind. Entwickelt werden sollen natur- und sozialwissenschaftliche, technische und methodische Beiträge sowie Instrumente zur Lösung von Problemen, um die Herausforderungen zu bestehen, eine dauerhaft lebenswerte Umwelt zu erhalten [21].

Die vom zafh.net bearbeiteten Teilgebiete des Projektverbundes geomatrix.bw mit den bereits genannten Partnern versucht im Bereich der Simulation von Geothermieanlagen eine Lücke zu schließen.

Auf der einen Seite gibt es ausreichend Software, um gebäudetechnische Anlagen und ihre Komponenten mathematisch abzubilden, andererseits gibt es zur Modellierung von Grundwasserströmung kommerzielle CFD-Programme, mit denen sich in hoher Auflösung der Wärmetransport im Erdreich darstellen lässt. Eine Kopplung beider Gruppen von Simulationswerkzeugen scheint angebracht, wird sich aber in der Praxis als schwierig erweisen.

Ein anderer Ansatz den Einfluss wechselnder Lasten auf das Erdreich abbilden zu können ist die Entwicklung von Programmen, die unter gewissen Abstrichen hinsichtlich der räumlichen Auflösung des Simulationskorpus schnell genug, sind die Anforderungen der Anlagensimulation zu bedienen, und gleichzeitig die Temperaturverteilung im Erdreich hinreichend genau abbilden.

Die gemeinsame Entwicklung dieses Werkzeugs mit den Simulationsdaten und Messwerten der Projektpartner erscheint dem zafh.net als im hohen Maße anwendungsorientiert und deckt sich mit den Zielen, wie sie im BWPlus-Projekt definiert werden. Die erfolgte Validierung des Grundwassermoduls mit Messdaten, die vorausgehende Validierung des Basisprogramms durch Vergleichsrechnung und die erfolgte betriebsbegleitende Simulation einer Pilotanlage des zafh.net zeigen die Praxistauglichkeit der entwickelten Lösung.

Die Einbindung von Geothermie zur Rückkühlung thermischer oder elektrischer Wärmepumpen zur Unterstützung oder vollständigen Substitution konventioneller Kondensatoren wurde untersucht und dargestellt.

Der steigende Kühlbedarf, sei er nun den sich ändernden klimatischen Randbedingungen oder dem gestiegenen Komfortanspruch der Nutzer geschuldet, sollte mit Rücksicht auf die Herausforderung, ... eine dauerhaft lebenswerte Umwelt zu gestalten [21], so schonend wie irgend möglich bereitgestellt werden. Neben wichtigen technischen und wirtschaftlichen Kriterien dürfen an dieser Stelle biologische und klimatische Aspekte nicht unterschlagen werden. Deshalb wurde darauf geachtet mit der entwickelten Softwarelösung unterschiedliche Fragestellungen aus verschiedenen Fachdisziplinen hinreichend genau beantworten zu können, was dem im BWPlus-Projekt verankerten ganzheitlichen Ansatz gerecht wird.

Wie sich das veränderte Kaufverhalten im Lebensmittelbereich auf den Energiebedarf des Lebensmitteleinzelhandels der Zukunft auswirkt, konnte an verschiedenen Stellen des Berichts aufgezeigt werden.

Durch Untersuchung einer Liegenschaft konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, wie durch eine Variation der derzeit innovativsten Anlagentechnik weitere Einsparungen bei der Kältebereitstellung erzielt werden könnten.

Die Bündelung der gesammelten Ergebnisse im abschließenden Planungsleitfaden sichert den Wissenstransfer und schafft ein hohes Maß an Anschlussfähigkeit für Forschung und Wirtschaft und stellt die Rahmenbedingungen dar, unter denen Geothermieanlagen wirtschaftlich betrieben werden können.

9 Literatur

- [1] Adnot, J. 2003. Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC), DGTREN, Armines, Frankreich
- [2] Arias, J. 2005. Energy Usage in Supermarkets - Modelling and Field Measurements, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration, Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden
- [3] Auer, F. und Schote, H.: Feldtest Elektro-Wärmepumpen, Lokale Agenda 21 – Gruppe Energie, 26.01.2009, Lahr (Schwarzwald)
- [4] Blümel, E. Fink, C. Reise, C.: L-EWT-Handbuch 2001 – Handbuch zur Planung und Ausführung von luftdurchströmten Erdreichwärmetauschern für Heiz- und Kühlanwendungen, Dezember 2001
- [5] Böhme, D. 2009, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2008, Berlin, Deutschland
- [6] Breidert, H. 2003, Projektierung von Kälteanlagen, Berechnung, Auslegung, Beispiele. 2. , überarbeitete und erweiterte Auflage. ISBN 3-7880-7688-7
- [7] Bundesverband Wärmepumpe: Presseinformation zur Marktsituation der Wärmepumpen in Deutschland, 28.01.2009, Berlin
- [8] Bundesverband des Deutschen Lebensmittelhandels (BVL) e.V.: Lebensmittel-Einzelhandel 2006/2007, Berlin, 2007.
- [9] Deutsche Bank Research: Geothermiestudie im Auftrag des Hauptverbandes der Deutschen Bauindustrie und des Bundesverbandes Baustoffe–Steine und Erden, 05.11.2009, Frankfurt am Main
- [10] DIN V 4108 Teil 6 2003-06. Vornorm Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs
- [11] Ebert, H-P., Büttner, D., Drach, V., Hemberger, F., Oberdorf, C., Fricke, J.: Optimierung von Erdwärmesonden, 2000
- [12] EHI – EuroHandelsinstitut GmbH: Handel aktuell 2001. ISBN 3-87257-241-5, Köln 2001
- [13] EHI Retail Institute GmbH: Handel aktuell 2007/8. ISBN 978-3-87257-310-0, Köln 2007
- [14] EHI Retail Institute GmbH: Energie-Monitor 2010. ISBN 978-3-87257-344-5, Köln 2010
- [15] U. Eicker, D. Pietruschka, R. Pesch. „Heat rejection and primary energy efficiency of solar driven absorption cooling systems”, International Journal of Refrigeration, Volume 35, Issue 3, May 2012, pages 729-738.
- [16] Erdwärme in BW 2011, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2011
<http://www2.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/19832>
- [17] Erb, M. Hubacher, P. Ehrbar, M.: Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FWA 1996-2003, April 2004
- [18] Eschmann, M.: Monitoring von Klein-Wärmepumpen mittels Normprüfungen, Interstaatliche Hochschule für Technik NTB, 12.02.2009, Bern

- [19] Eskilson P. 1987, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Department of Mathematical Physics and Building Technology University of Lund, Sweden
- [20] Faramarzi, R.: Showcasing Energy Efficient Emerging Refrigeration Technologies, Emerging Technologies in Energy Efficiency Summit, San Francisco, 2004
- [21] <http://www.ptka.kit.edu/bwp/> (Abruf Mai 2012)
- [22] IEA, 2002
- [23] Karagiorgas, M., Mendrinou, D., Karytsas, C.: Solar and geothermal heating and cooling of the European Centre for Public Law building in Greece, Renewable Energy, Volume 29, Issue 4, April 2004, Pages 461-470, 2004
- [24] Knissel, J.: Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude, erschienen in: Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1999
- [25] Kruse, S.: Einzelhandel und Zentren, Zwischen Widerspruch und Muss, Vortrag im Rahmen des Hamburger Städtebauseminars, S.12, Hamburg 2004
- [26] Li, X, Chen, Z., Zhao, J.: Simulation and experiment on the thermal performance of U-vertical ground coupled heat exchangers, Applied Thermal Engineering 26, pp 1564-1571, 2006
- [27] Miara, M., Günther, D., Kramer, T., Oltersdorf, T, Wapler, J.: Wärmepumpen Effizienz, Final Report 0327401A of Federal Ministry for Economics, 2011
- [28] Miara, M. (Fraunhofer-Institut für Solare Energie Systeme ISE): Richtig geplant – wirklich gespart, erschienen in: IKZ-Haustechnik, Heft 3 /2009
- [29] Netzwerk Kälteeffizienz: Kältemarktanalyse der Stadt Hamburg im Juni 2010; Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Unternehmen für Ressourcenschutz, Hamburg 2010
- [30] Rafferty, K.: Direct-use temperature requirements – A few rules of thumb., June 2004, Geo heat center quarterly bulletin, Vol.25, No.2, ISSN 0276-1084, 2004
- [31] Rhiemeier, J.-M.; Harnisch J., Ters, C.; Kauffeld, M; Leisewitz, A.: Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und -geräten für den Supermarkt; Umweltbundesamt, Forschungsbericht 206 44 300, UBA-FB 001180, Berlin 2008
- [32] Schmidt, D. 2009. Projektverbund LowEx: Nutzung von regenerativen Energiequellen in Gebäuden durch den Einsatz von Exergiesystemen, Abschlussbericht, Fraunhofer IBP, Kassel, Deutschland
- [33] Schraps, S. 2005. Energiekostenreduzierung in Supermärkten, Kälte Klima Aktuell 2/2005, perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH, Aachen, Deutschland
- [34] Status Quo und Perspektiven im deutschen Lebensmittelhandel, Köln 2001
- [35] VDI 2067 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung, September 2000
- [36] VDI 4640 Thermische Nutzung des Untergrundes Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen Blatt 1-4, September 2001

- [37] Wagner, U; Held, A und Heilek, C: Energiewirtschaftliche Bewertung der Wärmepumpe in der Gebäudeheizung, TU München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, April 2009, München
- [38] Weber, L. 2002. Energie in Bürogebäuden, Verbrauch und energierelevante Entscheidungen vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich
- [39] Spitler, J.D., X. Liu, S.J. Rees, C. Yavuzturk. 2005 Simulation and Optimization of Ground Source Heat Pump Systems. 8th International Energy Agency Heat Pump Conference. Las Vegas. May 30-June 2.
- [40] Zeng, H., Diao, N., Fang, Z.: Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers, International Journal of Heat and Mass Transfer 46, pp 4467 – 4481, 2003
- [41] Zeng, H. and Fang, Z. A fluid temperature model for vertical U-tube geothermal heat exchangers, Journal of shangdong Institute of Architecture and Engineering, 2002, 17(1), 7-10.

10 Vorträge und Veröffentlichungen

Vorträge

Ursula Eicker, Dirk Pietruschka, Ruben Pesch
Primärenergetische Optimierung von solar thermischen Kühlsystemen
22. Symposium Thermische Solarenergie, 9.-11. Mai 2012, Bad Staffelstein

Ursula Eicker, Ruben Pesch, Felix Thumm
Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit oberflächennaher Geothermie für das Heizen und Kühlen von Nichtwohngebäuden
Tagungsband 4. Energietechnisches Symposium Nachhaltige Gebäude – Herausforderungen in der Gebäudeenergietechnik, Stuttgart, 2011,

Ursula Eicker, Ruben Pesch, Felix Thumm, Antoine Dalibard
Geothermal energy use for heating and cooling of a low energy building
Proceedings of IXth International scientific and technical conference on New building technologies and design problems, 20.-21.10.2011, Krakow

Ursula Eicker, Ruben Pesch, Dirk Pietruschka
Heat rejection and primary energy efficiency of solar driven absorption cooling systems
Proceedings of 4th Solar Air Conditioning Conference, Larnaka, Cyprus, 12.-14.10.2011

Ruben Pesch, Mariela Cotrado, Maximilian Martin, Dirk Pietruschka, Ursula Eicker,
Ganzjährige Nutzung von Erdwärmesonden zum Heizen und Kühlen von Gebäuden mit reversibler Wärmepumpe oder Kompressionskältemaschine, Tagungsband BauSim 2010 „Gebäude-simulation in Wandel“, 22-24 September 2010, Wien, Austria

Artikel

Ursula Eicker, Dirk Pietruschka, Ruben Pesch
Heat rejection and primary energy efficiency of solar driven absorption cooling systems
International Journal of Refrigeration (2012), Volume 35, Issue 3, pp 729-738

Ursula Eicker, Felix Thumm
Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit oberflächennaher Geothermie für das Heizen und Kühlen von Nichtwohngebäuden
Bauphysik Vol.34, Heft 1, 2012, pp 11- 18, DOI: 10.1002/bapi.201200003

Pesch, R. et al: Ganzjährige Nutzung von Erdwärmesonden zum Heizen und Kühlen von Gebäuden mit reversibler Wärmepumpe oder Kompressionskältemaschine, Tagungsband Bausim 2010 Wien, S. 25

Internet

<http://www.hft-stuttgart.de/Forschung/Kompetenzen/zafh/Projekte/Projekt11.html/de>

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitplanung und Meilensteine	12
Abbildung 2:	Kühlenergieverbrauch verschiedener Branchen in Deutschland in GWh/a 14	
Abbildung 3:	Nutzung von Erdsonden für unterschiedliche Anwendungen.....	15
Abbildung 4:	Primärenergiebedarf von verschiedenen Bürogebäuden Kn1999 [24].....	16
Abbildung 5:	Endenergiebedarf von Bürogebäuden nach Anwendung WEB2002 [38]...	17
Abbildung 6:	typischer Kühllastgang eines Bürogebäudes im Sommer	17
Abbildung 7:	Aufteilung des Endenergiebedarfs von Supermärkten verschiedener Länder [2], [14], [20], [33].....	20
Abbildung 8:	Strombedarf eines Supermarkts SCH2005 [33]	21
Abbildung 9:	Vergleich der erreichten EER verschiedener Rückkühlarten	23
Abbildung 10:	Nutzung des Sondenfeldes zur Kühlung	25
Abbildung 11:	Nutzung des Sondenfeldes zur Beheizung	25
Abbildung 12:	Ganzjährige Nutzung des Sondenfeldes für Heizen und Kühlen	26
Abbildung 13:	EER-Vergleich der Varianten Kühlung, Beheizung und Verbundanlage	27
Abbildung 14:	Vergleich der Rücklauftemperaturen unterschiedlicher Rückkühlarten	28
Abbildung 15:	Verwendeter EER/COP Kühlen/Heizen.....	28
Abbildung 16:	Spezifische Übertragungsleistung [W/(m)] – Kühlen/Heizen	29
Abbildung 17:	Vergleich der Rückkühlarten	30
Abbildung 18:	Jahresdauerlinie Szenario "Energie" für 1 Jahr.....	32
Abbildung 19:	Erdreichtemperaturen bei gleichem Energieeintrag für ein Jahr	33
Abbildung 20:	Jahresdauerlinie Szenario "Spitzenlast"	34
Abbildung 21:	Erdreichtemperaturen bei gleicher Spitzenlast für ein Jahr.....	35
Abbildung 22:	Jahresdauerlinie der Energielast für den realen und synthetischen Lastgang.....	36
Abbildung 23:	Erdreichtemperaturen bei realem und konstantem Lastgang des Bürogebäudes	36
Abbildung 24:	Temperatur im Erdreich bei gleichem Energiebedarf nach 5 Jahren	37
Abbildung 25:	Erdreichtemperaturen bei gleicher Spitzenlast nach 5 Jahren	38
Abbildung 26:	Erdreichtemperaturen bei Lastgang des Bürogebäudes nach 5 Jahren	38
Abbildung 27:	Eintrittstemperaturen Sonde nach einem und fünf Jahren (Spitzenlast - real)	40
Abbildung 28:	Eintrittstemperaturen Sonde nach einem und fünf Jahren (Büro - real)	40
Abbildung 29:	Schema der horizontalen Sonden-teilung im Simulationsprogramm	41
Abbildung 30:	Schema der horizontalen Sondenteilung im Simulationsprogramm.....	42

Abbildung 31:	Darstellung möglicher Geometrien abbildbarer Sondenfelder	44
Abbildung 32:	Eindringtiefe der jahreszeitlich wechselnden Temperaturwelle unter Geländeoberkante (GOK) [4]	46
Abbildung 33:	Energiebilanzen in der Sonde (Berechnung des Temperaturgradienten im Wärmeträgerrohr).....	47
Abbildung 34:	Mittlere Temperatur des Wärmeträgers im n-ten Berechnungshorizont	47
Abbildung 35:	Modellvalidierung an der Sondenanlage in Stuttgart-Vaihingen	48
Abbildung 36:	Modellvalidierung an der Sondenanlage in Stuttgart-Vaihingen	49
Abbildung 37:	typischer Kühllastgang Supermarkt.....	51
Abbildung 38:	Explosionszeichnung der Sonde (grau) mit angrenzendem Erdreich (weiß); Einzelsegment (gelb) mit konvektiven Wärmeströmen ϕ_{7-10}	52
Abbildung 39:	Grundwasserströmungsrichtung (roter Pfeil) mit Wellenfronten (blaue Linien)	53
Abbildung 40:	Grundwasserstauzone um wasserundurchlässigen Sondenkern mit Abfluss	53
Abbildung 41:	Schnitt durch TRNSYS Type 451 a (Modellierungsübersicht)	55
Abbildung 42:	Modellvalidierung – Vergleich erdsonde.bw gegen TRNSYS (unterschiedliche Anzahl der Zonen in x,y-Richtung 50 Schichten in z-Richtung, mittlere Erdreichtemperatur: 17°C,.....	56
Abbildung 43:	Modellvalidierung – Detail (vgl. Abbildung 42)	56
Abbildung 44:	Grundriss der Modellgeometrie mit Teilung des Erdreichs in eine Zone (geometrisch bedingtes Anwachsen des thermischen Widerstandes zwischen Sonde und Erdreich).....	57
Abbildung 45:	Grundriss der Modellgeometrie mit Teilung des Erdreichs in vier Zonen (geometrisch bedingtes Verkleinern des thermischen Widerstandes zwischen Sonde und Erdreich).....	59
Abbildung 46:	Modellvalidierung – Vergleich erdsonde.bw gegen TRNSYS (unterschiedliche Anzahl der Zonen in x,y-Richtung 50 Schichten in z-Richtung, mittlere Erdreichtemperatur: 17 °C,	59
Abbildung 47:	Modellvalidierung – Vergleich erdsonde.bw gegen TRNSYS (unterschiedliche Anzahl der Schichten bei konstant 5 Zonen in x,y-Ebene	60
Abbildung 48:	Eintrittstemperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich: 11 K , mittlere Erdreichtemperatur: 10,2 °C (Region Stuttgart) ganzjährig Heizen Tin =Terde -11 Kelvin	60

Abbildung 49: Modellvergleich – Eintrittstemperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich: 11 K , mittlere Erdreichtemperatur: 10,2 °C (Region Stuttgart) ganzjährig Kühlen Tin =Terde +11 Kelvin	61
Abbildung 50: Modellvergleich – Eintrittstemperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich: 11 K, mittlere Erdreichtemperatur: 10,2 °C (Region Stuttgart) Heizen+Kühlen: 4320 h Heizen, 4320 h Kühlen pro Jahr	62
Abbildung 51: Jährliche Energiemenge beim Heizen, Kühlen und ganzjähriger Erdsondennutzung. Vergleich erdsonde.bw mit kommerziellem Planungstool TRNSYS Type 451 a.....	63
Abbildung 52: Langzeitstabilitätsanalyse mittels erdsonde.bw	64
Abbildung 53: stark vereinfachtes Schema des Versuchsbehälters mit ausgewählten Messstellen	65
Abbildung 54: Messaufbau an der Universität Stuttgart Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS).....	66
Abbildung 55: Grundriss des VEGAS-Versuchscontainers (Validierung Grundwassermodul erdsonde.bw).....	67
Abbildung 56: Gemessenes und simuliertes Temperaturprofil an der Messstelle B3	68
Abbildung 57: Bohrarbeiten zur Herstellung der Erdwärmesonden	71
Abbildung 58: Prototyp und Prozessschema des DAKM	72
Abbildung 59: Schema der bestehenden Anlage	74
Abbildung 60: elek. Heizung (links), Kühlturm (Mitte), Fan coils (rechts).....	74
Abbildung 61: Hydraulikschema der Rückkühlkreis	75
Abbildung 62: Rückkühlungsmöglichkeiten	76
Abbildung 63: Messtechnik	77
Abbildung 64: Temperaturverlauf der TRT	78
Abbildung 65: Messungen der DAKM im Kühl- und Heizmodus	79
Abbildung 66: Serieller Betrieb am 16. Februar	82
Abbildung 67: Nur Geothermie Betrieb (29/02/2012).....	83
Abbildung 68: Parallelbetrieb am 06/03/2012	84
Abbildung 69: Leistung der Geothermieanlage (gesamt).....	86
Abbildung 70: Schaltschema für den Supermarkt im Sommerbetrieb.....	87
Abbildung 71: Schaltschema des Supermarktes für den Winterbetrieb	88
Abbildung 72: Außentemperatur und NK-Kälteleistung (links Sommer-, rechts Winterbetrieb)	89
Abbildung 73: Verteilung des Energieverbrauchs	91
Abbildung 74: Verteilung des Energieverbrauchs	91

Abbildung 75: Der Tiefkühlkreis	92
Abbildung 76: EER NK vs. Außentemperatur	94
Abbildung 77: EER NK vs. Außentemperatur	94
Abbildung 78: EER NK mit und ohne SC (links Sommer-, rechts Winterbetrieb).....	95
Abbildung 79: Einsparung in der Geo-Pumpenversorgung	96
Abbildung 80: Betriebszustand Pumpe P3 und Ventil K5	97
Abbildung 81: Daten des Ersatzverdichters	98
Abbildung 82: Kondensator-Austrittstemperatur	99
Abbildung 83: Vergleich der Systemleistungszahlen in der Winterwoche.....	100
Abbildung 84: mittlere Sondenleistung bei unterschiedlicher Eintrittstemperaturdifferenz	104
Abbildung 85: jährliche Energiemenge bei unterschiedlicher Eintrittstemperaturdifferenz	105
Abbildung 86: jährliche Energiemenge sowie mittlere Erdsondenleistung bei unterschiedlichen Laufzeiten für eine Heiz-/Kühlperiode von jeweils 3 Monaten pro Jahr	107
Abbildung 87: jährliche Energiemenge sowie mittlere Erdsondenleistung bei unterschiedlichen Laufzeiten für eine Heiz-/Kühlperiode von jeweils 6 Monaten pro Jahr	108
Abbildung 88: Variation der Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials.....	109
Abbildung 89: Variation der Wärmeleitfähigkeit des Sondenmaterials für den Kühlfall.....	110
Abbildung 90: Variation der Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens	111
Abbildung 91: simulierte maximale Sondenleistung im Heizfall sowie die Angaben der VDI 4640	113
Abbildung 92: simulierter Tagesgang im Winter.....	114
Abbildung 93: elektrische Aufnahmeleistung von Solepumpen [17]	115
Abbildung 94: Geothermische Energie pro elektrisch aufgewendete Energie	115
Abbildung 95: jährliche Gesamtannuität für den Kühlfall, abhängig von der Laufzeit unterteilt nach Kostenarten.....	116
Abbildung 96: geothermischer Kälte-/Wärmepreis.....	117
Abbildung 97: Systemschema der Nutzung der Geothermie am SIC-Gebäude in Freiburg	119
Abbildung 98: Gemessene Leistung des vertikalen Erdwärmetauschers bei entsprechender Außenlufttemperatur im Freiburger SIC-Gebäude 2006	120
Abbildung 99: Gemessene Leistung als Funktion der Sole-Eintrittstemperatur in das Erdreich (2006).....	121
Abbildung 100: spezifische Leistung der Erdsonden in Abhängigkeit von der Aussenlufttemperatur	122

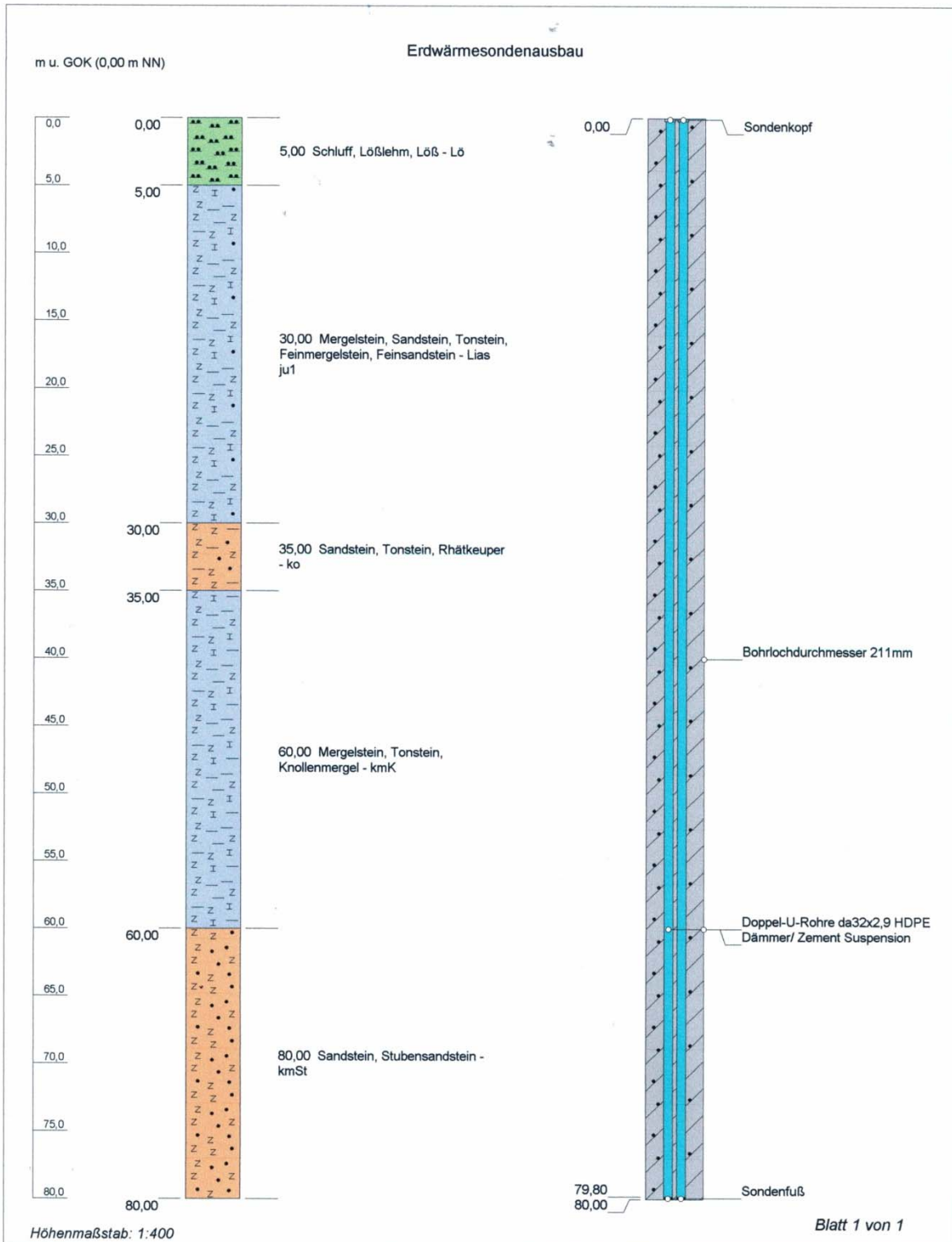
Abbildung 101: Leistungsübertragung als Funktion der Sole-Eintrittstemperatur ins Erdreich.	123
Abbildung 102: zeitlicher Verlauf der Erdsondenleistung und Temperaturen während des Betriebs der Wärmepumpe.....	123
Abbildung 103: Leistung des Gründungspfahl-Wärmetauschers als Funktion der Aussenlufttemperatur.	124
Abbildung 104: Übertragungsleistung der Gründungspfähle als Funktion der Eintrittstemperatur.	125
Abbildung 105: Leistung des Luft-Erdwärmetauschers vom Lamparter-Gebäude als Funktion der Umgebungstemperatur, was ebenfalls der Eintrittstemperatur entspricht.	126
Abbildung 106: Gemessene mittlere Leistungen des Luft-Erdreich-Wärmetauschers und Jahresarbeitszahlen.	126
Abbildung 107: Gemessene Kühlleistung pro Meter des horizontalen Wärmetauschers und die zugehörige Leistungszahl (COP).	128
Abbildung 108: Abgegebene Wärme an das Erdreich als Funktion der Außenlufttemperatur für den horizontalen Wärmetauscher.	128
Abbildung 109: Abgegebene Wärme an das Erdreich als Funktion der Sole-Eintrittstemperatur für den horizontalen Wärmetauscher	129
Abbildung 110: Jährliche Gesamtannuität nach Kostenarten	133
Abbildung 111: spezifischer Kältepreis der einzelnen Varianten	133
Abbildung 112: Leistung der Geothermieanlage (16/02/2012).....	151
Abbildung 113: Leistung der Geothermieanlage (29/02/2012).....	151
Abbildung 114: Leistung der Geothermieanlage (29/02/2012).....	152
Abbildung 115: DAKM Performance (29/02/2012)	152
Abbildung 116: Leistung Geothermieanlage (06/03/2012).....	153
Abbildung 117: Leistung Geothermieanlage (06/03/2012).....	153
Abbildung 118: DAKM Performance (06/03/2012)	154

12 Anhang A

Komponenten

Komponent	Hersteller	Typ
Kühlturm	Rehler GmbH	Kühlsysteme RAX 036/600-142S PU
Pumpe KT	WILO	MHI 206-1/E/3-400-50-2/B
Pumpe Erdsonden	WILO	IL32/140-1.5/2
WT Geothermie	Reflex	rhc 15/20
Regler Ventile	PETER electronics	FUS 150/E2
Regler Ventilator	Siemens	Micromaster 6SE3290- OBB87-OFB4
Regler Pumpe	Gebhardt Ventilatoren	EFE 73-0008-03
Datenscanner	Hewlett Packard	HP 34970A
Temperiergerät (Heiz)	E.Braun GmbH	BW 130-24
Temperiergerät (kalt)	E.Braun GmbH	BT 6 WT
Fan coils	GEA	Flex-Geko GF82.UW01.M00A1

Erdwärmesondenausbau (Vaihingen)



Projekt: Stuttgart, Pfaffenwaldring 10 A		71538
Bohrung: Erdwärmesondenausbau		
Auftraggeber:	FH Stuttgart - Hochschule f. Technik	Rechtswert: 0,0
Bohrfirma:	Behringer+Dittmann Bohr GmbH	Hochwert: 0,0
Geräteführer:	Datum:	Ansatzhöhe: 0,00 m
Bearbeiter:	Ziegler Datum: 03.05.2007	Endtiefe: 80,00 m



Sensoren

Variable	Channel	Sensortyp	Beschreibung
T1	101	RTD-4W	Generator,extern,ein
T2	103	RTD-4W	Generator,extern,aus
T3	104	RTD-4W	Generator,intern,ein
T4	105	RTD-4W	Dephlegmator,extern,aus
T5	106	RTD-4W	Kondensator,intern,aus
T6	107	RTD-4W	Kondensator,extern,ein
T7	108	RTD-4W	Kondensator,extern,aus
T8	109	RTD-4W	Verdampfer,extern,ein
T9	110	RTD-4W	Verdampfer,extern,aus
T10	201	RTD-4W	Absorber,extern,ein
T11	202	RTD-4W	Absorber,extern,aus
T12	203	RTD-4W	Absorber,intern,aus (Lösungswärmetauscher ein)
T13	204	RTD-4W	Lösungswärmetauscher, intern,aus
T14	205	RTD-4W	Lösungswärmetauscher, intern,ein
T15	206	RTD-4W	Reservoir
T16	207	RTD-4W	Rückkühlung, extern, aus (Nach Absorber und Dephlegmator)
T17	208	RTD-4W	Kühlturm, aus
T18	209	RTD-4W	Kühlturm, ein
T19	210	RTD-4W	WT Geothermie, ein
T20	301	RTD-4W	WT Geothermie, aus
T21	302	Thermoelemente CuCo	WT Geothermie, aus, oberfläche
T22	303	Thermoelemente CuCo	WT Geothermie, erdsonden, ein, oberfläche
T23	304	Thermoelemente CuCo	WT Geothermie, erdsonden, aus, oberfläche
T24	-	RTD-4W	Erdsonde 1, ein
T25	-	RTD-4W	Erdsonde 2, ein
T26	-	RTD-4W	Erdsonde 1, aus
T27	-	RTD-4W	Erdsonde 2, aus
P1	221	Druck (ADC)	DAKM Systemdruck
V1	222	Vdot (ADC)	Volumenstrom Kältekreis
V2	121	Vdot (ADC)	Volumenstrom Kühlkreis DAKM (DR08-15)
V3	122	Vdot (ADC)	Volumenstrom Kühlkreis DAKM (DR08-25)
V4	321	Vdot (ADC)	Volumenstrom Kühlkreis DAKM-Geothermie

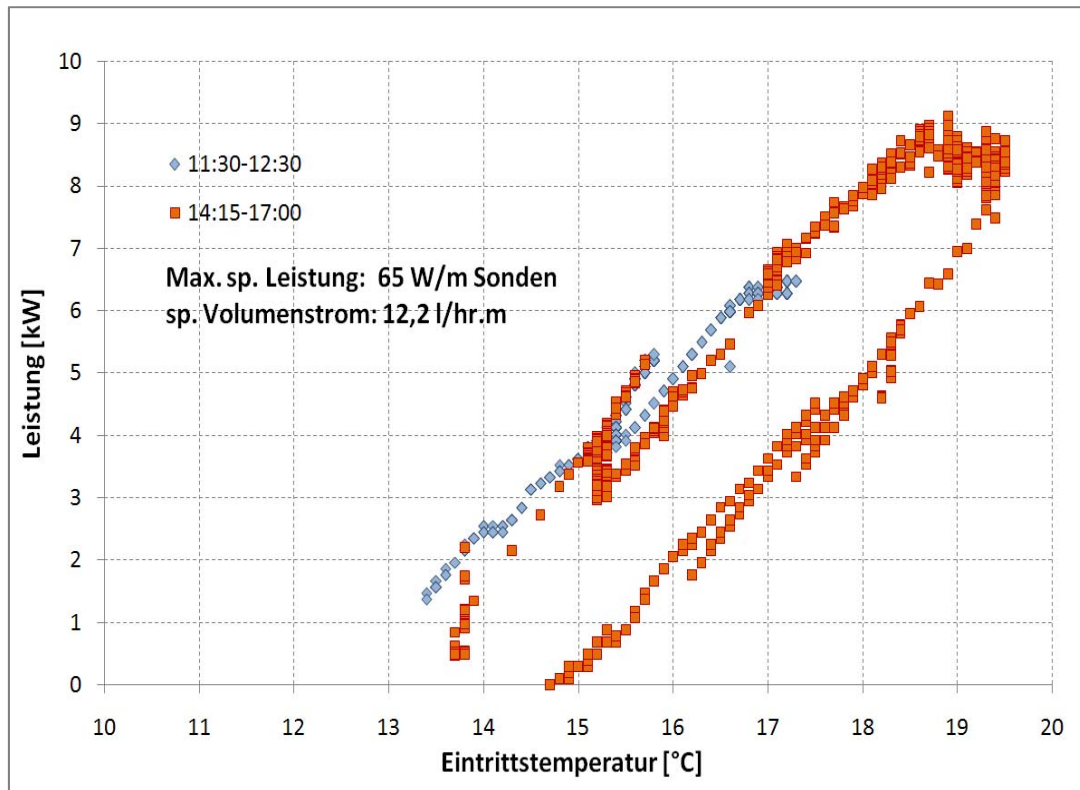


Abbildung 112: Leistung der Geothermieanlage (16/02/2012)

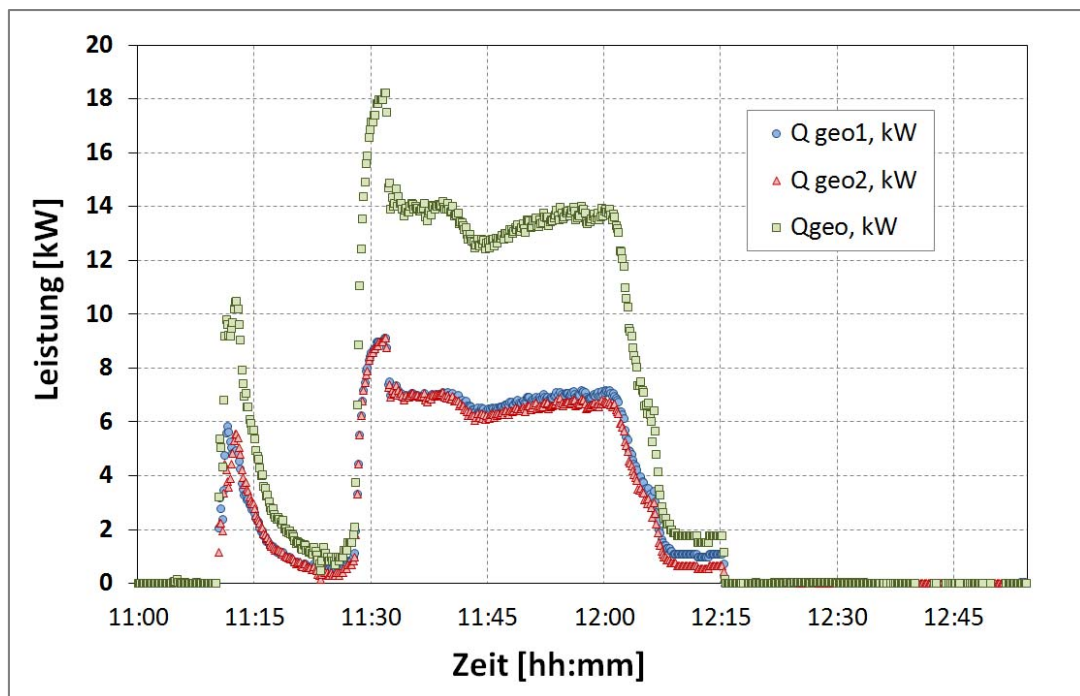


Abbildung 113: Leistung der Geothermieanlage (29/02/2012)

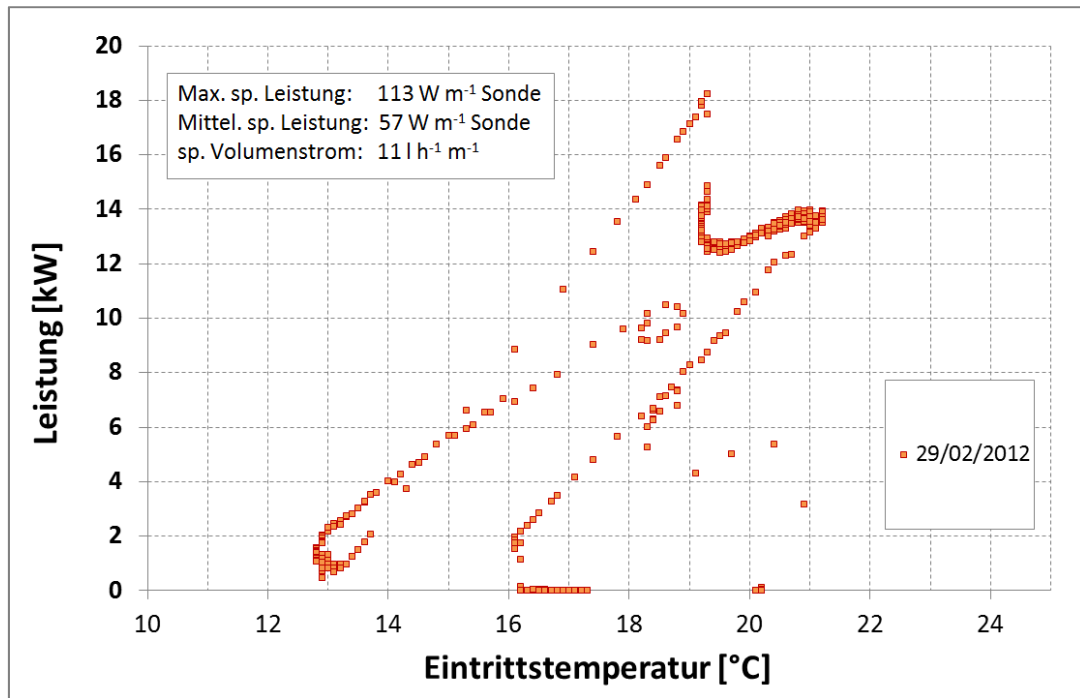


Abbildung 114: Leistung der Geothermieanlage (29/02/2012)

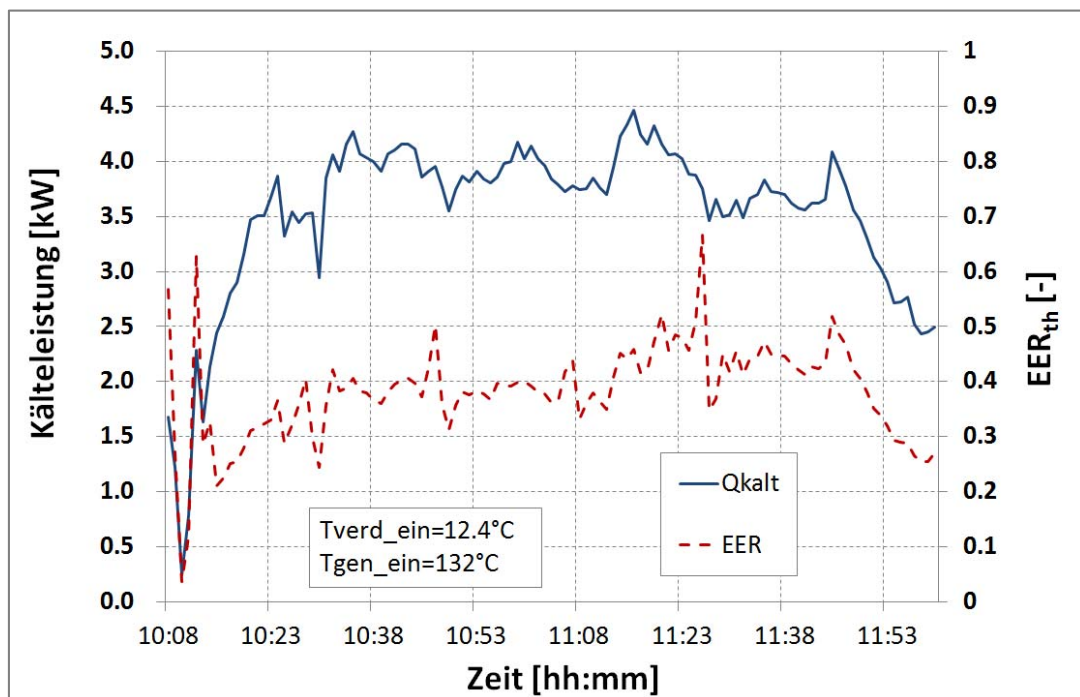


Abbildung 115: DAKM Performance (29/02/2012)

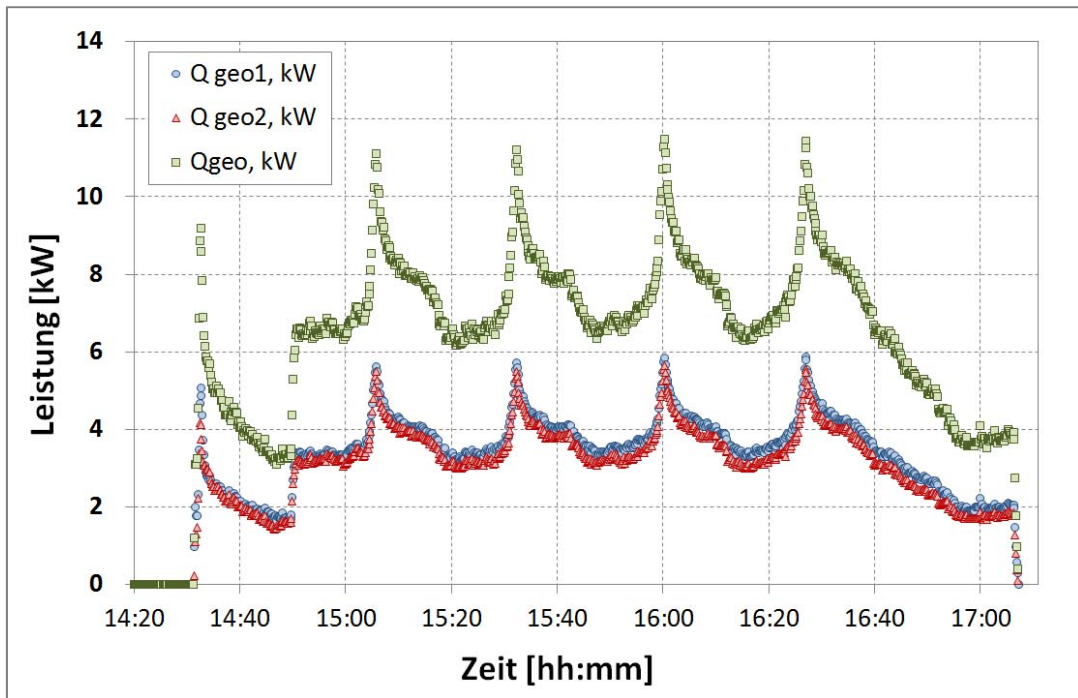


Abbildung 116: Leistung Geothermieanlage (06/03/2012)

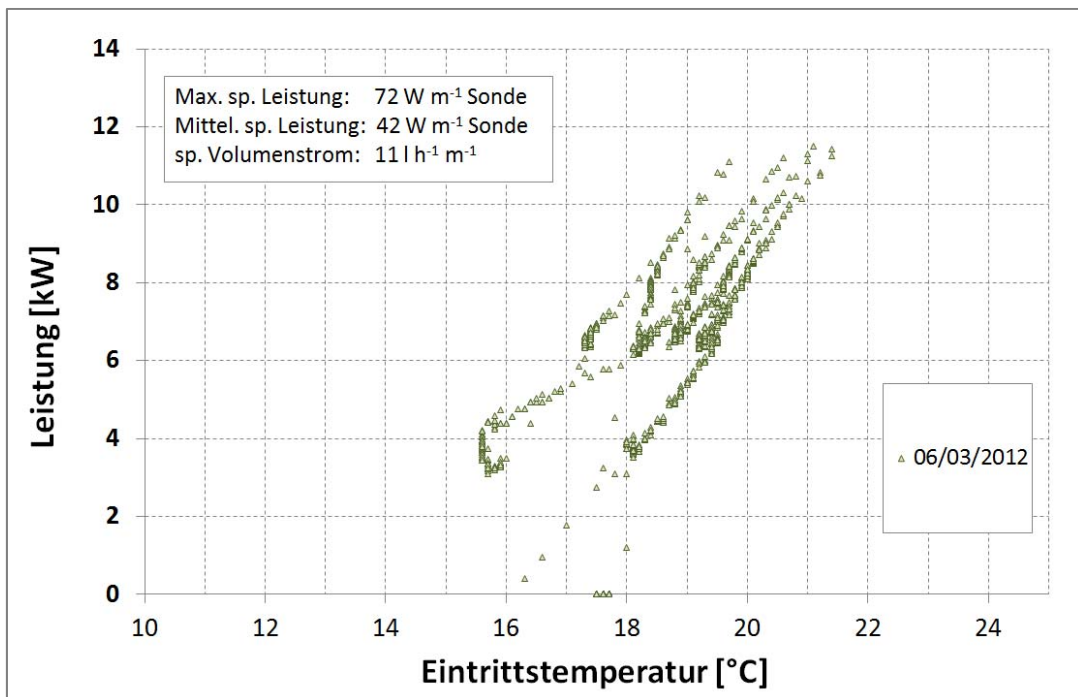


Abbildung 117: Leistung Geothermieanlage (06/03/2012)

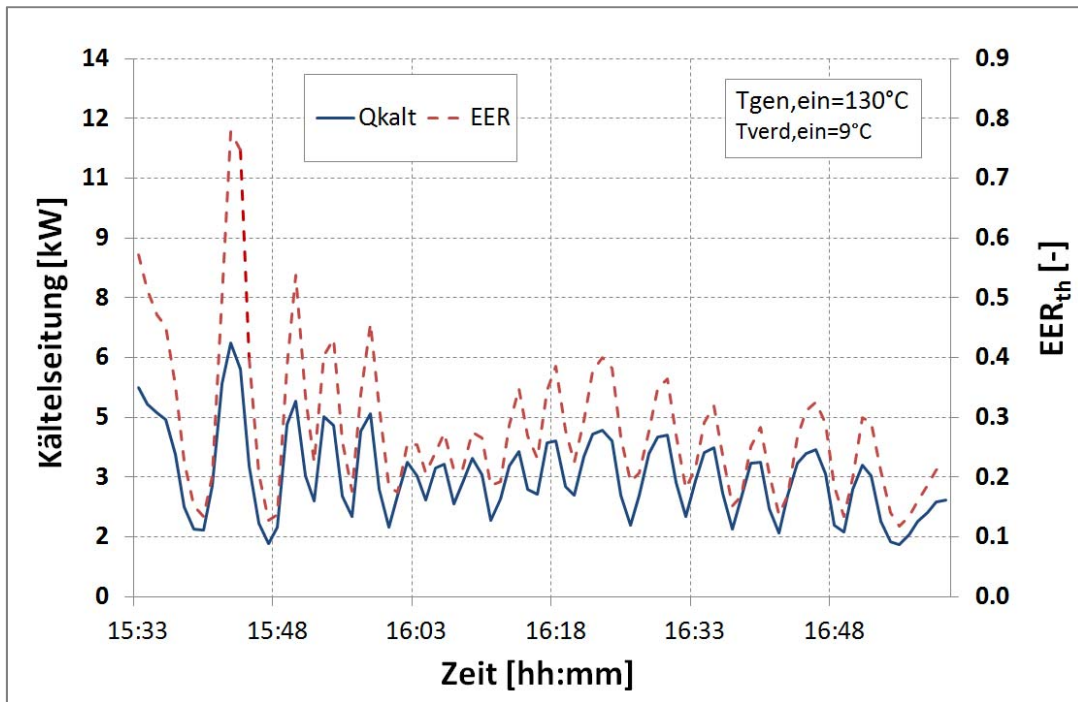


Abbildung 118: DAKM Performance (06/03/2012)

Visualisierung mit Labview

