



Zwischenbericht vom 5. Februar 2026

MultiSource

Mehrquellen-Wärmepumpensysteme für monovalenten Wärmeerzeugerersatz



Quelle: © OST, CC by nc sa



Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Ko-Finanzierung:

Stadt Zürich, Liegenschaften
8000 Zürich
www.stadt-zuerich.ch/de/politik-und-verwaltung/stadtverwaltung/fd/lisz.html

Jansen AG
9463 Oberried
www.jansen.ch

Kanton Zürich, Amt für Wasser, Abfall, Energie und Luft AWEL
8090 Zürich
www.zh.ch/de/audirektion/amt-fuer-abfall-wasser-energie-luft.html

Subventionsempfänger/innen:

OST – Ostschweizer Fachhochschule
Institut für Energietechnik & Institut für Solartechnik
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
www.ost.ch/iet/ www.ost.ch/spf

Autor/in:

Carsten Wemhöner, OST IET, carsten.wemhoener@ost.ch
Christoph Meier, OST IET, christoph.meier@ost.ch
Florian Ruesch, OST SPF, florian.ruesch@ost.ch

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Martin Ménard, menard@lowtechlab.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502880-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Das Projekt MultiSource untersucht die Kombination von Wärmequellen anhand von Simulationen und einer P&D Anlage. Schwerpunkt ist dabei die Überwindung von Quelleneinschränkungen für Wärmepumpen im höheren Leistungsbereich ab 50 kW, wie sie insbesondere beim Wärmeerzeugersersatz in dicht bebauter Umgebung auftreten können. Projektziel ist die Ableitung von Planungsempfehlungen zu Systemintegration, Auslegung und Regelung von Multiquellenanlagen auf Grundlage der Simulationsuntersuchungen und der praktischen Erprobung an einer P&D-Anlage mit Messungen über zwei Heizperioden, um ein Best-Practice System zu dokumentieren.

Schwerpunkt des ersten Jahres war die Identifikation eines P&D Objektes und die Auswahl eines geeigneten Mehrquellenanlagensystems zur Überwindung von Einschränkungen. Dafür wurde eine Literatur- und Marktrecherche insbesondere zu oberflächennahen Erdkollektoren durchgeführt, da dies System für die Pilotanlage in Verbindung mit Aussenluft vorgesehen ist. Darauf aufbauend wurde ein Modell für die Simulationsumgebung Matlab-Simulink implementiert, das zurzeit validiert wird. Die unterschiedlichen Quellen wurden hinsichtlich verfügbarer Planungsdaten charakterisiert und mögliche Quellenkombinationen systematisch in einer Matrix zusammengestellt und bewertet.

Als nächste Schritte werden die Quellenkombination konsolidiert und eine Auswahl vielversprechender Systeme für die weitere Untersuchung definiert. Im Anschluss werden Systemmodelle entwickelt und Parametervariation zu Integration, Auslegung und Regelung durchgeführt. Parallel wird die Pilotanlage geplant und im Jahr 2026 installiert, sodass in der Heizperiode 26/27 die ersten Messungen durchgeführt werden können.

Résumé

Le projet MultiSource étudie la combinaison de sources de chaleur à l'aide de simulations et d'une installation P&D. L'accent est mis sur la suppression des restrictions liées aux sources pour les pompes à chaleur dans la plage de puissance supérieure à 50 kW, telles qu'elles peuvent notamment survenir lors du remplacement de générateurs de chaleur dans des environnements densément bâtis. L'objectif du projet est de formuler des recommandations de planification pour l'intégration, la conception et la régulation de systèmes à sources multiples sur la base d'études de simulation et d'essais pratiques sur une installation P&D avec des mesures sur deux périodes de chauffage, afin de documenter un système de bonnes pratiques.

La première année a été consacrée à l'identification d'un objet P&D et à la sélection d'un système multi-sources approprié pour surmonter les contraintes. À cette fin, une recherche documentaire et une étude de marché ont été menées, en particulier sur les collecteurs géothermiques proches de la surface, car ce système est prévu pour l'installation pilote en combinaison avec l'air extérieur. Sur cette base, un modèle a été mis en œuvre pour l'environnement de simulation Matlab-Simulink, qui est actuellement en cours de validation. Les différentes sources ont été caractérisées en fonction des données de planification disponibles et les combinaisons de sources possibles ont été systématiquement compilées et évaluées dans une matrice.

Les prochaines étapes consistent à consolider les combinaisons de sources et à définir une sélection de systèmes prometteurs pour une étude plus approfondie. Ensuite, des modèles de systèmes seront développés et des variations de paramètres seront effectuées en matière d'intégration, de conception et de régulation. En parallèle, l'installation pilote sera planifiée et installée en 2026, afin que les premières mesures puissent être effectuées pendant la période de chauffage 26/27.



Summary

The MultiSource project investigates the combination of heat sources using simulations and a P&D plant. The focus is on overcoming source restrictions for heat pumps in the higher output range above 50 kW, which can occur when replacing heat generators in densely built-up areas. The project objective is to derive planning recommendations for system integration, design and control of multi-source systems based on simulation studies and practical testing on a P&D system with measurements over two heating periods to document a best-practice system.

The focus of the first year was on identifying a P&D object and selecting a suitable multi-source system to overcome limitations. To this end, literature and market research was conducted, particularly on near-surface ground collectors, as this system is intended for the pilot plant in conjunction with outside air. Based on this, a model for the Matlab-Simulink simulation environment was implemented, which is currently being validated. The different sources were characterized in terms of available planning data, and possible source combinations were systematically compiled and evaluated in a matrix.

The next steps will be to consolidate the source combinations and define a selection of promising systems for further investigation. System models will then be developed and parameter variations for integration, design and control will be carried out. At the same time, the pilot plant will be planned and installed in 2026 so that the first measurements can be accomplished in the 26/27 heating period.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2 Motivation des Projekts	8
1.3 Projektziele	9
1.4 Vorarbeiten	9
1.5 Forschungsbedarf.....	10
2 Vorgehen und Methode.....	12
2.1 Simulationstechnische Untersuchung	12
2.2 Untersuchung Pilotanlage	12
3 Literaturüberblick	13
3.1 Europäische und internationale Projekte.....	13
3.2 Schweizer und deutsche Projekte zu Mehrquellensystemen	14
4 Kombinationen von Wärmequellen	17
4.1 Charakterisierung von Wärmequellen	17
4.1.1. Grundlegende Anforderungen an Wärmequellen.....	17
4.1.2. Kategorisierung Wärmequellen und Wärmeübertragungssysteme.....	17
4.1.3. Aussenluft.....	18
4.1.4. Erdreich	19
4.1.5. Wasser	20
4.1.6. Abwärme.....	21
4.1.7. Aktivierte Bauteile	22
4.1.8. Speicher.....	22
4.2 Planungsgrundlagen von Wärmequellen	23
4.3 Einschränkungen von Wärmequellen.....	24
4.3.1. Kombinationen von Wärmequellen	26
4.3.2. Bewertung von Integrationsoptionen	28
4.4 Hydraulische Integration von Wärmequellen.....	29
4.4.1. Quellenintegration mit Zwischenkreis.....	29
4.4.2. Quellenintegration mit Quellenspeicher	29
4.4.3. Wärmepumpenkaskadierung und Integration mit oder ohne Senkenspeicher	29
4.4.4. Integration mit Anergienetz (Gebäudecluster und Areal-/Quartiersebene).....	30



4.5	Integrationsstrategien	30
4.5.1.	Spitzenlastdeckung	30
4.5.2.	Regeneration	30
4.5.3.	Grundlastbetrieb	30
4.5.4.	Quellenvorwärmung	31
5	Pilotanlage.....	32
5.1	Literatur- und Marktüberblick zu Erdkollektoren.....	32
5.1.1.	Literaturüberblick	32
5.1.2.	Typologie Erdkollektoren	33
5.1.3.	Marktübersicht und Planungsgrundlagen.....	34
5.2	Ziele des Pilotprojekts	37
5.2.1.	Erdkollektoren zur Spitzenlastdeckung	37
5.3	Wahl des Pilotobjekts	38
5.4	Pilotobjekt Kalchbühlstrasse.....	39
5.4.1.	Heizleistungsbedarf	39
5.4.2.	Planung des Erdkollektorfelds	40
5.4.3.	Quellenhydraulik und Steuerung	42
5.4.4.	Praktische Umwegsamkeiten zur Umsetzung der Flächenkollektorvariante	43
5.4.5.	Derzeit in der Planung favorisierte Lösung	43
5.5	Kollektormodell	44
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	46
7	Nationale und internationale Zusammenarbeit	46
8	Publikationen und andere Kommunikation	46
9	Literaturverzeichnis	47
10	Anhang	50
10.1	Planungsgrundlagen Factsheets	50
10.2	Planungsgrundlagen von Wärmequellen	508
10.3	Einschränkungen von Wärmequellen.....	509
10.4	Einschätzung Quellenkombinationen anhand von Einschränkungen	50



Abkürzungsverzeichnis

ARA	Abwasserreinigungsanlage
AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich
BFE	Bundesamt für Energie
EAWAG	Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs
EK	Erdwärmekollektor
EVI	Enhanced Vapour Injection
EWS	Erdwärmesonde
LSZ	Liegenschaften Stadt Zürich
LWT	Luftwärmetauscher
MEG	Monoethylenglykol
PCM	Phase change materials
PV/T	Photovoltaik-Thermal
PWT	Plattenwärmetauscher
RK	Rückkühler
SAHP	Solar Assisted Heat Pump – Solar unterstützte Wärmepumpe
TWW	Trinkwarmwasser
VL	Vorlauf
WP	Wärmepumpe
WT	Wärmetauscher



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Der Klimawandel schreitet schnell voran und das CO₂-Budget für das 1.5 °C Ziel des Pariser Klimaabkommens könnte schon in wenigen Jahren aufgebraucht sein. Daher sind schnelle CO₂-Reduktionen essenziell, um das verbleibende CO₂-Budget noch zu strecken. In der Schweiz ist der Gebäudepark für knapp 50 % der Primärenergie und 22 % der CO₂-Emissionen verantwortlich, die wesentlich für Niedertemperaturanwendungen aufgewendet werden und daher thermodynamisch sehr effizient mit Wärmepumpen bereitgestellt werden können. Über 50 % des Gebäudebestands wird aber noch mit fossilen Heizkesseln, davon sogar ca. 33 % mit Ölkesseln mit höheren spezifischen Emissionen als Gas, mit dem ca. 25 % der Gebäude beheizt werden [1]. Daher ist es unumgänglich, die Sanierungszyklen des Wärmeerzeugersatzes zu nutzen, und Randbedingungen zu schaffen, die erneuerbare Heizsysteme ohne fossilen Energieeinsatz ermöglichen, da neu installierte fossile Wärmeerzeuger typischerweise für mehr als zwei Jahrzehnte betrieben werden und Emissionen erzeugen, die wir uns nicht mehr leisten können. Mit der notwendigen Defossilisierung der Wärmeerzeugung in der Schweiz werden zunehmend Wärmepumpensysteme installiert. In den Energieperspektiven 2050+ und der daraus abgeleiteten Wärmestrategie des Bundes wird im Zielbild eine Verfünffachung der Wärmepumpen von heute 300'000 auf 1.5 Mio. vorgesehen.

Während im kleineren Leistungsbereich bis 20 kW und im Neubau die Wärmepumpe bereits hohe Marktanteile von bis zu 90 % erreicht hat, sinken die Marktanteile im höheren Leistungsbereich ab 50 kW, die einen typischen Leistungsbereich für Mehrfamilienhaus-Bestandsbauten darstellen, deutlich ab (Verkaufszahlen in 2023 im Leistungsbereich > 50 kW ca. 1'000 im Vergleich zu 24'800 im Leistungsbereich von 5-13 kW). Wichtig für einen massiven Ausbau von Wärmepumpen und deren effizienten Betrieb sind jedoch auch ausreichende Wärmequellen auf möglichst hohem Temperaturniveau, um gerade im Winter eine gute Effizienz zu erzielen, da 60 – 80 % der Wärme aus der Wärmequelle kommt. Insbesondere in städtischen Gebieten kann die Erschliessung geeigneter und ausreichend grosser Wärmequellen jedoch eine wesentliche Herausforderung darstellen, welche die Verbreitung von Wärmepumpensystemen einschränkt. Im BFE-Forschungsprojekt «HP-Source» wurde daher untersucht, wie mit der Kombination mehrerer Wärmequellen Einschränkungen einzelner Quellen, wie sie z. B. mit zunehmender Dichte von Wärmepumpen oder bei beschränkten Platzverhältnissen entstehen, überwunden werden können. Dabei hat sich die Kombination von Luft als Grundlastquelle und Erdwärmesonden als Spitzenlastquellen als vielversprechend herausgestellt, da gerade bei höheren Leistungen durch Synergien zwischen den Quellen das Mehrquellensystem sogar effizienter und kostengünstiger als die Einzelquellen Luft oder Erdsonden sein kann. Weiterhin können durch die Aufteilung der erforderlichen Gesamtleistung für einen reinen Wärmepumpenbetrieb ohne Zusatzwärmeerzeuger Einschränkungen von beiden Einzelquellen entschärft bzw. ganz überwunden werden. Bei Luft sind dies in der Regel Schall- bzw. Platzprobleme für die Aufstellung (etwa durch beschränkte Dachlasten), für das Erdreich meist Platz- oder Bohrtiefenbeschränkungen.

1.2 Motivation des Projekts

Im Projekt MultiSource sollen diese vielversprechenden Ansätze vertieft und verschiedene weitere Aspekte untersucht werden, die im Projekt «HP-Source» nicht bzw. nicht abschliessend behandelt werden konnten. Dabei sollen weitere Quellenkombinationen untersucht werden, die z.B. bei Bohrbeschränkungen Alternativen zu Erdsonden darstellen können, z. B. oberflächennahe Systeme wie Grabenkollektoren, Erdwärmekörbe oder Solarsysteme in Verbindung mit Quellspeichern wie Eisspeichern. Ebenfalls werden Kombinationen ohne Luftquelle, z. B. die Kombination aus Wasser und Erdsonden, betrachtet. Im Projekt «HP-Source» hat sich gezeigt, dass ein begrenzender Faktor bei Erdwärmesonden im Spitzenlastbetrieb die beschränkte Entzugsleistung ist. Daher untersucht das Projekt auch alternative Quellen, die höhere Leistungen zu geringen Kosten für die kältesten Tage liefern können, um damit die primäre Quelle zu entlasten. Im sanierten Altbau kann auch Abluft einen signifikanten Beitrag liefern.



Es wird untersucht, wie konventionelle Systeme, z. B. Erdwärmekörbe oder -kollektoren modifiziert werden können, etwa durch mehr Rohre pro Fläche, um temporär eine hohe (Spitzen-)leistung zu liefern, aber über das Jahr nur einen geringen Energiebetrag. Durch begrenzte Laufzeit und lange Regeneration kann der Leistungsentzug bzw. die Effizienz gesteigert werden. Weiterhin soll auch der Aspekt einer zukünftigen Last- oder Nutzungsänderung sowie eine nachbarschaftliche Beeinflussung betrachtet und Konzepte entwickelt werden, welche zukünftige Entwicklungen in der Planung berücksichtigen bzw. wie mit den Quellsystemen darauf reagiert werden kann. Dies kann beispielsweise eine Gebäudehüllensanierung zu einem späteren Zeitpunkt oder eine Laständerung durch Umnutzung des Gebäudes, aber auch Laständerungen aufgrund des Klimawandels sein. Die nachbarschaftliche Beeinflussung kann beispielsweise durch eine weitere Installation von erdgekoppelten Systemen entstehen. Damit schliesst das Projekt Lücken u. a. zur Kombination unterschiedlicher Quellen und der hydraulischen Integration, Auslegung und Regelung, um der derzeit geringen Verbreitung von Mehrquellsystemen in der praktischen Anwendung entgegenwirken. Das Projekt soll helfen, das Bewusstsein für die Vorteile von Mehrquellsystemen gerade im höheren Leistungsbereich zu schärfen und die Marktanteile zu erhöhen, um einen fossilfreien monovalenten Wärmepumpenbetrieb auch im höheren Leistungsbereich zu ermöglichen. Übergeordnetes Projektziel ist dementsprechend die Bewertung von Mehrquellenkombinationen für höhere Leistungen > 50 kW und zur Überwindung von Einschränkungen für einen Heizungsersatz anhand der Arbeitszahl, CO₂-Emissionen und der Wirtschaftlichkeit insbesondere durch Senkung der Investitionskosten. Damit wird eine wesentliche Voraussetzung eines rein erneuerbaren Wärmezeugerersatzes ohne fossile Zusatzheizsysteme befördert, was für das Erreichen der Netto-Null-Klimaziele essenziell ist.

1.3 Projektziele

Folgende Ziele werden mit dem Projekt verfolgt:

- Empfehlung für geeignete Systemkombinationen für verschiedene Anwendungsfälle, insbesondere beim Wärmezeugerersatz und falls Erdwärmesonden nicht möglich sind
- Überprüfung der Aussagen aus den Simulationen an einer realen Pilotanlage
- Identifizierung der wichtigsten Betriebskennzahlen und Entwicklung eines Massnahmenkatalogs, um künftige Auswirkungen einer Angebots- oder Bedarfsänderung besser zu berücksichtigen
- Leitfaden für eine grundlegende Auslegung und Betriebsstrategien für verschiedene Anwendungsfälle bei Mehrquellenanwendungen (z.B. m² Grabenkollektor pro kW Heizleistung)
- Ableiten eines Best-Practice-Anlagenbeispiels aus der Pilotanlage

Dazu werden folgende Forschungsfragen untersucht:

- Welche Vorteile ergeben sich aus der Kombination von Spitzenlastquellen bezüglich Überwindung von Einschränkungen, Kosten und Effizienz? Welche Regelstrategien eignen sich für die jeweilige Quellenkombination?
- Wie müssen die einzelnen Quellen dimensioniert werden für ein optimales Zusammenspiel? Worin unterscheidet sich die Dimensionierung im Vergleich zu einer Nutzung als einzige Quelle?
- Wodurch kann sich das Quellenangebot oder der Wärme-/Kältebedarf im Laufe des Gebäudelebenszyklus ändern und mit welchen Strategien können diese bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden?
- Können die Simulationsergebnisse durch die Messwerte einer realen Anlage bestätigt werden? - Welche Effekte können in einer realen Anlage verifiziert werden, welche zusätzlichen Effekte treten auf? Was sind die Kostentreiber in der realen Installation?

1.4 Vorarbeiten

Im BFE-Forschungsprojekt «HP-Source» konnte gezeigt werden, dass durch die Nutzung von Erdwärmesonden zur Spitzenlastdeckung bei gleichzeitiger Nutzung einer anderen Grundlastquelle



(z.B. Luft oder Fernwärme) der Bedarf an Erdwärmesonden massiv reduziert wird. So wird das notwendige Bodenvolumen durch den Energiebedarf aus dem Erdreich definiert.

Durch einen «kalten» Betrieb der Erdwärmesonde, also eine Sondereintrittstemperatur nahe dem zulässigen Minimum nach SIA 384/6 von -3 °C können hohe spezifische Leistungen aus dem Erdreich entzogen werden. Dieses Konzept wird im BFE-Pilotprojekt «RenoSource» [2] in einem realen Gebäude getestet und hat im ersten Betriebswinter 2024/25 seine Funktionstüchtigkeit bewiesen.

Die Abbildung 1 zeigt, wie sich die benötigte Erdsondenlänge mit abnehmendem Leistungsanteil aus der Sonde überproportional reduziert. Bei grösseren Gebäuden bzw. Sondenfeldern (blaue Kurven) verläuft diese Abnahme proportional zum aus den Erdwärmesonden bezogenen Energieanteil.

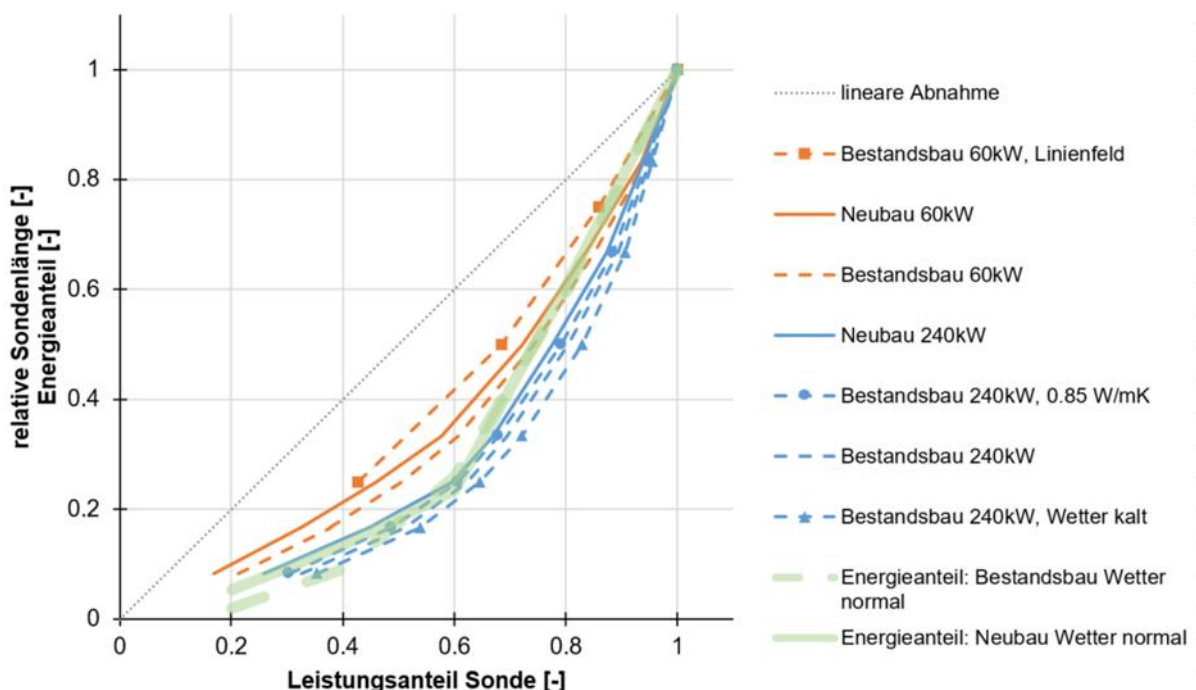


Abbildung 1: Benötigte relative Sondenlänge beim Spitzenlastbetrieb im Vergleich zum monovalenten Betrieb [3]

1.5 Forschungsbedarf

Bei der Nutzung des Erdreichs als Quelle wird dessen Leistungsfähigkeit durch drei Effekte definiert:

- **Speicherkapazität:** Das erschlossene Erdreichvolumen stellt die Wärmespeicherkapazität zur Verfügung.
- **Regeneration:** Das Erdreichvolumen wird einerseits natürlich (Erdwärme, Witterung), kann aber auch künstlich (Eintrag von Wärme, z.B. Solar- oder Abwärme) regeneriert werden.
- **Wärmetauscherfläche:** Eine Erdwärmesonde ist ein Wärmetauscher, dessen Leistung sich aus $\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_{m,log}$ ergibt. Bei gegebener minimaler Eintrittstemperatur des Fluids (Begrenzung durch SIA 384/6 [4]) ergibt sich die zur Verfügung stehende Leistung aus der Erdreichtemperatur, dem Wärmedurchgangskoeffizienten k und der Wärmetauscherfläche A .

Bei der Nutzung als Spitzenlastquelle kann das Volumen aufgrund der kleinen Wärmemenge reduziert werden. Bei gleichzeitiger Reduktion der Wärmetauscherfläche wird jedoch auch die Leistung reduziert bzw. das System muss bei einer niedrigeren Eintrittstemperatur betrieben werden, um trotzdem eine hohe Leistung entziehen zu können, was die Arbeitszahl vermindert, wie dies auch in HP-Source gezeigt wurde.

Bei Erdwärmesonden werden die Kosten durch die Bohrung dominiert, d. h. eine Vergrößerung der Wärmetauscherfläche zugunsten einer höheren Quellentemperatur führt zu höheren Bohrkosten.



Verbesserungen der Quellentemperatur sind in begrenztem Umfang mit Hinterfüllungen mit verbesserter Leitfähigkeit oder Erdwärmesonden mit grösserer Oberfläche (z.B. Koax oder Wellrohren) möglich.

Bei zu niedrigen Fluidtemperaturen besteht jedoch nach wie vor die Gefahr, dass das Erdreich gefriert und dadurch die Hinterfüllung beschädigt wird. Aus diesen Grundlagen wurde die Idee entwickelt, dass oberflächennahe Kollektoren eine interessante Spitzenlastquelle bieten, da in einem gegebenen Volumen die Wärmetauscherfläche relativ einfach erhöht werden kann. Im Weiteren ist eine teilweise Vereisung des Erdreichs nicht so problematisch wie bei Erdwärmesonden, d.h. die latente Wärme im Vereisungsprozess kann zusätzlich genutzt werden und stellt gerade zu Spitzenlastzeiten eine Reserveleistung dar.



2 Vorgehen und Methode

Die Struktur des Projekts ist in zwei Hauptarbeitsbereiche aufgeteilt:

- Zum einen die Identifikation von günstigen Quellenkombinationen und deren Modellierung und simulationstechnische Untersuchung. Ausgewählten Quellenkombinationen werden für unterschiedliche Gebäuderandbedingungen mittels Parametervariationen untersucht und technisch sowie wirtschaftlich bewertet.
- Zum anderen die Erprobung einer vielversprechenden Quellenkombination in einem realen P&D Objekt. Das System soll dabei möglichst komplementär zur bereits in einer Pilotanlage untersuchten Kombination von Aussenluft und vertikalen Erdwärmesonden sein, um alternative Lösungen bei Bohrbeschränkungen zu erproben.

Der Fokus für diesen Zwischenbericht über die ersten zehn Monate des Projekts lag auf der Identifikation und Planungsvorbereitung der P&D-Anlage mit Wärmeerzeugerersatz, um durch rechtzeitige Planung und Realisierung des Wärmeerzeugerersatzes zwei Heizperioden mit dem neuen Mehr-Quellensystem innerhalb der Projektlaufzeit messen und auswerten zu können.

2.1 Simulationstechnische Untersuchung

Die simulationstechnische Untersuchung von Quellenkombinationen umfasst die Arbeitspakete einer Identifikation von günstigen Kombinationen, deren Modellierung und Integration in eine Simulationsumgebung sowie die Durchführung von Parametervariationen. Ausgehend von einem Literatur- und Marktüberblick (siehe Kap. 3) werden günstige Systemkonfigurationen abgeleitet und Planungsgrundlagen für die involvierten Wärmequellen zusammengestellt (siehe Kap. 4). Die Systemkonfigurationen werden im einem Herstellerworkshop vorgestellt und diskutiert, um eine Systemauswahl unter Berücksichtigung des Praxiswissens zu erzielen.

Als Auswertung aus den Parametervariationen werden technische Aussagen zu Integration, Auslegung und Regelung abgeleitet und ausgewertet, inwieweit Einschränkungen der Einzelquellen im grossen Leistungsbereich entschärft bzw. ganz umgangen werden können. Mittels einer wirtschaftlichen Beurteilung wird die praktische Umsetzbarkeit verifiziert, insbesondere in Hinblick auf Kosteneinsparpotenziale durch Synergien der Wärmequellenkombination. Daraus werden Empfehlungen und Planungshinweise für günstige Kombinationen von Wärmequellen abgeleitet, speziell für den Kontext des Wärmeerzeugerersatzes in Bestandsgebäuden im hohen Leistungsbereich.

2.2 Untersuchung Pilotanlage

Parallel wird eine vielversprechende Kombination in einer realen Pilotanlage installiert und über zwei Heizperioden gemessen. Damit kann die reale Umsetzbarkeit im Kontext einer Heizungssanierung geprüft und Planungserfahrung gesammelt werden. Das klassische Planungs- und Auslegungsvorgehen kann dabei durch Simulationsuntersuchungen ergänzt werden, da derzeit nur wenige Informationen für die Planung von Mehrquellensystemen zur Verfügung stehen. Über Nutzung unterschiedlicher Systeme können vertiefte Aussagen z. B. zum Leistungsentzug und Flächenbedarf der jeweiligen Systeme ausgewertet werden. Über die Messung von zwei Heizperioden können Daten für die Verifizierung der Planungs- und Simulationsergebnisse bereitgestellt werden, sodass eine Validierung am realen Objekt erfolgen und für die zweite Heizperiode Optimierungen implementiert werden können. Damit steht am Projektende eine praxiserprobte Mehrquellenlösung, die als Best-Practice Anwendung zur Verbreitung des erarbeiteten Wissens genutzt werden kann.



3 Literaturüberblick

3.1 Europäische und internationale Projekte

In der Forschung gibt es verschiedene Studien, die sich mit Anwendungen von mehreren Wärmequellen befassen. Ein Forschungsbereich umfasst sogenannte solarunterstützte Wärmepumpen (Solar Assisted Heat Pumps - SAHP), die solarthermische oder PV/T-Kollektoren als Wärmequelle für Direktverdampfung nutzen, d. h. das Kältemittel wird in Solarkollektoren verdampft, z. B. [5]-[6], was insbesondere in Asien und China untersucht wird. Yang et al. [5] geben einen Review zu SAHPs und Namdar et al. [7] einen Überblick solarunterstützter Wärmepumpen mit Direktverdampfung in PV/T-Kollektoren für Gebäudeanwendungen. Tan et al. [6] entwickeln einen Parallelkompressor für Aussenluft und ein solares Direktverdampfungskollektorsystem, um die Fehlanpassung des Verdampferdrucks im Simultanbetrieb zu überwinden. Das neue Konzept wird mit einer Luftwärmepumpe mit einfacher Kompression verglichen, was zu einem um ca. 14 bis 17 % geringeren Stromverbrauch für die Anwendung in einem Bürogebäude in Peking führt.

Ein weiteres Forschungsgebiet betrifft die Entwicklung von Komponenten wie Zwei-Quellen-Verdampfern oder Kältekreisen [8]-[9], die zwei verschiedenen Wärmequellen im selben Verdampfer oder mehrere in den Kältekreis integrierte Verdampfer nutzen können. Derzeit beschränkt sich dies jedoch auf die Entwicklung von Prototypen, die noch keine Marktverbreitung gefunden haben. Li et al. [8] entwickeln eine Wärmepumpe mit einem doppelten Niederdruckverdampfer und einem Mitteldruckverdampfer mit Dampfinjektions (EVI)-Kompressor für die Verwendung einer Kombination aus Abluft und Aussenluft, um die Abtauzyklen durch Abluft-Frostverzögerung und Abtauen zu verbessern. Die aus Modellierungen und Simulationen abgeleiteten Kosteneinsparungen für verschiedene Regionen liegen im Bereich von 20-54 %, und die CO₂-Emissionen können deutlich reduziert werden.

Ein weiteres Forschungsgebiet in internationalen Veröffentlichungen widmet sich der Solarenergie als Regenerationsquelle für das Erdreich, z. B. [10]-[11], jedoch hauptsächlich mit dem Ziel, die Jahresarbeitszahl zu erhöhen. You et al. [10] geben einen Review von PV/T-Kollektoren, die mit erdgekoppelten Wärmepumpen eingesetzt werden, während sich der Schwerpunkt des Reviews von Xu et al. [12] speziell mit regenerierten erdgekoppelten Wärmepumpen befasst, um ein thermisches Ungleichgewicht des Erdreichs zu vermeiden. Wang et al. [13] geben einen Review hybrider erdgekoppelter Wärmepumpen mit unterschiedlichen Konstruktionszielen in Bezug auf thermisches Ungleichgewicht des Erdreichs, Jahresarbeitszahl-Verbesserung oder entsprechende Energie- und Kosteneinsparungen, Bewertung von regulatorischen Grenzen, Regelungsstrategien und Wärmespeicherung im Erdreich sowie Kombination mit PCM-Speichern. Als Wärmequellen werden Erdwärmesonden oder horizontale Kollektoren in Kombination mit verschiedenen Arten von Solarthermie- und PV/T-Kollektoren und/oder Aussenluft sowohl in Quellen- als auch in Senkenintegration eingesetzt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass hybride erdgekoppelte WP als vielversprechende Technologien für zukünftige nachhaltige Heizsysteme angesehen werden.

Die Regeneration von untiefen Sondenfeldern im Bereich von 100 m wird von Kirschstein et al. [14] untersucht. Sie stellen fest, dass die meisten Regenerationsquellen solarthermische Flachkollektoren sind, die einem thermischen Ungleichgewicht im Erdreich entgegenwirken und eine Verringerung der Gesamtlänge der Erdwärmesonden sowie eine Leistungssteigerung ermöglichen sollen. Die meisten Untersuchungen wurden für Einfamilienhäuser durchgeführt, sodass weiterer Forschungsbedarf in Bezug auf größere Systeme für Fernwärme oder -kälte sowie die Validierung theoretischer Studien durch Monitoring besteht. Sommerfeldt und Madani [15] führen eine techno-ökonomische Analyse mittels TRNSYS-Simulationen von Erdsondenfeldern in Kombination mit PV/T-Kollektoren im schwedischen Klima durch. Die Ergebnisse zeigen eine Reduktion der Gesamtlänge der Erdwärmesonden um 18% in Verbindung mit einer Platzersparnis von 50 % bei gleichbleibender Jahresarbeitszahl im Vergleich zu einem System ohne PV/T-Regeneration. Die Kosten sind höher als bei der Kombination von erdgekoppelter Wärmepumpe und PV, berücksichtigen jedoch nicht die Einsparungen bei der Grundstücksfläche, welche jedoch das Marktpotenzial von erdgekoppelten Wärmepumpen erhöht.

Liravi et al. [16] untersuchen die saisonale Leistung und die Investitionskosten für größere und kleinere Sondenfelder im nordischen Klima mit Regeneration von PV/T-Kollektoren.



Sie stellen eine erhebliche Reduktion der Gesamtlänge der Sonden um bis zu 50 % fest, insbesondere bei größeren kompakten Feldern, während bei kleineren Feldern die natürliche Regeneration nach wie vor eine wichtige Rolle spielt. Die damit verbundenen Kosteneinsparungen liegen im Vergleich zu erdgekoppelter Wärmepumpe und PV im Bereich von etwa 9-23 %. Die Integration von PV/T zur Regeneration ist daher eine vielversprechende Lösung für nordische Länder.

Adebayo et al. [11] untersuchen die solare Regeneration von Einzel- und Doppel-U-Rohr-Erdsonden durch SAHP für Anwendungen in kalten Klimazonen anhand eines Finite-Volumen-Modells, um die Leistung umfassend zu bewerten. Die Ergebnisse beschreiben einen Kompromiss zwischen Heiz- und Kühlbetrieb. Während der Heiz-COP im Heizmodus im Vergleich zu einer erdgekoppelten WP um ca. den Faktor 1.2 steigt, sinkt er im Kühlbetrieb auf ca. den Faktor von 0.7 für eine Einzel- bzw. Doppel-U-Rohr-Sonde. Auch die Neigungswinkel der Kollektoren wurden untersucht, wobei für Calgary anhand der Wetterdaten ein Optimum von 45° für die Gesamtenergieeinsparung ermittelt wurde.

Mehrere Projekte [17]-[18] untersuchen auch Zwei-Quellen-WP-Layouts hinsichtlich optimierter Regelungsstrategien zur Erhöhung der Jahresarbeitszahl und zur Minderung des thermischen Ungleichgewichts im Erdreich. Dabei werden die Wärmequellen von einer auf die andere umgeschaltet, also nur Alternativ- und kein Parallelbetrieb der Quellen betrachtet. Sang et al. [17] untersuchen die optimierte Umschaltung zwischen einer Aussenluftquelle und einem PV/T-Ladespeicher in einem Zwei-Quellen-Wärmepumpen-System, das in Einzel- und Zwei-Quellen-Varianten betrieben werden kann. Das Reduktionspotenzial in Bezug auf die PV/T-Wasser-basierte WP liegt im Bereich von 5 % bei den Energie- und Betriebskosten. Corberán et al. [19] führen eine TRNSYS-Simulation über einen Zeitraum von 20 Jahren für eine Erdreich- und Luftwärmequelle für Raumheizung, Warmwasserbereitung und Raumkühlung in einem Bürogebäude durch. Die Quellen werden je nach Betriebsmodus umgeschaltet. Die gleiche Jahresarbeitszahl kann mit einer um bis zu 50 % reduzierten Gesamtlänge der Erdsonde erreicht werden, was mit einer Kostenersparnis von 30 % verbunden ist. Grossi et al. [20] erstellen ein Modell einer Zwei-Quellen-Wärmepumpe mit Aussenluft- und Erdwärmequelle in TRNSYS, um das Ungleichgewicht im Erdreich durch unterschiedliche Heiz- und Kühllasten sowie unterdimensionierte Sonden zu bewerten. Es zeigt sich, dass die Zwei-Quellen-Konfiguration gut geeignet ist, um thermische Ungleichgewichte zu vermeiden und die langfristige saisonale Entzugsleistung zu stabilisieren. Der beste Kompromiss zwischen Jahresarbeitszahl und Kosten liegt im Bereich einer um 15–55 % kürzeren Gesamtlänge der Erdsonden im Vergleich zu einer einzelnen, ausschließlich erdgekoppelten Wärmepumpe. Natale et al. [21] untersuchen die Steuerung einer Zwei-Quellen-Wärmepumpe durch Simulation und durch Hardware-in-the-Loop-Tests [22]. Dabei wird zwischen den Quellen umgeschaltet. Die Sondentemperaturen im Feld werden durch verteilte Temperaturmessung ausgewertet. Es wurde bestätigt, dass auch mit einer kleineren Sondenauslegung eine ähnliche Leistung aufrechterhalten werden kann, was eine Nachrüstung von unterdimensionierten Sonden ermöglicht. Bordignon et al. [18] untersuchen eine dynamische Umschalttemperatur, die sich im Laufe des Jahres für eine Luft- und Erdwärmequelle dynamisch ändert, um das thermische Ungleichgewicht im Boden zu minimieren.

3.2 Schweizer und deutsche Projekte zu Mehrquellensystemen

Ziel des Projekts TriSolHP [23] war die Effizienzsteigerung von Wärmepumpensystemen anhand unterschiedlicher Entwicklungslinien, wobei Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln berücksichtigt werden sollten. Im Projekt wurden die Entwicklung von Propan-Wärmepumpen vorangetrieben und zwei Mehrquellensysteme untersucht und weiterentwickelt: 1. Die Kombination von Eisspeichern mit Solarwärme und 2. die Kombination von Aussenluft und Erdwärmesonden. Das Potenzial dieser Varianten wurde für unterschiedliche Standorte in Europa ermittelt. Je nach Einsatzort und System konnten durch die technischen Entwicklungen Kosteneinsparungen von 10-15 % erreicht werden.

Das Projekt Ice-Grid [24] untersucht das Potential der Integration von Eisspeichern in Anergie-Netze, sowohl als saisonale Speicher als auch als Kurzzeitspeicher, um Spitzenlasten im Winter zu decken. Über Simulationen wird das ökonomische und ökologische Potenzial analysiert.

Aus der Simulationsstudie werden Richtlinien zur Implementierung und Dimensionierung entwickelt. In einer Fallstudie zur realen Weiterentwicklung eines geeigneten Anergie-Netzes mit Abwärme einer Abwasserreinigungsanlage (ARA) als Quelle wird aufgezeigt, wie Eisspeicher dazu beitragen können, das Netz über die Kapazitätsgrenze der ARA hinaus zu erweitern. Das Netz dient als Beispiel, um die



Kombination von Eisspeichern mit anderen Wärmequellen wie Luft, Solarthermie und Abwasserwärme zu untersuchen und das Potential der entwickelten Tools aufzuzeigen, welche über die am SPF entwickelte Umgebung pytrnsys open-source zur Verfügung gestellt werden.

Im Projekt AsphaltReg [25] wird ein in die Sauberkeitsschicht unter dem Asphalt verlegter Kollektor gemessen und hinsichtlich des Ertrags für die Erdsondenregeneration ausgewertet. Gleichzeitig können Asphalt-Kollektoren die lokale Überhitzung des Asphalts im Sommer reduzieren und damit dem Wärmeinseleffekt entgegenwirken und das Aussenklima auf besonnten Plätzen verbessern. Die Regeneration der Erdwärmesonden verhindert bei dichter Nutzung die Langzeitauskühlung des Untergrundes. Durch die Verlegung der Rohre in der Sauberkeitsschicht statt im Asphalt wird der Ertrag potenziell vermindert, aber dafür bleibt die Rezyklierbarkeit des Asphalts erhalten, sodass in diesem Projekt erstmalig ein rezyklierbarer Asphaltkollektor gebaut, gemessen und optimiert wird. In den ersten Betriebsjahren wurden Kollektorerträge von ca. 200 kWh/m² erreicht.

Im P&D-Projekt OblaTherm [26] wurde die Kombination aus PV/T-Kollektoren und einer aktivierten Bodenplatte an einem Gebäude mit Produktions-, Lager-, Server- und Büronutzung gemessen. Dadurch, dass auch Serverabwärme als Wärmequelle für die Wärmepumpen zur Verfügung steht, wurde die Fundamentplatte hauptsächlich für den Kühlbetrieb verwendet, da durch Einkopplung der Abwärme in die Fundamentplatte diese auch im Winter meist höhere Temperaturen als die PV/T Kollektoren hat. Nachts wird über Wärmeabgabe an die Umgebung und Abstrahlung mit den PV/T Kollektoren die Fundamentplatte rückgeköhlt, um tagsüber die Kühlung des Bürogebäudes bereitzustellen. Die beiden Wärmepumpen in Kombination mit der aktivierten Fundamentplatte weisen mit einer JAZ von 5.8 im Heiz-, 3.5 für Warmwasser- und 4.8 im Kühlbetrieb eine hohe Effizienz auf, und das Gebäude kann durch die Abwärme und die PV/T fast autark betrieben werden.

Im Projekt SensOpt [27] werden solar beheizte Ein- und Mehrfamilienhäuser, die bereits heute realisierbar sind, untersucht. Die dafür nötige saisonale Speicherung von Wärme ist aber mit entsprechenden Investitionskosten und erheblichem Raumbedarf für Wärmespeichervolumen verbunden. Im Projekt wurde für ein bestehendes Mehrfamilienhaus mit Messungen und Simulationen analysiert, wie Kosten und Speichervolumen durch die Kombination von Solarthermie mit photovoltaisch angetriebener Wärmepumpe gesenkt werden können. Diese Wärmepumpe kommt nur bei PV-Ertrag und bei ausgekühltem Speicher zum Einsatz und hat somit ähnlich wie eine Spitzentechnologie wenige Volllaststunden und entsprechende Anforderungen an die Quellen. Es wurden die Fundamentplatte, Luft, Luft-PV/T und im Baugraben verlegte Erdkollektorrohre als Quelle untersucht.

Im Projekt RegEWS (Machbarkeitsstudie vom AWEL Zürich finanziert) werden Möglichkeiten analysiert, den Bedarf und die Kosten von EWS für ein geplantes Fernwärmenetz in Wallisellen zu minimieren. Abwärme der KVA Hagenholz, welche aufgrund des hohen Bedarfes der Stadt Zürich nur noch im Sommer zur Verfügung steht, wird genutzt, um das EWS-Feld auf 70 °C zu erwärmen. Im Winter wird es mittels Wärmepumpe wieder bis an die Frostgrenze ausgekühlt. Bei ausreichend hohen Aussentemperaturen wird das EWS-Feld mit einem Aussenluftwärmeübertrager entlastet. Mit diesen beiden Massnahmen konnte der Bedarf an Sonden um ein Vielfaches verringert werden.

In [28] wurde in einer Pilotanlage mit mehreren MFH im Bestand eine Abluftanlage nachgerüstet. Die Abluft dient als Quelle für eine Wärmepumpe, primär für die Warmwasseraufbereitung und zusätzlicher Unterstützung der Heizung. Die restliche Heizwärme wird von einer Erdsonden-Wärmepumpe erzeugt, welche dadurch nur noch ca. 60% der Wärmemenge bereitstellen muss.

Reum et al. [9] untersuchen eine Wärmepumpe mit zwei Kompressoren für Aussenluft und horizontale Erdkollektoren. Trotz des Zwei-Kompressor-Systems gleicht die Leistung des Einquellenbetriebs Wärmepumpen mit einer Quelle, während im Zwei-Quellen-Parallelbetrieb beide Quellen mit reduzierter Last betrieben werden können, z.B. mit 41 % Erdreichquelle und 59 % Aussenluft. Probleme traten mit der Kältemittel- und Ölverlagerung auf, die weiter untersucht werden.

Am Fraunhofer ISE wurde die Integration einer Mehrquellenanlage für die Versorgung von Mehrfamilienhäusern in Karlsruhe mit Simulationen und messtechnisch untersucht, um damit die technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen vor allem in Mehrfamilien-Bestandsgebäuden zu adressieren. Ende 2021 wurden zwei Mehrfamilienhäuser (Baujahr 1963, Hüllensanierung 1995, 30 Wohneinheiten) mit hybriden Wärmepumpenanlagen (Wärmepumpe und Gaskessel) ausgestattet. Um der begrenzten Wärmequellenverfügbarkeit im städtischen Umfeld zu begegnen, wurden PVT-Kollektoren als einzige Wärmequelle sowie ein Mehrquellen-System bestehend aus Erdwärmesonden und einer Aussenluft-Einheit installiert [29].



Die messtechnische Auswertung des ersten zeitgleichen Betriebshalbjahres zeigt eine effiziente Umsetzung der Mehrquellen-Wärmepumpe mit einer Arbeitszahl von 3.2. Allerdings ist aufgrund der zu geringen maximalen Vorlauf-Temperatur von 60 °C – 68 °C der Betrieb des Gaskessels zur Trinkwarmwasser (TWW)-Nacherwärmung notwendig. Insgesamt deckt der Gaskessel 28% des Wärmebedarfs. Die Analyse der Messdaten der PVT-Wärmepumpe zeigt, dass die Wärmepumpe im Sommerbetrieb (reine TWW-Bereitung) den Wärmebedarf allein decken kann (max. VL-Temperatur von 75 °C). Im gesamten Betrachtungszeitraum liegt die Arbeitszahl bei 3.0. Allerdings müssen aufgrund der Einsatzgrenzen der Wärmepumpe über 38% des gesamten Wärmebedarfs durch den Gaskessel gedeckt werden. Bei der Evaluation der beiden Anlagen wurden Optimierungspotentiale im Betrieb und in der Konfiguration der Wärmepumpenanlagen identifiziert. So sollte die Regelung der Wärmequelle im PVT-System und die TWW-Bereitung im MQS optimiert werden [30].

Weitere Schweizer Projekte sind im HP-Source Bericht [3] referenziert. Projekte in Verbindung mit oberflächennaher Geothermie stehen in Zusammenhang mit der geplanten Pilotanlage und werden direkt im Kapitel 5.1 aufgeführt.



4 Kombinationen von Wärmequellen

Zur Charakterisierung von Wärmequellenkombinationen werden Mehrquellensysteme im Projekt mit Simulationen untersucht. Dazu werden im ersten Schritt die grundlegenden Eigenschaften, Anforderungen und Randbedingungen für den Betrieb von Wärmequellen analysiert und daraus günstige Kombinationen von Wärmequellen qualitativ abgeleitet. Darauf aufbauend werden die Planungsgrundlagen für die einzelnen Wärmequellen zusammengestellt und typische Einschränkungen der einzelnen Quellen eruiert, um daraus günstige Kombinationen zu erarbeiten. Diese Grundlagen sollen in einem Workshop mit Herstellern gespiegelt und dann zu einer Auswahl von zu untersuchenden Wärmequellen verdichtet werden, welche detailliert modelliert und simuliert sowie durch Parametervariation hinsichtlich der Integration, Auslegung und Regelung untersucht werden. Ziel ist die Erarbeitung von Planungshinweisen, da bisher für den Mehrquelleneinsatz kaum Informationen von Herstellern verfügbar sind, wie sich aus der Literatur- und Marktrecherche zur Pilotanlage in Kap. 5 ergeben hat.

4.1 Charakterisierung von Wärmequellen

Zur Charakterisierung der Wärmequellen wird zunächst eine Beschreibung der grundlegenden Anforderungen und Eigenschaften der Wärmequellen und eingesetzten Wärmeübertrager vorgenommen.

4.1.1. Grundlegende Anforderungen an Wärmequellen

Leistungsfähigkeit

Zur Erfüllung der Funktionsfähigkeit des Wärmepumpensystems muss zu jedem Zeitpunkt eine ausreichende Wärmequelle zur Verfügung stehen, da die Wärmepumpe sonst kurzfristig in eine Niederdruckstörung geht. Die grundlegende Anforderung ist also die Bereitstellung der notwendigen Quellenleistung unter Einhaltung quellenspezifischer Rand- und Standortbedingungen.

Temperaturniveau

Im Weiteren hängt die Effizienz der Wärmepumpe wesentlich vom Temperaturhub und in zweiter Näherung von der Quellentemperatur ab, weshalb das Temperaturniveau der Quelle einen grossen Einfluss auf einen effizienten Betrieb der Wärmepumpe hat.

Verfügbarkeit

Darüber hinaus existieren Standortrandbedingungen hinsichtlich der Verfügbarkeit, Zugänglichkeit und der Erschliessung der Wärmequelle, was eng mit den Einschränkungen hinsichtlich verfügbarer Quellen zusammenhängt.

Wirtschaftlichkeit

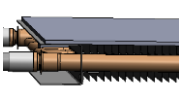
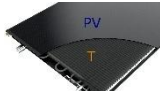
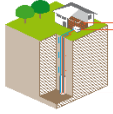
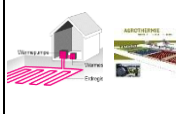
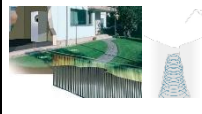
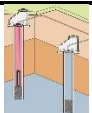
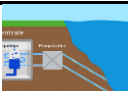
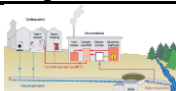
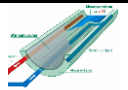
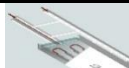
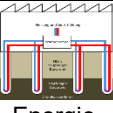
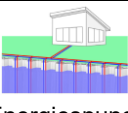
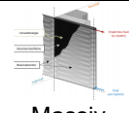
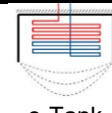
Zu guter Letzt spielt auch die Wirtschaftlichkeit der Wärmequellennutzung eine Rolle, die ebenfalls den Ausschluss bestimmter Wärmequellen bewirken kann. Die Randbedingungen und allfälligen Einschränkungen am Standort sind umso ausgeprägter, je dichter die bebaute Umgebung ist, und steigen ebenfalls mit der erforderlichen Quellenleistung an, sodass insbesondere für Bestandsgebäude häufig die Einschränkungen hinsichtlich einer leistungsmässig ausreichenden, qualitativ hochwertigen und günstig zu erschliessenden Wärmequelle zunehmen.

4.1.2. Kategorisierung Wärmequellen und Wärmeübertragungssysteme

Zur Kategorisierung der betrachteten Quellen ist in Tabelle 1 ein Überblick verschiedener Wärmequellensysteme in Abhängigkeit der genutzten Umgebungsquelle aufgeführt. Die natürlichen Umgebungsquellen Luft, Erdreich und Wasser können über unterschiedliche Wärmeübertragungssysteme erschlossen werden. Neben den natürlichen Umgebungsquellen kommen noch Abwärmeequellen hinzu, die durch Gebäude, Industrie- oder Infrastrukturbetrieb entstehen. Zur zeitversetzten Nutzung können darüber hinaus die Speicherkapazität der natürlichen Quellen genutzt oder thermische Speicher in das System integriert werden.



Tabelle 1: Wärmequellen und Wärmeübertragungssysteme zur Erschliessung

Kategorisierung von Wärmequellen					
Wärmequelle	Wärmeübertragungssysteme				
Aussenluft/ Solar	 Aussenluft- WT	 Solar-Luft- Absorber	 Solarabsorber PV/T	 Solarkollektor	 Dachziegel- Absorber
Erdbreich	 Erdwärmesonde	 Wärmerohr CO ₂ -Sonde	 Flächenkollektor/ Erdregister/ Agrothermie	 Korbkollektor Erdwärmekorb/ Spiralsonde	 Tiefenkollektor (Ring)-Graben- kollektor
Wasser	 Grund- wasser	 Oberflächenwasser Seen und Flüsse	 Gereinigtes Wasser ARA		
Abwärme	 Abluft WRG	 Haus-Abwasser- WRG	 Kanalabwasser- WRG	 Gebäude- kühlung	 Gewerbe- kühlung
Aktivierung	 Energie- pfähle	 Energiezaun	 Energiespund- wand	 Massiv- absorber	 Asphalt- kollektor
Speicher	 Wärme-/ Kälte- speicher	 Eisspeicher	 e-Tank		

4.1.3. Aussenluft

Aussenluft ist überall verfügbar und bietet physikalisch betrachtet eine unerschöpfliche Leistung. Die geringe Wärmekapazität der Luft und eine typische Abkühlung von früher 10-15 K, in neueren Modellen eher 3-5 K, machen jedoch je nach Abkühlung vergleichsweise höhere Volumenströme am Verdampfer von 350 – 700 m³/h/kW_{Wärmeleistung} notwendig, sodass die Leistung mit dem Volumenstrom skaliert. Dadurch entstehende Lärmemissionen machen einen Lärmschutznachweis nach kantonalen oder kommunalen Verfahren erforderlich. Durch Kondensat und Eisbildung ist eine automatische Abtauung des Verdampfers notwendig und entstehendes Kondensat muss in einer frostfreien Leitung abgeführt werden. Durch die ausgeprägte Gegenläufigkeit von tiefen Aussentemperaturen bei höchstem Leistungsbedarf können Einschränkungen der Heiztemperaturen entstehen, die mit zukünftigen natürlichen Kältemitteln jedoch weitgehend umgangen werden können. Es müssen aber die Komponenten grösser dimensioniert werden, was durch die starke saisonale Leistungsvariation zu Problemen mit einem Taktbetrieb mit steigenden Aussenlufttemperaturen führt, dem allerdings mit Leistungsregelung und Kaskadierung entgegengewirkt werden kann.



Trotzdem verursacht die grössere Dimensionierung allfällige Lärm- und je nach Aufstellungsort Platz- und Gewichtsprobleme (bei Dachinstallation) und erhöht die Investitionskosten. Die Quellennutzung der Luft ist bewilligungsfrei, der Elektroanschluss hingegen erfordert eine Bewilligung, wie auch eine Baubewilligung für festinstalliert aussenaufgestellte Geräte notwendig ist und bei Splitanlagen die kältetechnischen Vorschriften beachtet werden müssen. Eine Innenaufstellung ist im Leistungsbereich von 5 - 50 kW je nach räumlicher Situation möglich. Aussenaufstellung ist weit verbreitet, insbesondere wenn die Platzverhältnisse eine Innenaufstellung nicht zulassen, und zunehmend mit der Nutzung von Propan als Kältemittel. Erste Propangeräte sind aber auch schon für Innenaufstellung erhältlich. Alternativ zur Aussenaufstellung ist eine Splitaufstellung gängig, bei der der Verdampfer auf der Aussenseite, der Kondensator im Gebäude und der Verdichter innen oder aussen installiert wird. Eine Luftfassung an warmen Standorten kann die Effizienz verbessern, Kurzschlüsse zwischen kalten Luftauslässen und der Luftfassung müssen vermieden werden. Typische Einsatzgrenzen des Aussenluftbetriebs liegen im Bereich von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Über spezielle Kältekreismodifikationen kann heute auch ein Betrieb unter $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ realisiert werden, was aber noch selten auf dem mitteleuropäischen Markt anzutreffen ist.

4.1.4. Erdreich

Erdreichquellen stellen eine thermisch sehr günstige, aber über die notwendige Fläche bzw. Tiefe zur Erschliessung begrenzte Wärmequelle dar. Ab ca. 10 m besteht nur noch eine geringe saisonale Temperaturschwankung und annähernd konstante Temperaturen, so dass das Erdreich für Heiz- und Kühlnutzung geeignet ist. Anschliessend stellt sich eine Temperaturzunahme mit der Tiefe gemäss dem geothermischen Gradienten von im Schweizer Mittelland typischen Werten von ca. 3 K/100 m ein. Bei kontinuierlichem Wärmeentzug nähert sich die Erdreichtemperatur über mehrere Jahrzehnte asymptotisch einem Gleichgewichtspunkt aus entzogener Leistung und nachfliessender Erdwärme. Über die Speicherfähigkeit des Erdreichs können jedoch über Regeneration bzw. Überregeneration die natürliche Quellenleistung und Erdreichtemperaturen stabilisiert oder sogar gesteigert werden, womit der Quellenbetrieb in einen Speicherbetrieb übergeht. Regeneration führt zu Flächenreduktion verglichen mit unregeneriertem Erdreich, da zum einen die Sonden wegen der technischen Regeneration dichter gebohrt werden können, zum anderen die aus der Regenerationsquelle gewonnene Wärme zeitweise auch direkt genutzt und damit das Erdreich entlastet wird. Die Nutzung ist bewilligungspflichtig, Möglichkeiten bzw. Einschränkung in der Erdwärmesondennutzung kann über kantonale Geoinformationsportale ermittelt werden bzw. als schnelle Einschätzung unter www.kann-ich-bohren.ch anhand der Eingabe der Adresse ausgewertet werden. Eine Übersicht der kantonalen Bewilligungsverfahren ist in [31] gegeben. Grundlegende Anforderungen sind in [32] zusammengestellt.

Untiefe Geothermienutzung über Erdwärmesonden

Erdsonden werden typisch zwischen 50-400 m gebohrt und im Abstand von 5-10 m installiert. Sie weisen eine geringe Saisonalität der Quellentemperaturen auf und sind dadurch auch für Kühlbetrieb geeignet. Die Speicherfähigkeit ermöglicht eine Regeneration, über die die Erdreichtemperatur stabilisiert oder erhöht werden können. Die Auslegung kleinerer Anlagen von 1-4 Sonden für Wohnnutzung erfolgt in der Schweiz mit Handrechenverfahren nach SIA 384/6 [4], grössere Anlagen werden mit einschlägigen Simulationsprogrammen (z. B. EWS [33], GeowattCore [34]) dimensioniert. Eine hydraulische Auslegung kann beispielsweise mit dem Excel-Tool EWS-Druck [35] oder mit Simulationen vorgenommen werden. Nach SIA-Kriterium werden Erdsonden mit Frostschutz (Wasser-Glykol Gemisch) standardmässig auf $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, wassergefüllt auf $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ mittlere Fluidtemperatur nach 50 Jahren ausgelegt, was die Sondenlängen in Abhängigkeit der Standortbedingungen definiert. Nachbarsonden im Umkreis von 50 m müssen bei Auslegung mitberücksichtigt werden. Damit werden im Heizbetrieb standardmässig 30 - 50 W/m entzogen, und im Kühlbetrieb können ca. 30 W/m eingespeist werden. Eine temporäre Übernutzung ist möglich, Leistungsspitzen liegen kurzzeitig im Bereich von 100 W/m [2]. Die Bauart wird dominiert von DN 32 – DN 50 Doppel-U-Kunststoffrohren, was Bohrlochdurchmessern von 112-152 mm entspricht, die mit Bentonit-Zement-Wassergemisch ($\lambda=0.85\text{ W/(m}^2\text{K)}$) hinterfüllt werden. Der Betrieb ist geräuschlos und unsichtbar, das System weist eine hohe Verfügbarkeit auf. Die Investitionskosten sind mit 100 CHF/m hoch, bei grösseren Feldern sinken sie in den Bereich von 70 CHF/m. Über die lange Lebensdauer von > 50 Jahren und die gute Effizienz im Betrieb weisen EWS günstige Lebenszykluskosten auf, sodass sich die hohen Investitionen amortisieren lassen.



Oberflächennahe Erdreichnutzung

Für oberflächennahe Erdwärmennutzung sind diverse Wärmeübertragungssysteme im Einsatz, die im Rahmen der Pilotanlage im Kap. 5 detaillierter beschrieben werden. Sie nutzen hauptsächlich die Regeneration des Bodens durch Solarstrahlung und Regen sowie auch allfällig eine Vereisung im Winter. Eine Installation erfolgt unterhalb der Frostgrenze in 1 – 1.5 m Tiefe. Typische Einbautiefen liegen im Bereich von 2 – 10 m für Erdwärmekörbe, Spiralkollektoren und Flächenkollektoren. Typische Entzugsleistungen von Spiralkollektoren und Erdwärmekörben liegen im Bereich von 0.5 – 2 kW pro Einheit. Flächenkollektoren können horizontal – auch in mehreren Schichten – oder vertikal als Grabenkollektor installiert werden, siehe Marktrecherche in Abschnitt 5.1.3, und liegen im Leistungsbereich bis 30 - 40 W/m² bei guten Bodenverhältnissen. Die Entzugsleistung kann je nach Bodeneigenschaften am Standort um bis zu 30% variieren. Bei trockenen Böden kann die Leistung bis auf ca. 15 W/m² absinken. Über die Heizperiode können ca. 60 kWh/m² entzogen werden. Je nach kantonalen Vorschriften können auch oberflächennahe Systeme bewilligungspflichtig sein. Eine genauere Kategorisierung ist im Kap. 5.1.3 für die Pilotanlage gegeben.

4.1.5. Wasser

Grund- und Oberflächenwasser weisen ebenfalls sehr günstige Eigenschaften als Wärmequelle auf, sind aber nicht überall verfügbar und unterliegen teils Schutzvorschriften hinsichtlich der Nutzung (Gewässerschutz), was die Verfügbarkeit weiter einschränkt. Daher ist eine Wassernutzung immer genehmigungspflichtig. Information zur Grundwasserverfügbarkeit und -nutzung können ebenfalls GIS-Systemen entnommen werden. Die Erschliessung der Quelle ist jedoch aufwendig, weshalb die Nutzung teils auch rechtlich durch Mindestleistungen begrenzt wird, da die Verschmutzungsgefahr durch viele kleine Entnahme- bzw. Rückgabestellen steigt. Prinzipiell ist Wasser aufgrund des Temperaturniveaus für einen Heiz- und Kühlbetrieb geeignet, aufgrund von Stimulation eines Wachstums von Mikroorganismen wird aber der Wärmeeintrag aus mikrobiellen Gründen häufig limitiert oder untersagt, während durch die steigenden sommerlichen Gewässertemperaturen ein Wärmeentzug teils sogar erwünscht ist.

Grundwasser

Grundwasser hat über das gesamte Jahr ein nahezu konstantes Temperaturniveau um 10 °C, was eine sehr gute Quellentemperatur bietet. Die Erschliessung erfolgt über zwei Brunnen, einen Entnahme- und einen Rückgabe oder Versickerungsbrunnen. Die Leistung kann durch die Mächtigkeit begrenzt sein, sodass nur ein limitierter Volumenstrom gefördert werden kann. Häufig ist die Ergiebigkeit aber keine Einschränkung, sodass Grundwasser auch aufgrund der aufwendigen Erschliessung vielfach als einzige Wärmequelle genutzt wird. Bei Beschränkung eignet sich Grundwasser aber auch gut als Grundlastquelle für einen Mehrquellenbetrieb. Die Wasserqualität kann durch Infiltration hinsichtlich Sandeintrag, Sauerstoff, Eisen und den pH-Wert beeinflusst werden und ist zu beachten. Beim Filterbrunnen muss ein Sandeintrag verhindert werden. Die notwendige Fördermenge pro [kW] liegt zwischen 150 – 200 l/h. Als Grundlage zur Auslegung von Grundwassernutzung dient die SIA 384/7 [36]. Eine Übersicht kantonaler Bewilligungsverfahren gibt [37].

Oberflächenwasser

Auch Oberflächenwasser bietet grosses Potenzial für Heiz- und Kühlnutzung, wobei allerdings die Gewässerökologie beachtet werden muss. So ist die Kühlnutzung durch die ohnehin zunehmenden sommerlichen Gewässertemperaturen allfällig eingeschränkt. Daher ist die Nutzung bewilligungs- bzw. konzessionspflichtig. Die EAWAG hat eine grundlegende Einschätzung für viele Oberflächengewässer veröffentlicht [38]. Durch höhere saisonale Temperaturschwankungen ist ein monovalenter Betrieb häufig eingeschränkt. Die Nutzung erfolgt üblicherweise mittels eines Zwischenkreises mit Frostschutzmittel, der einerseits das Gewässer vor einer Kältemittelverschmutzung im Schadensfall schützt, andererseits den Verdampfer vor Vereisung bei sehr niedrigen Temperaturen bewahrt. Der Wärmeentzug erfolgt grundsätzlich entweder über ein Register im Fliessgewässer oder einen Filterbrunnen. Durch das Register fliesst eine grosse Wassermenge mit entsprechend niedriger Temperaturdifferenz.



Die Auslegung erfolgt nach der logarithmischen Temperaturdifferenz von 3-6 K bei Fliessgeschwindigkeiten von $> 0.5 \text{ m/s}$, die auch eine Eisbildung verhindert. Notwendige Volumenströme liegen bei 300-400 l/h/kW.

4.1.6. Abwärme

Abwärmenutzung als Wärmequelle steht in Konkurrenz zur vorzugsweisen Direktnutzung. Bei zu niedrigem Temperaturniveau oder fehlender Zugänglichkeit kann eine Quellennutzung die Abwärme nutzbar machen.

Abluft

Abluft bietet meist gute Temperaturpotenziale im Bereich von 20°C und höher, weist aber häufig Begrenzungen hinsichtlich der Abluftmenge bzw. der Volumenströme auf. In Neubauten erfolgt häufig bei balancierter Lüftungsanlage eine passive Rückgewinnung, was das Leistungs- und Temperaturpotenzial für eine nachgeschaltete aktive Wärmequellennutzung stark einschränkt. Abluft kann aufgrund des guten Temperaturniveaus auch direkt zur Regeneration oder Vorwärmung genutzt werden. Bei Nicht-Wohngebäude ist die Nutzung häufig mit Klimatisierungsfunktionen verknüpft, wobei bei der Quellennutzung die sensible und latente Wärme genutzt werden kann. In Hallenbädern steht beispielsweise die Entfeuchtung im Vordergrund.

Abwasser

Abwasser hat je nach Ort der Fassung ein hohes Temperaturniveau im Bereich von $10 - 25^\circ\text{C}$ bei Gebäuden, bei Industrieabwässern sind die Temperaturen prozessbedingt und können deutlich höher liegen. Hausabwasser hat eine begrenzte Menge und fällt unregelmässig an, so dass ein Speicher integriert werden muss. Ohne Reinigung besteht ebenfalls das Problem von Verschmutzungen an Wärmetauscherflächen, weshalb die Wärmetauscher zugänglich sein und regelmässig gereinigt werden müssen.

Hausabwasser

Die energetische Nutzung von Hausabwasser auf dem Grundstück erfordert keine Bewilligung, sollte aber wegen Frostgefahr nicht unter 5°C abgekühlt werden. Je nach Temperatur des Kaltwassers kann mehr Energie als aus dem reinen Warmwasser entzogen werden, aufgrund der Abwasser- und Kaltwassermenge ist das Potenzial jedoch auf Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs begrenzt. Dies kann im Neubau allerdings mehr als der Hälfte der Gesamtwärme entsprechen, was die zweite Quelle wesentlich entlasten kann. Bei Bestandsbauten dominiert jedoch die Raumheizung.

Kanalabwasser

Kanalabwasser hat höhere Volumenströme und benötigt bei begrenzter Wärmeentnahme keinen Speicher. Die Temperaturdifferenz für die Abkühlung kann jedoch durch kantonale Vorgaben und die Prozesse in der nachgeschalteten Abwasserreinigungsanlage (ARA) beschränkt sein. Die Entnahme aus dem Kanal erfolgt über Wärmetauscher. Diese können einerseits direkt in den Kanal oder die Kanalwand integriert sein. Andererseits gibt es aber auch Varianten, bei welchen durch einen Bypass Wasser aus dem Kanal abgezweigt wird, was einen ungestörten Betrieb des Abwasserkanals während der Installation erlaubt. Über einen Zwischenkreis wird die Abwärme zur Wärmepumpe transportiert.

Gereinigtes Abwasser nach der Abwasserreinigungsanlage

Gereinigtes Abwasser aus der ARA wird in einen Vorfluter, also ein natürliches Gewässer eingeleitet. Das gereinigte Abwasser hat typischerweise Temperaturen von $10 - 20^\circ\text{C}$ und ist damit ebenfalls gut als Wärmequelle geeignet. Die Leistung ist von den Betriebsbedingungen der ARA, insbesondere den Abwassermengen abhängig.

Kühlung

Eine weitere Abwärmequellen ist die Abwärme von Kälteanlagen zur Klima- oder Prozesskälteerzeugung. Klimakälte weist einen saisonalen Charakter auf, während Prozesskälte weniger saisonal



geprägt ist. Die Leistungen und Temperaturniveaus hängen stark vom Anwendungsfall und der Anlagengrösse ab.

4.1.7. Aktivierte Bauteile

Als aktivierte Bauteile werden Bauteile von Gebäuden bezeichnet, welche zur energetischen Nutzung zusätzlich aktiviert werden, jedoch primär eine andere Funktion haben.

Energiepfähle

Energiepfähle oder Geostrukturen dienen primär in instabilem Baugrund als Fundationspfähle, womit sich die Energiegewinnung hinsichtlich Umfang und Anordnung nach geologischen und statischen Anforderungen des Gebäudes und Baugrunds richtet. Es werden zwei Bauarten unterschieden: Ramm- und Bohrpfähle. Ramm- und Bohrpfähle sind Betonpfähle, in die Rohre eingegossen sind und die ins Erdreich eingerammt werden. Bei Bohrpfähle werden die Rohrleitung an Armierungskörbe befestigt in ein Bohrloch abgesenkt und mit Beton verfüllt. In den meisten Fällen kommt als Wärmeträger ein Frostschutzgemisch zum Einsatz, bei speziellen Bodenanforderungen kann aber auch Wasser eingesetzt werden. Da Energiepfähle üblicherweise überbaut sind, ist eine technische Regeneration notwendig. Dadurch kann ein Wechsel aus saisonalem Heiz- und Kühlbetrieb Synergien für die Regeneration erschliessen.

Fundamentplatte

Eine Aktivierung der Fundamentplatte kann den Baustoff, klassischerweise Beton, als Zwischenspeicher erschliessen und damit kurzfristige Quellschwankungen durch Speicherung überbrücken. Dies kann sehr günstig bei fluktuierenden Quellen bzw. Quellen mit ausgeprägtem Tagesgang wie solarer Wärme sein, da mit der aktivierten Fundamentplatte ein energetischer Zusatznutzen und Speicherpotenziale erschlossen werden können.

Energiespundwand

Spundwände werden zur Absicherung von Baugruben und als Abdichtung gegen Oberflächenwasser eingesetzt. Die grosse Kontaktfläche zu den umgebenden Medien wie Erdreich und Wasser können gute Voraussetzungen für einen Wärmeentzug oder eine Wärmeabfuhr ergeben, die ähnlich wie bei den Energiepfählen einen Doppelnutzen der ohnehin installierten Spundwand schaffen.

Massivabsorber/Energiezaun

Massivabsorber sind überirdische installierte, aktivierte Strukturen, die primär aus der Aussenluft, aber auch aus absorbierter Solarstrahlung, Kondensation an den Oberflächen, Niederschlägen oder Reif Wärme entziehen. Massivabsorber werden als aktivierte Aussenbauteile wie Mauern, Trennwände, Zäune etc. im Aussenraum installiert und von einem Wärmeträgermedium durchströmt. Wenn keine grosse Kapazität wie bei Betonflächen installiert ist, entspricht das Verhalten Solar-Luft-Absorbern, die jedoch meist vertikal installiert sind. Die Verbreitung ist bisher nicht sehr gross, obwohl auch von namhaften Heizungsherstellern Massivabsorber oder Energiezäune vor allem in Verbindung mit Eisspeichern angeboten werden.

4.1.8. Speicher

Sensible Speicher

Sensible Speicher nutzen die Temperaturänderung eines meist flüssigen Speichermediums, um thermische Energie zu speichern. Aufgrund der sehr hohen Wärmekapazität, guten Verfügbarkeit, geringen Kosten und sonstigen günstigen Eigenschaften, z. B. ungiftig, hygienisch unbedenklich, etc. – hat Wasser eine herausragende Stellung als sensibles Speichermedium von 0-100 °C bei drucklosen Speichern. Andere Feststoffspeicher im Gebäudebereich sind etwa Beton, Stein oder Erdreich unterhalb und in der Umgebung des Gebäudes. Als Quellspeicher werden Wasserspeicher auch häufig als Latent- bzw. Eisspeicher betrieben.

Eisspeicher und Latentspeicher



Eisspeicher sind primär Speicherkomponenten, die als Latentspeicher im Bereich des Phasenwechsels Wasser-Eis höhere Speicherkapazitäten erschliessen. Eine marktgängige Variante sind ebenfalls erdvergrabene Eisspeicher, die auch nennenswert das oberflächennahe Erdreich zur Regeneration über Abtauung des Eises nutzen. Die häufigste Kombination zur Regeneration sind Solarsysteme, es gibt aber auch Beispiele für die Regeneration mit Abluft. Trotz des Anteils latenter Wärme erreichen Eisspeicher bei höheren Leistungen recht grosse Dimensionen.

e-Tank

Ein eTank ist ein unterirdisches Energiespeichersystem in Form eines offenen Erdpufferspeichers, das auf der Unterseite gegen das Erdreich geöffnet und auf allen anderen Seiten gedämmt ist. Damit ist eine Aufnahme von Wärme aus dem Erdreich von unten möglich. Befüllt ist der eTank mit feuchtem Sand. Typische Abmessungen von e-Tanks sind Volumina von 120 m³ mit ca. 100 m² Fläche und 1.2 m Tiefe. Im eTank sind Heizleitungen spiralförmig in drei Schichten mit ca. 30 cm vertikalem Abstand verlegt. Neben der Wärmeaufnahme aus dem Erdreich kann der eTank mit unterschiedlichen Quellen regeneriert werden, sowie über die Heizleitungen die Wärme entzogen werden. Das System wird noch auf der Website des Ingenieurbüros Thermo Techno in Belp erwähnt, die ursprüngliche Website www.etank.de existiert jedoch nicht mehr. Daher ist die Verbreitung des Systems eher gering.

4.2 Planungsgrundlagen von Wärmequellen

Als Ausgangslage für die Planung und Auslegung von Mehrquellensystemen werden im Folgenden die Planungsgrundlagen der einzelnen Quellen zusammengestellt und dadurch die Einzelquellen weiter charakterisiert.

Tabelle 2: Übersicht von Planungsgrundlagen der Wärmequellen (siehe auch Anhang 10.1 und 10.2).

Die Daten beruhen teils auf einzelnen Informationsquellen und werden in Projektverlauf konsolidiert

Wärmeübertragungssystem	Wärmequelle	Abmessung Übertrager	Einbautiefe	Spez. Entzugs-/ Eintragsleistung
Erdwärmesonde	Erdreich	Bohrloch Ø 70 – 185 mm	80 – 400 m	30 – 100 W/m 30 – 100 W/m
Phasenwechselsonde	Erdreich	Ø 60 cm	bis 250 m Pilot: 400-600 m	k.A.
Energiepfähle	Erdreich, Solar	Ø 0.6 m und grösser	10 - 30 m	40 – 85 W/m 20 – 60 W/m
Flächenkollektoren	Erdreich, Solar, Niederschlag	Abstand Rohr 0.2 – 0.8 m	1.2 – 3 m	10 – 40 W/m ² 10 – 40 W/m ²
Spiralkollektoren	Erdreich, Solar, Niederschlag	Ø 520 mm	bis 25 m	200 – 1500 W/ Kollektor
Erdwärmekörbe	Erdreich, Solar, Niederschlag	Ø 0.9 – 4 m	1.5 – 5 m	500–2000 W/Erdkorb
Eisspeicher	Erdreich, Solar	Ø 2.7 und Sonderanfertigung	Bis 10 m tief	4 – 18 kW 3.5 – 7 kW
Brunnen	Grundwasser	>Ø 0.6 m Schacht Ø 0.25-0.3 m Filterrohr	10 – 200 m	500 – 600 W/(m ³ /h)
Übertragungssysteme für Seen, Flüsse, Gewässer	Oberflächenwasser	1.1 m x 1.1 m	3 – 30 m tief	6 – 15 kW/Einheit 6 – 26 kW/Einheit
Abwasserwärmeübertrager	Abwasser	1 m x 0.65 m	im Kanal	350 – 1800 W/m ²
Solar-Luft-Absorber	Luft, Solar	2 m ² /Kollektor	Aufdachinstallation/ Aussenaufstellung	< 60 W/m ² Luft < 600 W/m ² solar
Abluft-Wärmetauscher	Abluft	nach Leistung	Innenaufstellung Aussenaufstellung	≈10 W/m ³ /h @ ΔT=20 K
Luft-Wärmepumpe	Luft	nach Leistung	Innenaufstellung Aussenaufstellung Split-Gerät Dachinstallation	≈5 W/m ³ /h @ ΔT=10 K

Legende: Rot – Wärmeentzug aus der Quelle, Blau – Wärmeeinspeisung in die Quelle (bei Differenz)



Tabelle 2 fasst wesentlich Eigenschaften der Einzelquellen auf Basis von [39] zusammen. In diesem Kapitel wird eine vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Quellen gegenübergestellt. Die Planungsgrundlagen für die gängigsten Wärmequellen sind als Factsheets im Anhang zusammengestellt. Neuere Wärmequellen wie aktivierte Bauteile (z.B. Fundamentplatte) werden im Projekt weiter untersucht. Die Planungsgrundlagen werden im Rahmen eines Herstellerworkshops weiter diskutiert und im Lauf des Projekts für ausgewählte Systeme auf Planungsgrundlagen für den Mehrquelleneinsatz erweitert. Die Factsheets können nach Abschluss des Projekts auch separat zur Verfügung gestellt werden.

Das Ergebnis der Markt- und Literaturrecherche hinsichtlich des Mehrquelleneinsatzes zeigt, dass bisher kaum Planungsgrundlagen für den Mehrquellenbetrieb vorliegen. Diese Lücke versucht dieses Projekt so weit wie möglich über Simulation und die P&D Anlage zu schliessen. Die verfügbaren Planungsdaten beziehen sich auf einen Betrieb als Einzelquelle, was wesentlich längere Volllaststunden für den Quellenbetrieb von 1800 h bis 2400 h zur Folge hat, was sich zum Beispiel auf Regeneration der Quellen oder Abstände von Wärmeübertragern bei Erdwärmesonden oder Erdkollektoren auswirken kann. Im Mehrquellenbetrieb werden aber beispielsweise beim Spitzenlastbetrieb oder beim Regenerationsbetrieb deutlich geringere Volllaststunden erreicht, was auf Leistung, Energieentzug bzw. -eintrag sowie Temperaturniveaus aus der Quelle einen gravierenden Einfluss haben und Grund für Synergien sein kann, die Mehrquellensysteme in der Kombination effizienter und kostengünstiger machen können als Einzelquellen, insbesondere im höheren Leistungsbereich.

So können beispielsweise kurzfristig aus dem Erdreich deutlich höhere Leistungsspitzen als im langfristigen Dauerbetrieb entzogen und damit Spitzen abgedeckt werden, wenn im Anschluss lange Regenerationsphasen folgen [2]. Dies ist der Grund für die in Abbildung 1 dargestellte überproportionale Reduktion der Erdreichquelle bei Spitzenlastbetrieb.

Gerade diese Synergien bei Mehrquellenbetrieb können sehr wirkungsvoll sein, um Quelleneinschränkung zu entschärfen oder ganz zu umgehen und damit einen monovalenten Wärmepumpenbetrieb ohne Zusatzheizung trotz Quellenbeschränkungen der Einzelquellen zu ermöglichen. Diese Synergieeffekte sind in den Planungsdaten für monovalenten Quellenbetrieb jedoch nicht enthalten und werden in diesem Projekt anhand von Simulationen und Feldmessungen untersucht. In diesem Kapitel wird ein Überblick der Planungsgrundlagen gegeben, während weitere Details in den Factsheets im Anhang zu finden sind.

Zu den Planungsgrundlagen kommen Standortbedingungen und weitere Randbedingungen der Quellen hinzu, die die spezifische Nutzung der natürlichen Umgebung sowie weitere Eigenschaften der Quelle umfassen und bei der Planung berücksichtigt werden müssen bzw. Einschränkungen darstellen können. Dies sind zunächst die klimatischen Randbedingungen wie Aussenlufttemperatur und -feuchte, solare Einstrahlbedingungen sowie die geologischen Eigenschaften des Standorts wie Bodeneigenschaften (Bodenfeuchte, Schichtaufbau mit Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Kapazität der Schichten sowie Vorliegen von kritischen Schichten bzw. Bohrrisiken, Grundwasserniveaus, geothermischer Wärmestrom, Grund-/Trinkwassernutzung, vorhandene Erdwärmesonden und gegenseitige Beeinflussung der Sonden/Nachbarsonden. Die Systemwahl bedingt weiterhin Kriterien der Überbaubarkeit, des Flächenbedarfs bzw. der erforderlichen Freifläche, einzuhaltender Grenzabstände sowie Abteuf- und Einbautiefen. Weitere Standortfaktoren beziehen sich auf das Gebäude hinsichtlich Dachflächen, Dachlasten, Orientierung und Verschattung sowie Auflagen des Denkmalschutzes. Weiterhin können Zusatzsysteme für die Regeneration von Quellen oder Speicherkomponenten oder auch redundante Systeme eine Rolle spielen.

4.3 Einschränkungen von Wärmequellen

Jede Wärmequelle hat ihre spezifischen Vorteile und Einschränkungen. Dieser Satz gilt sicher insbesondere im städtischen Umfeld, da zum einen besonders in dicht bebauten Gebieten Einschränkungen von Wärmequellen auftreten, in denen die natürliche Umgebung Luft, Erdreich oder Wasser nur beschränkt verfügbar sind. Zum anderen verursacht ein städtisches Umfeld weitere Randbedingungen, die die Erschliessung bzw. Zugänglichkeit von Wärmequellen erschweren, einschränken oder ganz verhindern. Zusätzliche Herausforderungen treten hinzu, wenn weitere Auflagen hinsichtlich Lärmschutz, Dachlasten, Verschattung, Denkmalschutz etc. zu erfüllen sind und hohe Leistungen durch die Grösse



des Gebäudes oder einen energetisch mässigen Gebäudestandard erforderlich sind. Daher ist es sinnvoll, zunächst die Eigenschaften und spezifischen Einschränkungen der einzelnen Wärmequellen zu betrachten bzw. ähnliches Quellenverhalten herauszuarbeiten, denn eine Quellenkombination ist dann besonders sinnvoll, wenn die Einschränkungen der einen Quelle durch die andere Quelle (über-)kompensiert werden können.

Falls die Einschränkungen auch für Mehrquellensysteme zu gross werden, besteht noch die Möglichkeit, eine weiter entfernte Quelle über ein Netz zur Anwendung zu transportieren, z. B. in Form eines Anergienetzes.

Tabelle 3 gibt einen Überblick der wichtigsten Einschränkungen von gängigen Wärmequellen. Im Anhang 10.3 sind weitere Kriterien für die einzelnen Quellen hinsichtlich deren Relevanz für die jeweilige Wärmequelle aufgeführt.

Tabelle 3: Übersicht von Einschränkungen gängiger Wärmequellen (siehe auch Anhang 10.310.2)

Quellen-Restriktion	Luft	Solar-Luft	Erdreich	Grundwasser	Abwärme Luft/Wasser	Kühlung
<i>Leistung</i>	• Temperatur-niveau	• Temperatur-niveau • Einstrahlung	• Platz-/ Tiefen-beschränkung • Bodeneigen-schaften • Nachbar-schaftliche Nutzung	• Mächtigkeit • Volumenstrom • Abkühlung	• Temperatur-niveau • Menge • Abkühlung	• Kühlbedarf
<i>Saisonalität</i>	• ausgeprägt	• ausgeprägt	• gering • (mittel für oberflächennähe)	• gering	• gering	• Klimakälte: hoch • Prozess-kälte: gering
<i>Speicher-fähigkeit</i>	• keine	• keine	• ausgeprägt	• mittel	• Abluft: keine • bei Hausab-wasser: Speicher-Integration	• keine
<i>Bauliche Einschränkung</i>	• Bei Dach-installation: Dachlast	• Dachfläche, Gebäude-ausrichtung, Verschattung	• Verfügbarer Platz (Grund-stücksgrösse), • Grenz-abstände • nachbarliche Beeinflussung • Zugang Bohrgerät	• Verfügbarer Platz (Grundstücks-grösse),	• Abluft: Platz für Lüftungs-system • Abwasser: Speicher-integration	• Kühlsystem
<i>Erschlies-sungs-kosten</i>	• Gering	• Gering	• Hoch	• Hoch	• Mittel	• Gering
<i>Recht-liches</i>	• Lärmschutz	• Denkmal-schutz	• Geologie • Gewässer-schutz	• Mindest-leistung (kantonale) • Genehmigung • Konzession	• Keine	• Bedarfs-nachweis

Im Projekt HP Source wurden diejenigen Kombinationen als günstig identifiziert, die eine speicherfähige Quelle mit einer leistungs- bzw. energiebegrenzten Quelle bzw. saisonal sehr unterschiedlichen Quellen kombiniert, da damit die Möglichkeit einer sommerlichen Regeneration und einer winterlichen Leistungserhöhung/Leistungsaufteilung realisiert werden kann. Dies wurde im Projekt HP Source intensiv an der Kombination Luft mit Erdwärmesonden untersucht, lässt sich aber auch auf andere Kombinationen der Kategorien in blau und gelb in Abbildung 2 übertragen. So ist eine bereits etablierte Kombination für die Regeneration von EWS die Nutzung von Solarabsorber bzw. Kollektoren, die in sich schon ein Mehrquellensystem darstellen, da je nach Ausführung sowohl die Solarstrahlung als auch die Aussenluft als Quelle genutzt werden können. Die Kombination hat sich im Projekt auch wirtschaftlich als sehr günstig erwiesen, da durch die Regeneration Dimensionierungsvorteile entstehen, die die Kosten der Regenerationsquelle refinanzieren und sogar überkompensieren können.



4.3.1. Kombinationen von Wärmequellen

Vorteilhafte Kombinationen für Mehrquellsysteme ergeben sich, wenn die in Tabelle 3 genannten Einschränkungen durch den Einsatz einer zweiten Quelle kompensiert oder sogar überkompensiert werden. Dies gilt sowohl hinsichtlich technischer, ökologischer und ökonomischer sowie rechtlicher Limitierungen. Abbildung 2 zeigt eine Systematisierung der Quellen hinsichtlich Synergien erweitert nach [3].

Durch diese Synergien kann dann ein technisch effizienteres, ökologisch weniger belastendes und auch wirtschaftlich vorteilhaftes Mehrquellsystem entstehen, dass allfällig auch ohne Einschränkungen eine einzelne Quelle übertrifft.

Dafür sind gegebenenfalls auch gewisse Zusatzkosten für die Integration gerechtfertigt, wenn dadurch etwa ein monovalenter Wärmepumpenbetrieb mit einer besseren Performance und ökologischen Vorteilen erreicht werden kann. Die Betrachtung des Netto-Null-Ziels, in welchem alle noch anfallenden Emissionen über Negativ-Emissionen kompensiert werden müssen, erlaubt aus der Perspektive des gesamten Energiesystems keinen Spielraum, für den Gebäudebetrieb noch CO₂-Emissionen zuzulassen. Je grösser allerdings die gesamte Leistung ist, desto kostenintensiver kann auch eine einzelne Quelle werden, so dass bei höheren Leistungen und wirtschaftlichen Synergiepotenzialen sogar das Mehrquellsystem kostengünstiger als die Einzelquelle werden kann.

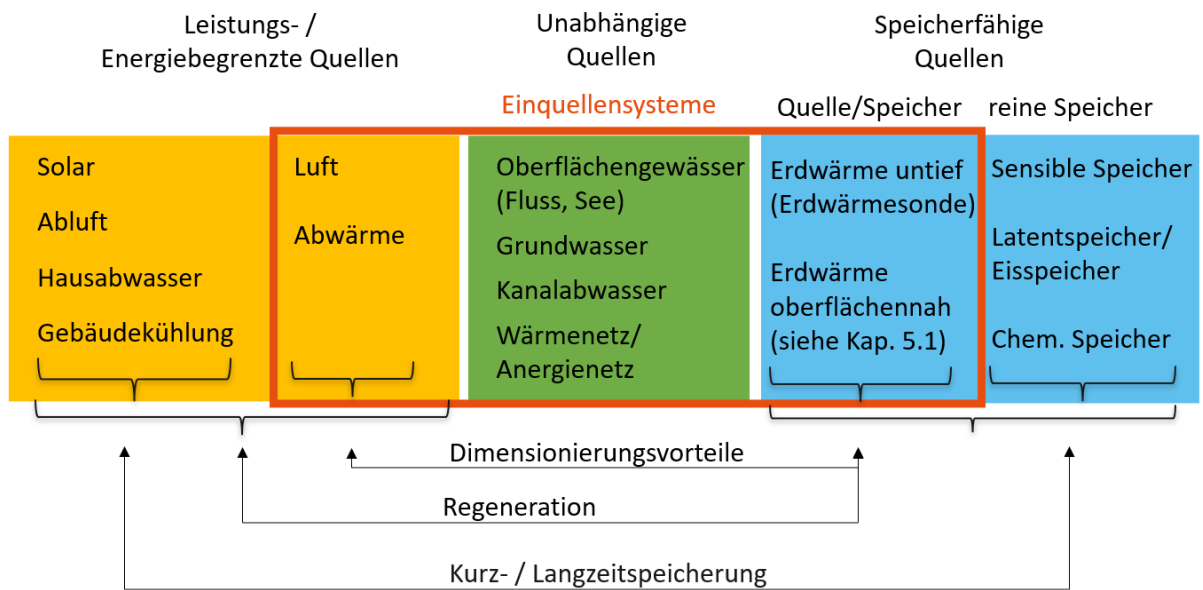


Abbildung 2: Systematisierung von Wärmequellen nach grundlegenden Eigenschaften für die Kombination

Kombination einer leistungs-/energiebegrenzten Quelle mit einer speicherfähigen Quelle (Leistungsbegrenzung - L)

Diese Kombination wird wegen ihrer Vorteilhaftigkeit heute schon häufiger eingesetzt, da die speicherbare Quelle durch die nicht speicherbare Quelle regeneriert werden kann. Ein häufig umgesetztes Beispiel wäre die Kombination eines Erdsondenfeldes mit einer solaren Regeneration. Als weitere Regenerationsquellen können Luft, Oberflächenwasser sowie Abwärme eingesetzt werden. Durch die Regeneration können insbesondere bei grösseren und kompakten Erdsondenfeldern Dimensionierungsvorteile genutzt werden, so dass sich trotz Investitionen in die Regenerationsquelle die Gesamtkosten verringern. Wie in HP Source gezeigt, kann eine Regeneration schon ab 100 kW Heizleistung die Gesamtkosten senken.

Beispiele: *Erdreich und Luft (Spitze, Regeneration)*, *Luft und Erdreich (Spitze)*, *Luft und Grundwasser (Spitze)*, *Luft und Abwasserabwärme*, *Luft und Eisspeicher*



Kombination ausgeprägt saisonaler mit Wärmequellen hoher winterlicher Quellentemperatur (Saisonalität - S)

Die Saisonalität beschreibt die saisonal bedingte Einschränkung, dass gerade bei den höchsten Heizlasten die Quelle vom Leistungsentzug oder Temperaturniveau her begrenzt ist, während zu Zeiten geringerer Heizlasten bessere Leistungs- und Temperaturbedingungen vorliegen. Dies ist bei Aussenluft und Solarstrahlung der Fall, die eine starke Saisonalität aufweisen.

Eine Kombination mit Quellen, die nur eine geringe Saisonalität aufweisen, kann den Winterbetrieb der saisonalen Quellen unterstützen bzw. ganz übernehmen, so dass die Nachteile der saisonalen Einschränkungen des Temperaturniveaus oder Leistungsbegrenzungen entschärft oder ganz vermieden werden können. Bei einer Teilabdeckung können beide Quellen kleiner dimensioniert werden, was Einschränkungen weiter entschärfen kann.

Beispiele: Luft und Erdreich (Spitze), Luft und Grundwasser (Spitze), Luft und Abwärme (Spitze), Luft und Eisspeicher, Solar und Eisspeicher

Kombination von lauter mit leiser Wärmequelle (Lärmeinschränkung - LÄ)

Luft ist mit einem Anteil von ca. 75 % die in der Schweiz bei weitem am häufigsten eingesetzte Wärmequelle. Eine wesentliche Einschränkung besteht bei Luft aber in den Lärmschutzanforderungen, deren Erfüllung für die Installation explizit nachgewiesen werden muss. Anstelle von Investitionen in den Lärmschutz kann eine Entschärfung auch durch Integration einer leisen Wärmequelle erfolgen. Die lärmintensive Luftquelle kann kleiner dimensioniert werden, was häufig mit einer Lärmreduktion einhergeht, wenn eine leise Quelle zugeschaltet werden kann.

Beispiele: Luft und Abluft, Luft und Solar-Luftabsorber, Luft und Erdreich

Kombination von flächiger Wärmequelle mit platzsparender Wärmequelle (Platzbedarf - P)

Bei flächigen Wärmequellen wie Erdwärmesonden, oberflächennaher Erdwärme sowie Solarthermie können bei grösseren Leistungen Platzbeschränkungen, Tiefenbeschränkungen oder optische (Denkmalschutz, Ortsbild) bzw. technische Einschränkungen (Dachlasten) auftreten. Eine Kombination mit einer platzsparenden Quelle wie Luft, Abwärme oder Grundwasser kann die Einschränkungen entschärfen.

Beispiele: Luft und Erdreich (Spitze), Solarkollektor und Luft (Spitze)

Kombination einer saisonalen mit einer speicherbaren Wärmequelle (Regeneration - R)

Gute Synergien ergeben sich zwischen saisonalen und speicherbaren Quellen, die durch die Speicherefähigkeit die Saisonalität ausgleichen kann und bei kalten Temperaturen oder geringer Einstrahlung zugeschaltet werden kann.

Beispiele: Erdreich und Luft (Regeneration), Eisspeicher und Solarkollektor (Regeneration)

Kombination von Wärmequellen unterschiedlicher Temperaturniveaus (Temperaturniveau - T)

Zur Steigerung der Performance kann die Quelle mit dem jeweils besseren Temperaturniveau prioritär genutzt werden, was die Performance verbessern kann. Bei saisonalen Quellen kann so der gute Sommerbetrieb genutzt und der mässige Winterbetrieb entschärft werden.

Beispiele: Luft/Solar und Erdreich, Luft/Solar und Grundwasser

Kombination von Wärmequellen mit unterschiedlichen Kosten (Investition - I)

Eine wirtschaftliche Verbesserung kann durch Nutzung von günstig zu erschliessenden Wärmequellen und kostengünstig zu betreibenden Wärmquellen erfolgen. Häufig werden jedoch hauptsächlich die Investitionen für die Erschliessung betrachtet, bei langen Lebensdauern können aber die Lebenszykluskosten ein anderes Bild ergeben. So sind Erdwärmesondenanlagen im Lebenszyklus durch die niedrigeren Betriebskosten und die lange Lebensdauer oft wirtschaftlicher als Aussenluft. Trotzdem hat die Wärmequelle Aussenluft die höheren Marktanteile. Wirtschaftliche Vorteile können durch Kombination von kostengünstigen mit kostenintensiveren Quellen entstehen. Dabei können für die Integration von zwei Wärmequellen zusätzliche Kosten entstehen, die aber allfällig von den wirtschaftlichen Vorteilen



überkompensiert werden können. Im Projekt HP Source [3] wurden beispielsweise Kosteneinsparungen bei grösseren Erdsondenfelder durch Regeneration oder Spitzendeckung mit einer zweiten Quelle ausgewertet.

Beispiele: Luft/Abluft und Erdreich, Solar und Erdreich/Eisspeicher

Kombination von beschränkter mit nicht beschränkter Wärmequelle (Energiebeschränkung - E)

Dies ist ein naheliegender Fall, wenn über eine alleinige Quelle durch Einschränkungen nicht genügend Quellenwärme sichergestellt werden kann. Typische Limitierungen bestehen bei häuslichem Abwasser und Abluft, die nur einen Teil der Quellenanforderung abdecken können, so dass eine zweite Quelle integriert werden muss. Da Abluft und Abwasser oft ganzjährig mit gutem Temperaturniveau zur Verfügung stehen, werden sie häufig als Grundlastquelle genutzt, allfällig separiert nach Gebäudedienstleistung, also als Grundlastquelle für den Warmwasserbetrieb, wobei der Heizbetrieb aus einer weiteren Quelle bereitgestellt wird. Leistungsbeschränkungen können aber auch bei anderen Quellen auftreten, z. B. im höheren Leistungsbereich bei Grund- oder Oberflächenwasser, wenn nur ein limitierter Volumenstrom gefördert werden kann bzw. eine Konzession für einen begrenzten Volumenstrom oder begrenzten Leistungsentzug besteht.

Beispiele: Luft mit Abluft, Luft mit Abwasser, Luft mit Abwärme, Luft und Grundwasser

Kombination von rechtlich beschränkten mit unbeschränkten Wärmequellen (Vorschriften - V)

Die meisten Wärmequellen unterliegen rechtlichen Anforderungen, durch die Leistungseinschränkungen für die Wärmequelle entstehen können. Mit Integration einer zweiten Wärmequelle können diese rechtlich bedingten Leistungseinschränkungen überwunden werden, da die zusätzlich erforderliche Leistung von anderen rechtlichen Einschränkungen betroffen ist.

Beispiele: Luft (Lärmschutz) und Solar (Denkmalschutz), Wasser (Gewässerschutz) mit Erdreich (Geologische Einschränkung)

4.3.2. Bewertung von Integrationsoptionen

In Hinblick auf eine systematische Auswertung von vorteilhaften Integrationsmöglichkeiten von Wärmequellen ist eine Matrixdarstellung gewählt worden, die mit einem Farbcode die Vorteilhaftigkeit einer Integration von jeweils zwei Wärmequellen angibt. Dabei fungieren in der Arbeitsversion, die noch work-in-progress ist, die Spalten als primäre Quelle, und die Zeilen als sekundäre Quellen. Die Matrix dient als Arbeitsinstrument zur Charakterisierung von Mehrquellensystemen. Die Einschätzung wird im Laufe des Projekts weiterentwickelt werden und die Auswahl der näher zu untersuchenden Quellenkombinationen unterstützen. Eine Zuordnung anhand der in Kap. 5.4 angegebenen Kriterien ist in Anhang 10.3 enthalten.

Tabelle 4: Arbeitsinstrument zur qualitativen Bewertung der Quellenkombination (siehe auch Anhang 10.4)

		Primäre Quelle							Eigenschaften
		Luft	Solar	Erdreich	Wasser	Abluft	Abwasser	Abwärme/ Geb.kühlung	
Sekundäre Quelle	Luft		Leistung/ Verfügbarkeit	Regeneration/ Sommer	Spitzenlast/ Sommer	Leistung	Leistung	Leistung	primäre Quelle/ Temperaturerhöhung
	Solar	Sommer	Serielle Verschaltung PVT-Kollektor	Regeneration/ Sommer	Sommer	Sommer	Sommer	Sommer	Primär mit Speicher Zusatzquelle Regeneration Sommerbetrieb
	Erdreich	Spitzendeckung	Leistung/RG	Sonde/ Register	Leistung	Leistung	Leistung	Regeneration	primäre Quelle/ Spitzendeckung
	Wasser	Spitzendeckung	Leistung/RG	Regeneration Winter	Oberflächen-/ Grundwasser	Leistung	Leistung	Sommer	primäre Quelle Grundlast
	Abluft	Quellenspeicher	Zusatzquelle/ Quellenspeicher	Zusatzquelle/QS Regeneration	Leistung		Zusatzquelle	Leistung	Teilprimäre Quelle sekundäre Quelle/WRG? Regeneration
	Abwasser	Quellenspeicher	Zusatzquelle Quellenspeicher	Zusatzquelle/QS Regeneration Winter	Leistung	Leistung		Leistung	sekundäre Quelle Regeneration
	Abwärme/ Geb. Kühl.	Quellenspeicher	Zusatzquelle Quellenspeicher	Zusatzquelle/QS Regeneration	Leistung	Leistung	Leistung	Anergienetz	primäre Quelle Regeneration
Integration		Quellenspeicher Grundlast/Spitze	Quellenspeicher Regeneration	Primäre Quelle Spitzendeckung	Grundlast Parallel mit 2. Quelle	Grundlast Parallel mit 2. Quelle	Grundlast Parallel mit 2. Quelle	Quellenspeicher Parallel mit 2. Quelle	



4.4 Hydraulische Integration von Wärmequellen

Prinzipiell kann die Integration von Mehrquellensystemen auf Quellen- und auf Senkenseite erfolgen.

4.4.1. Quellenintegration mit Zwischenkreis

Ein Zwischenkreis bietet die Unabhängigkeit von einer direkten Kopplung der Quelle mit der Verdampfung und kann so mehrere Quellen miteinander kombinieren. Nachteil ist, dass der Zwischenkreis einen zusätzlichen Wärmeübergang und damit eine zusätzliche Temperaturdifferenz impliziert und damit die Effizienz der Quelle bzw. des Wärmepumpenbetriebs vermindert. Weiterhin werden durch den Quellenkreis allfällig unterschiedlichen Temperaturniveaus der einzelnen Quellen gemischt, wodurch die Effizienz durch Exergieverluste der Mischung vermindert wird. Allfällig steigen der hydraulische Energieaufwand und die Kosten durch mehr notwendige Komponenten. Ein weiterer Nachteil ist, insbesondere bei der Nutzung von Luft, dass ein Wärmetauscher von Luft auf Sole bei gleicher Leistung grösser ist als ein Direktverdampfer. Trotzdem stellt ein Zwischenkreis eine günstige Möglichkeit zur Integration von Wärmequellen dar, da er eine Interaktion zwischen den Quellen ermöglicht, was zu Synergien führen kann, vor allem durch Regeneration einer speicherbaren Quelle. Weitere Interaktion kann der Einsatz des Quellenkreises zur Abtauung sein, was energetische Nachteile und höhere Kosten durch effizienteren Betrieb kompensieren kann. Zudem steht für die Einkopplung von Luft eine breite Palette an marktgängigen Sole-Luft-Wärmetauscher aus industriellen Anwendungen zur Verfügung, was die Lärmprobleme entschärfen kann.

4.4.2. Quellenintegration mit Quellspeicher

Ein Quellspeicher kann ebenfalls unterschiedliche Quellen integrieren und hat zusätzlich eine Temperatur- und Leistungsausgleichsfunktion sowie die Funktion einer hydraulischen Entkopplung von Quellen- und Verdampferkreis. Ein parallelgeschalteter Speicher kann sowohl einen Direktbetrieb aus der Quelle wie auch eine Entkopplung ermöglichen. Ein Quellspeicher kann allfällig auch für die Regeneration eingesetzt werden. Für die Multiplizierbarkeit von Mehrquellensystemen kann eine Systemtrennung zwischen dem Mehrquellensystem und dem Wärmepumpenbetrieb günstig sein, so dass das Mehrquellensystem mit Standardwärmepumpen integriert werden kann. Diese kann zu einer separaten Steuer-/Regelung des Quellenkreises ausgebaut werden, welche das Speichermanagement leistet. Nachteilig sind der grössere Platzbedarf und die höheren Kosten eines Quellspeichers aufgrund der aufwendigeren Isolation (Kondensationsgefahr).

4.4.3. Wärmepumpenkaskadierung und Integration mit oder ohne Senkenspeicher

Eine Wärmepumpenkaskadierung ermöglicht einen Betrieb mit unterschiedlichen Wärmequellen ohne einen Zwischenkreis, was günstigere Temperaturbedingungen für die einzelnen Quellen ermöglicht, da der zusätzliche Wärmeübergang vermieden wird und z. B. bei einer Aussenluftquelle eine Direktverdampfung umgesetzt werden kann. Des Weiteren kann das Zu- und Abschalten der einzelnen Wärmepumpen in der Kaskadierung zur Leistungsregelung beitragen und ein Umschalten zwischen den Wärmepumpen die Lebensdauer verlängern. Eine Leistungsregelung kann bei optimaler Dimensionierung fast über den gesamten Leistungsbereich erfolgen, da die einzelnen Inverter bereits einen Regelbereich von 100 % bis ca. 30 % umfassen. Zudem ist eine räumliche Trennung der unterschiedlichen Wärmepumpen abhängig von der Quelle möglich, z. B. eine Verteilung auf zwei oder mehrere Häuser. Bei höheren Leistungen wird bereits heute häufig kaskadiert und die Leistung auf mehrere Wärmepumpen bzw. Verdichter oder Kältekreise verteilt. Nachteilig sind die allfällig höheren Kosten für die separaten Wärmepumpen und die Regelung für die Kaskadierung, die häufig über einen Master – Slave Betrieb umgesetzt wird. Zudem ist keine Interaktion zwischen den Quellen möglich, was einen «passiven» Regenerationsbetrieb der einen Quelle aus der anderen Quelle ausschliesst, da keine Integration auf Quellenseite vorliegt. Allerdings besteht die Möglichkeit einer «aktiven» Regeneration mit der Wärmepumpe, wenn beispielsweise im Sommer PV-Überschussstrom vorliegt.



4.4.4. Integration mit Anergienetz (Gebäudecluster und Areal-/Quartiersebene)

Auf Arealebene wird der Zwischenkreis zum Beispiel durch ein Anergienetz umgesetzt, das ermöglicht, Wärmequellen zu Gebieten eines Areals oder Quartiers zu transportieren, die keinen Zugang zu ausreichenden Wärmequellen oder günstigen Temperaturniveaus haben. Häufig sind auch Kurzzeit- oder saisonale Speicher in ein Anergienetz integriert, die die Netztemperatur und Leistung regulieren können, wobei häufig eine relativ konstante Netztemperatur mit allfällig saisonalen Übergängen angestrebt wird, z. B. 10 °C für den Heizbetrieb und 15 °C für den Kühlbetrieb, so dass ein Direktkühlbetrieb aus dem Netz möglich ist. Bei einer Überhitzung der Netze, also einer höheren Wärmeeinkopplung als Wärmeentzug im Sommerbetrieb, kann ein aktiver Kühlbetrieb mit Rückkühlung ins Netz oder eine Rückkühlung des Netzes umgesetzt werden. Günstiger ist aber ein Lastausgleich über das Netz, wenn z. B. ähnlich viel Wärme für den Warmwasserbetrieb entzogen, wie durch den Kühlbetrieb eingekoppelt wird.

4.5 Integrationsstrategien

Im Projekt HP Source wurden unterschiedliche Integrationsstrategien entwickelt, die hier als Übersicht hinsichtlich ihrer wichtigsten Eigenschaften nochmal aufgenommen werden. Für die jeweiligen Integrationsstrategien werden jeweils Beispiele von Quellenintegrationen angegeben.

4.5.1. Spitzenlastdeckung

Eine Spitzenlastdeckung ermöglicht es, die Quellen deutlich kleiner zu dimensionieren, da entsprechend der Summenhäufigkeit des Heizleistungsbedarfs die Spitzenleistung nur über einen kurzen Zeitraum auftritt. Wird dieser temporär erhöhte Leistungsbedarf durch (eine) weitere Quelle(n) gedeckt, können beide Quellen auf geringere Leistung dimensioniert werden. Dadurch können Leistungsbegrenzungen von Quellen durch Standorteinschränkungen und rechtliche Einschränkungen wie Lärmschutz, Platz- bzw. Flächenbeschränkungen, nachbarliche Nutzungen etc. entschärft werden. Wenn als Spitzenlast eine Quelle mit geringer Saisonalität eingesetzt werden, können auch saisonale Einschränkungen abgemindert werden, was die Performance erhöht. Im Projekt HP Source konnte gezeigt werden, dass bei Erdsondenfeldern sogar überproportionale Dimensionierungsvorteile auftreten, wenn das Erdreich nur temporär genutzt wird, da kurzzeitig hohe Leistungen entzogen werden können, wenn gesamthaft über die Jahresperiode nur ein geringer Energieentzug für die Leistungsspitze auftritt und lange Regenerationszeiten bestehen.

4.5.2. Regeneration

Regeneration integriert eine speicherfähige Quelle mit einer Regenerationsquellen. Durch die Regeneration können ebenfalls Dimensionierungsvorteile erschlossen werden, da der gesamte Speicher auf höherem Temperatur-/Leistungsniveau gehalten wird. Dies bezieht sich bei Erdsonden auf die geringere natürliche Regeneration von Sonden mit geringerem Abstand bzw. abgeschirmten inneren Sonden in kompakten rechteckigen Feldern. Beim Eisspeicher kann der Phasenwechsel durch Regeneration über längere Zeiten genutzt werden. Mit Regeneration kann der Platzbedarf der speicherfähigen Quelle deutlich reduziert werden und durch Übernahme des Sommerbetriebs durch die zweite Quelle die Betriebszeit der speicherfähigen Quelle weiter entlastet und saisonal verschoben werden.

4.5.3. Grundlastbetrieb

Die Integration eines Grundlastbetriebs bietet sich für eine leistungsbegrenzte, konstant anfallende Quelle an, die nicht die gesamte Leistung bereitstellen kann. Dadurch kann die zweite Wärmequelle entlastet werden. Typische Beispiele für einen Grundlastbetrieb sind konstant anfallende Wärmequellen wie Abluft und Abwasser. Abwasser kann ungefähr die Quellenleistung für den Warmwasserbetrieb bereitstellen, was in bestehenden Gebäuden nur ca. 20 % des Energieverbrauchs abdeckt, aber ganzjährig eine gute Quellentemperatur liefert. In Neubauten kann der Warmwasserwärmeenergieanteil hingegen über 50 % betragen.



Abluftnutzung steht in Neubauten mit einer passiven Wärmerückgewinnung in Konkurrenz, sodass eine Nutzung nach einer passiven Wärmerückgewinnung bei begrenztem hygienisch notwendigen Luftvolumenströmen nur eine begrenzte Leistung von ca. $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ bei relativ niedrigen Quellentemperaturen bereitstellen kann. Bei reinen Abluftanlage ohne passive Wärmerückgewinnung besteht hingegen ein deutlich höheres Leistungs- und Temperaturpotential, was insbesondere für sanierte Bestandsbauten interessant ist.

4.5.4. Quellenvorwärmung

Eine Vorwärmung der Wärmequellen mit einer vorgeschalteten weiteren Quelle kann gerade bei Wärmequellen mit höherer Temperaturvariation und Saisonalität eine Temperatur- und damit Effizienz-erhöhung sowie zu einer Leistungserhöhung bei niedrigen Aussentemperaturverhältnissen führen. An sehr kalten Standorten, etwa in den Bergen, kann die Vorwärmung den Wärmepumpenbetrieb erst ermöglichen. Wenn die Vorwärmung nur temporär zur Verfügung steht, kann für einen kontinuierlichen Betrieb ein Quellspeicher integriert werden.



5 Pilotanlage

Die Pilotanlage wird in Zusammenarbeit mit Liegenschaften Stadt Zürich ausgeführt und im Pilotprogramm des Kantons Zürich, das vom AWEL Zürich verwaltet wird, gefördert. Im Pilotprojekt soll eine Mehrquellen-Wärmepumpenanwendung praktisch untersucht und als Best-Practice Anwendung dokumentiert werden. Wegen der bestehenden Mehrquellen-P&D-Anlage im Projekt RenoSource [2] wird ein Pilotobjekt und eine Wärmequellenkombination gewählt, die keine vertikalen Erdwärmesondenbohrungen umfasst, als Systemlösung für Anwendungen, wenn keine Erdsonden gebohrt werden können. Aufgrund der vorteilhaften Synergie der Kombination aus Luft- und Erdreich wird der Einsatz der Wärmequellen mit oberflächennahen Erdwärmekollektoren in Verbindung mit Aussenluft ausgewertet.

5.1 Literatur- und Marktüberblick zu Erdkollektoren

Erdkollektoren sind in der Schweiz bisher nicht sehr verbreitet, da im monovalenten Betrieb grosse Flächen benötigt werden und in der Schweiz Grundstücksflächen eher begrenzt und teuer sind. In den Nachbarländern wie Österreich oder Deutschland ist die Verbreitung höher. Im Folgenden wird ein Literatur- und Marktüberblick von verfügbaren Systemen und Erkenntnissen gegeben. Bei Einsatz in Mehrquellensystemen kann die notwendige Fläche allfällig deutlich reduziert werden, womit das System auch in der Schweiz interessant sein könnte.

5.1.1. Literaturüberblick

Ramming [40] untersucht in seiner Dissertation die Nutzung von Erdwärmekollektoren anhand von numerischen Simulationen. Das in der Dissertation entwickelte Simulationsmodell stellt u. a. eine Grundlage für ein in TRNSYS verwendetes Modell dar, siehe Kap. 5.5.

Als Spezialfall wurde die Verwendung von horizontalen Kollektoren als Spitzenlastquelle in Kombination mit Luft als Grundlastquelle untersucht. Die beiden Quellen werden alternativ genutzt, d.h. bei kalten Aussentemperaturen wird die volle Leistung mit dem Erdkollektor bereitgestellt, um höhere Quellentemperaturen als mit der Luft zu nutzen. Dabei konnte die flächenspezifische Entzugsleistung um den Faktor 2-3 gesteigert werden, je nachdem, bei welcher Aussentemperatur der Umschaltunkt (Bivalenztemperatur) von Luft auf Erdkollektor erfolgte, siehe Abbildung 3 links.

Die maximale flächenspezifische Entzugsleistung konnte bei einer Bivalenztemperatur von -1.5°C mit einem Rohrabstand von ca. 20-25 cm erreicht werden. Je nach Erdreich (ausser Sand) und Rohrdurchmesser wurde eine flächenspezifische Entzugsleistung von ca. $60\text{--}70\text{ W/m}^2$ erreicht, siehe Abbildung 3 rechts.

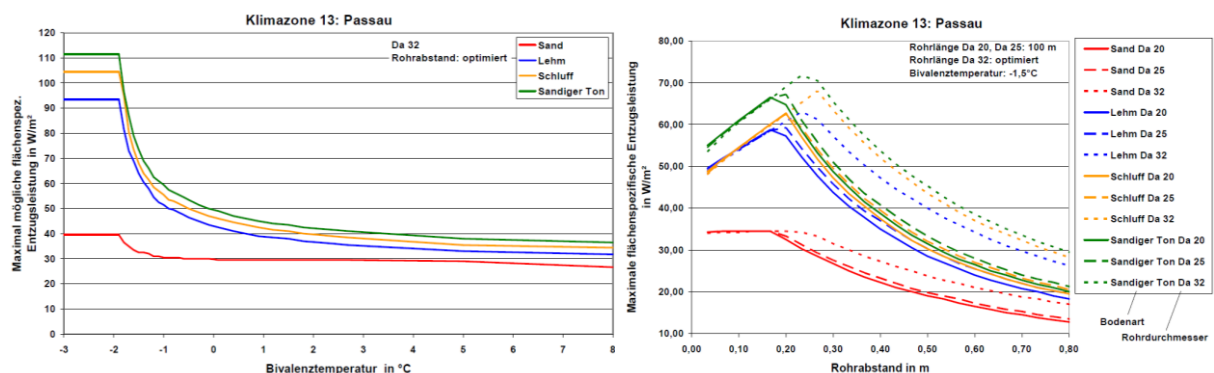


Abbildung 3: Maximale flächenspezifische Entzugsleistungen in Abhängigkeit des Bivalenzpunkts (links) und maximale flächenspezifische Entzugsleistung bei einem Bivalenzpunkt von -1.5°C abhängig vom Rohrabstand (rechts) [40]

Das Projekt ErdEis [41] untersucht die Nutzung von Erdkollektoren als Eisspeicher und vergleicht dabei acht verschiedene Einbringungsvarianten von Erdwärmekollektoren. Zwei Varianten haben dabei besonders gute Leistungen gezeigt.



Variante V in Abbildung 4 links ist eine besonders platzsparende Variante, welche sich dank Erdschlitzzfräsen auch sehr einfach ohne grossen Aushub verlegen lässt. Oberhalb des Kollektors wurde ein Drainagerohr zum Anschluss an die Dachentwässerung eingebaut, was jedoch nicht umgesetzt wurde. Das Rohr hat aber überraschenderweise trotzdem eine Verbesserung erzielt, indem es das umliegende Wasser im Erdreich gesammelt und gezielt über dem Kollektor abgeleitet hat. Die Erdreichtemperaturen um den Kollektor sind, im Vergleich zu anderen Varianten, sehr homogen, was sich durch den hohen Wassergehalt aufgrund der Versickerung erklären lässt. Variante VI in Abbildung 4 rechts besteht aus horizontal übereinander angeordneten Kollektoren, von denen der untere Kollektor durch das Grundwasser, der obere Kollektor durch die Sonneneinstrahlung regeneriert wurde.

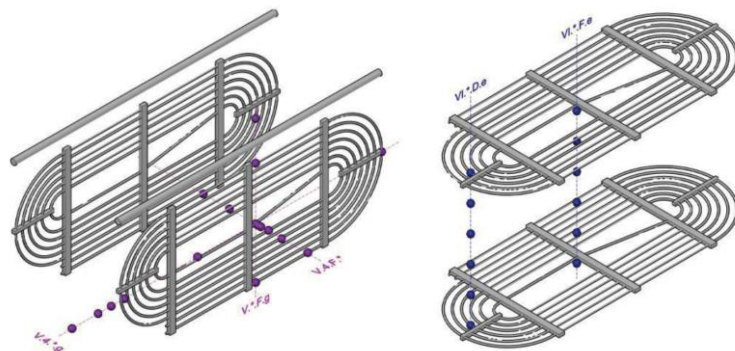


Abbildung 4: Variante V als vertikal aufgestellte Kollektoren und Variante VI als übereinander angeordnete Kollektoren [41]

Bassetti und Rohner [42] haben bereits 2004 ein Planungshandbuch für Erdwärmekörbe erarbeitet, die für die damals relativ neuen Systeme zur Gewinnung geothermischer Energie für Planer und Installateure Empfehlungen zur Dimensionierung und zum Bau solcher Anlagen bereitstellt, indem Prinzip, Funktion und Anwendungsmöglichkeiten von Erdwärmekorbanlagen beschrieben und der Einbau sowie Anwendungsbeispiele dokumentiert werden. Darauf aufbauend werden einfache Regeln zur Auslegung angegeben. Zusammenfassend bestätigen die Untersuchungen, dass Erdwärmekörbe als gute Alternative zu Erdwärmesonden bei Ein- und kleineren Mehrfamilienhaus-Anlagen eingesetzt werden können.

5.1.2. Typologie Erdkollektoren

Mit Erdkollektoren wird das obere Erdreich bis zu wenigen Metern unterhalb der Oberfläche erschlossen. Die natürliche Regeneration erfolgt dabei einerseits durch solare Einträge und Regen, andererseits, falls vorhanden, durch natürliche Grundwasserleiter nahe der Oberfläche.

Die Leistung eines Kollektors hängt im Wesentlichen von der Rohroberfläche ab (Wärmedurchgang), während die verfügbare Energie durch das erschlossene Erdreichvolumen begrenzt ist. Die Regenerationsfähigkeit hängt von der Oberfläche (solare Einstrahlung, Regen) und allfälligen Grundwasserströmen ab. Daher wird standardmässig angegeben, dass die Erdkollektoren nicht unter Gebäuden bzw. versiegelten Flächen installiert werden können. In einer monovalenten Auslegung wird daher viel Fläche um das Gebäude benötigt, um ein genügend grosses Volumen für die benötigte Energie zu erschliessen. Die Rohroberfläche pro Volumen ist eher klein.

Für die Spitzenlastdeckung wird viel Leistung benötigt, jedoch deutlich weniger Energie. Daher wird viel Rohroberfläche pro Volumen benötigt, das Gesamtvolumen kann aber reduziert werden. Dieser Effekt ist bei der Simulation von Erdwärmesonden im Projekt «HP Source» erkennbar, die in Abbildung 1 dargestellt ist.

Es kann im Folgenden zwischen Einbauarten und Kollektorarten unterschieden werden:

Einbauarten:

- **Punktueeller Einbau (z.B. Erdwärmekörbe):** Der Kollektor wird in einem Graben mit geringer Flächenausdehnung eingebracht und erschliesst damit das Erdreich rund um den Kollektor bzw. Korb.



- **Einbau in Graben:** Die Kollektoren werden in einem länglichen Graben eingebracht. Beim Ringgrabenkollektor zieht sich der Graben als Ring der Grundstücksgrenze entlang, um so möglichst viel Erdreich mit wenig Grabarbeiten zu erschliessen.
- **Flächiger Einbau:** bei nahe aneinanderliegenden Kollektorreihen wird das Erdreich flächig ausgehoben.

Kollektorarten:

- **Rohrbasiert:** Kunststoffrohre (meist PE in den Durchmesser DN25, DN32 oder DN40), wie sie auch für Erdwärmesonden verwendet werden, werden gerade, in Schleifenform (oft beim Ringgrabenkollektor) oder an einem Tragegestell befestigt (z.B. Erdwärmekörbe) ins Erdreich eingesetzt. Die Schleifenform ermöglicht ein einfaches Handling der Rohre, da sie ab der offenen Rolle direkt eingesetzt werden können, ohne die relativ starre Biegung der Rohre zu öffnen. Gegen Ende des Kollektors werden die Rohrschleifen näher übereinandergelegt, wodurch die geringere Temperaturdifferenz des schon erwärmten Fluids zum Erdreich mit mehr Wärmetauscheroberfläche pro Meter durch die überlappenden Schleifen kompensiert werden.
- **Elementbasiert:** Speziell geformte Kollektorelemente werden parallel und seriell miteinander verschaltet. Im Gegensatz zu einfachen Rohren sind in die Elemente meist parallele Kanäle mit einer regelmässigen Fluidverteilung integriert, so dass eine möglichst grosse Oberfläche zum Erdreich entsteht und trotzdem die Druckverluste und Massenstrombedarf für turbulenten Bedingungen in einem sinnvollen Rahmen bleiben.

5.1.3. Marktübersicht und Planungsgrundlagen

Die Abbildung 5 zeigt eine Übersicht von auf dem Markt verfügbaren Systemen von Spiralkollektoren, die teils auch als Spiralsonden, Energiekörbe bzw. Erdwärmekörbe bezeichnet werden. Erdwärmekörbe gibt es aber auch in grösseren Ausführungen, wie in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 5: Spiralkollektoren und Einbau (Quelle: LTM)

Die kleineren Spiralkollektoren bestehen typisch aus 30 lfd. m PE-Rohr und haben einen Durchmesser von 50 cm und eine Höhe von 2 m. Als monovalente Wärmequelle werden im Abstand von 2 m mit einer Überdeckung von 1.5 m unterhalb der Frostgrenze stehend installiert und liefern eine Leistung von 500 W/Spiralrohrkollektor. Zur Installation werden Erdbohrer verwendet, für die zunächst ein Graben von 1.5 m Tiefe ausgehoben wird, dann die Bohrung auf 3.5 m Tiefe erfolgt und die Spiralsonden im Bohrloch installiert und wieder verfüllt werden. Im Anschluss wird der Graben wieder zugeschüttet. Es sind auch grössere bzw. längere Ausführungen, z.B. von Frank oder IWS erhältlich.

In Abbildung 6 sind die grösseren Erdwärmekörbe und deren Installation abgebildet, die häufig konisch angeordnet sind, aber auch als zylindrische Körbe auf dem Markt sind.



Abbildung 6: Erdwärmekörbe (links Quelle: Betatherm, Zerob) und Installation (Quelle: Betatherm)

Die Abmessungen und weitere Eigenschaften für zwei unterschiedliche Erdwärmekorbgrössen sind in Abbildung 7 im Leistungsbereich zwischen 1.1 - 1.5 kW bzw. 1.6 – 2 kW/Erdwärmekorb für die Grössen eines 2 m bzw. 2.7 m hohen Korbes angegeben.

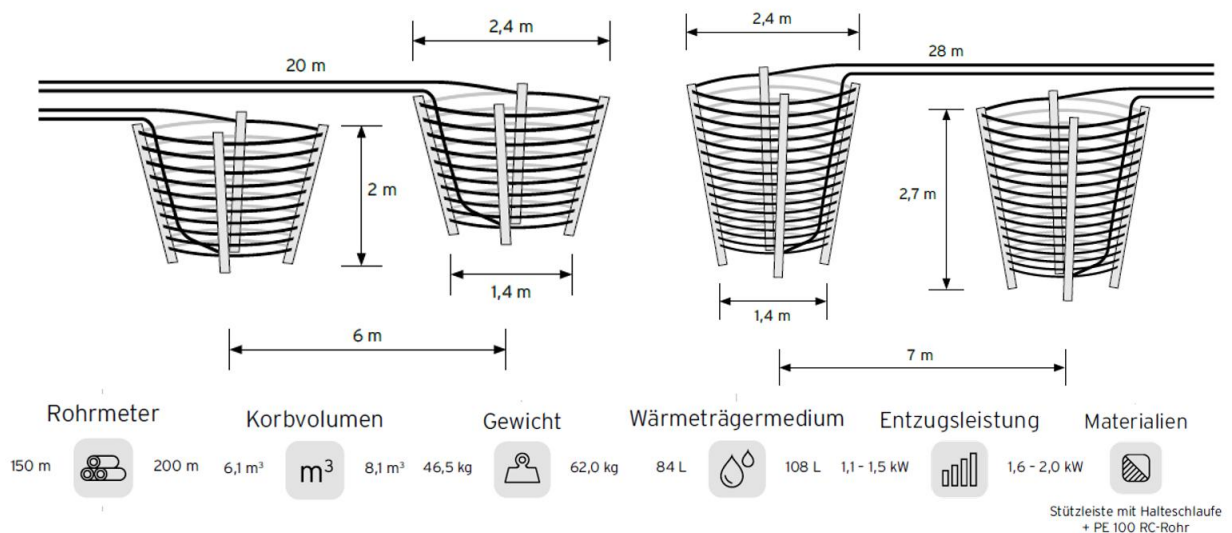


Abbildung 7: Installationsdaten und technische Daten von Erdwärmekörben in zwei Grössen (Quelle: verändert nach Betatherm)

Abbildung 8 zeigt verschiedene Ausführungsarten von Grabenkollektoren, die es in liegender und stehender Ausführung mit Rohrschleifen, sogenannte Ringgrabenkollektoren, und geraden Rohren gibt. Beide Ausführungen können horizontal oder vertikal in Gräben installiert werden. Übliche Rohrdurchmesser sind DN32 und DN40, welche in 200 m bzw. 300 m Rollen bezogen werden können. Die klassischen Grabenkollektoren werden in langen Gräben installiert. Ist der Graben ausreichend breit (im Bereich von 1 m), kann der vertikale Kollektor an beiden Seiten des Grabens installiert werden.



Abbildung 8: Grabenkollektoren mit geraden Rohren (links, Quelle: Heinle und Jansen) und Ringgrabenkollektoren (Quelle RGK e.-U.)



Als Variante zu parallelangeordneten Rohren kann auch ein Ringgrabenkollektor vertikal in Gräben installiert werden. Die klassische Installation für Ringgrabenkollektoren ist jedoch horizontal, bei Neubauten häufig entlang der Grenze der Baugrube um das Gebäude herum. Dabei können mit der Dichte bzw. der Überlappung der Rohrschleifen die Wärmeübergangseigenschaften modifiziert werden. Am Anfang des Ringgrabenkollektors, wenn das Fluid noch kalt ist, können die Rohrwicklungen daher mit weiterem Abstand verlegt werden, da die treibende Temperaturdifferenz für den Wärmeübergang noch grösser ist. Bei steigender Fluidtemperatur nimmt die Wärmeübertragung ab, so dass für konstanten Leistungsentzug die Dichte der Rohrwicklungen erhöht werden kann. Zur Vergrösserung der Oberfläche für die Wärmeübertragung werden statt Glattringen auch Wellrohre eingesetzt, die einen langsameren Abfall der Soletemperatur bei Belastung des Grabenkollektors aufweisen.

Die Grabenbreite hängt von der Anzahl der Rohre ab, typische Entzugsleistungen für Wellrohre mit unterschiedlichen Grabenanordnungen sind in Abbildung 9 links abgebildet. Grabenkollektoren können auch als flächige Kollektoren aufgeführt sein, die in Vergleich zu Rohren eine höhere Oberfläche für die Wärmeübertragung bieten. Flächenkollektoren werden häufig ebenfalls vertikal in schmalen Gräben installiert. Bei grösseren Anlagen wird jedoch ein flächiger Aushub eines Rechtecks vorgenommen, die Kollektorstränge entsprechend angeordnet und die Fläche wieder mit dem Aushub verfüllt.

Kollektortyp	JANSEN powerwave collect p1	JANSEN powerwave collect p2	JANSEN powerwave collect p4	Nr.	Klimazone	Entzugsleistung in W/m ² * Jahresarbeit in kWh / m ² *	Sand	Lehm/ Schluff	Sandiger Ton
				1	Bremerhaven Nordseeküste	Entzugsleistung Jahresarbeit	144 273	158 284	174 295
				2	Rostock-Warnemünde Ostseeküste	Entzugsleistung Jahresarbeit	125 265	138 276	151 287
				3	Hamburg-Fuhlsbüttel Nordwestdeutsches Tiefland	Entzugsleistung Jahresarbeit	144 270	158 281	174 292
				4	Potsdam Nordostdeutsches Tiefland	Entzugsleistung Jahresarbeit	134 237	147 246	162 256
				5	Essen Nordrhein-westfälische Bucht & Emsland	Entzugsleistung Jahresarbeit	144 286	158 297	174 309
				6	Bad Marienberg Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete	Entzugsleistung Jahresarbeit	132 291	145 303	160 315
				7	Kassel Nördliche und westliche Mittelgebirge, zentrale Bereiche	Entzugsleistung Jahresarbeit	137 257	151 268	166 278
				8	Braunlage Oberharz und Schwarzwald (mittlere Lage)	Entzugsleistung Jahresarbeit	125 304	138 316	151 329
				9	Chemnitz Thüringer Becken und sächsisches Hügelland	Entzugsleistung Jahresarbeit	123 255	135 265	149 276
				10	Hof Südöstliche Mittelgebirge bis 1.000 m	Entzugsleistung Jahresarbeit	123 257	135 268	149 278
JMA- Temperatur ¹	8° C 10° C	8° C 10° C	8° C 10° C						
Sandiger Ton	25 W/m 32 W/m	43 W/m 56 W/m	76 W/m 98 W/m						
Lehm	22 W/m 29 W/m	39 W/m 51 W/m	69 W/m 88 W/m						
Sand	16 W/m 21 W/m	27 W/m 36 W/m	50 W/m 65 W/m						

¹ JMA = Gemittelte Jahresausenlufttemperatur;
unter 8° C bzw. oberhalb einer Seehöhe von 800 m ist eine genauere Berechnung notwendig

Abbildung 9: Grabeninstallation und typische Entzugsleistungen für Grabenkollektoren mit Wellrohren (links, Quelle: Jansen) und Leistungs- und Energieentzug für Flächenkollektoren (rechts, Quelle: GeoCollect)

Der MultiQ-Geo Kollektor basiert auf einer nur 6 mm dicken Hohlkammerstegplatte, welche an beiden Enden mit einem Verteiler bzw. Sammler verschlossen ist. Damit können gute Strömungseigenschaften und ein niedriger thermischer Widerstand von 0.0406 m²K/W dank einer geringen Wandstärke und einer grossen Oberfläche realisiert werden. Standard-Abmessungen pro Element betragen 60 x 700 cm bzw. 120 x 700 cm. Die einzelnen Elemente werden parallel an den Verteiler angeschlossen [43], [44].

Der GeoCollect besteht aus einzelnen Elementen von ca. 35 x 95 cm. Jeweils 10 Elemente werden seriell zu einem Strang zusammengehängt. Die Elemente sind so gestaltet, dass sie eine grosse Oberfläche zum Erdreich aufweisen (0.62 m²/Element). In der Standardauslegung des GeoCollect wird das Erdreich zu einem Teil vereist [45]. Typische Auslegungsdaten sind in Abbildung 9 rechts dargestellt.

Kapillarrohrmatten bestehen aus sehr vielen dünnen Rohren, welche parallel mit kompakten Verteilern verbunden sind. Sie werden üblicherweise als komplette Elemente (Matten) ausgeliefert, was den Verbindungsaufwand auf der Baustelle reduziert. Kapillarrohrmatten werden auch in Deckenheiz- und -kühlsystemen oder Solarsystemen genutzt. Durch die geringen Rohrdurchmesser und Rohrabstände werden ähnlich grosse Oberflächen wie bei Flächenkollektoren erreicht. Hersteller sind z.B. Beka und Geoclima. Abbildung 10 zeigt Ausführungsformen von Flächenkollektoren.



Abbildung 10: Ausführungsformen von Flächenkollektoren und Kapillarrohrmatten: Der MultiQ Geo (links) ist ein langer Kunststoffkollektor, der in Gräben installiert wird, der GeoCollect (Mitte) besteht aus einem kürzeren Kollektor, von denen bis zu 10 in Reihe verschaltet werden, Kapillarrohrmatten bestehen aus eng angeordneten, dünnen Rohren, die typischerweise horizontal installiert werden (rechts).

5.2 Ziele des Pilotprojekts

Für monovalent betriebene Erdreichkollektoren sind sehr grosse Grünflächen notwendig, welche bei Einfamilienhäusern im ausserstädtischen Bereich zu finden sind, weshalb diese Systeme auch hauptsächlich dort eine Anwendung finden.

5.2.1. Erdkollektoren zur Spitzenlastdeckung

In einem Pilotprojekt soll die Nutzung von oberflächennahen Erdkollektoren zur Spitzenlastdeckung, analog dem Ansatz von Erdwärmesonden zu Spitzenlastdeckung im Projekt RenoSource [2], untersucht werden. Es wird vermutet, dass sich der benötigte Flächenbedarf ebenfalls drastisch reduzieren lässt, wenn die Kollektoren nur für die Spitzenlastdeckung benötigt werden. Im Gegensatz zu Erdwärmesonden ist die minimale Eintrittstemperatur in den Erdkollektor nicht so kritisch, sofern keine Vereisungsgefahr des Wärmeträgers im Kollektor besteht. Es gibt Systeme, welche gezielt voll vereist werden, was hier jedoch aufgrund von allfälligen Bodensenkungen nicht geplant ist. Zumindest eine teilweise Vereisung sollte jedoch möglich sein, womit die dem Boden entnommene Wärmemenge deutlich gesteigert werden kann.

Folgende Forschungsfragen sollen mit der Pilotanlage untersucht werden:

- Ergeben sich ebenfalls drastische Reduktionseffekte des Flächenbedarfs wie bei Erdwärmesonden, wenn Erdkollektoren lediglich zur Spitzenlastdeckung genutzt werden?
- Kann der Erdkollektor in bestimmten Szenarien allein genutzt werden, ohne dass er wesentlich grösser ausgelegt werden muss?
- Welchen Effekt hat die technische Regeneration auf die Leistungsfähigkeit der Anlage?

In der Literatur und Auslegungshandbüchern wird dieser Anwendungsfall kaum behandelt. Einzig im GeoCollect Auslegungshandbuch [45] wird eine Auslegung bei hybriden Rohrsystemen beschrieben. Einziger Auslegungsparameter ist dabei die Nenndurchflussmenge der Wärmepumpe bei maximaler Leistung und 3 K Spreizung. Im Weiteren kann der Verlegeabstand der GeoCollect-Stränge von 0.7 auf 0.5 m reduziert werden.

Deshalb wurde die Idee mit verschiedenen Experten für Erdkollektoren diskutiert:

Arne Komposch ist der Experte für Ringgrabenkollektoren und hat mit seinem Planungsbüro schon mehr als 1000 Anlagen realisiert, hauptsächlich in Österreich und Deutschland, einige wenige Anlagen jedoch auch in der Schweiz.

Klaus Ramming hat im 2007 im Rahmen seiner Dissertation ein Simulationsmodell für Erdkollektoren entwickelt [40]. In der Dissertation wurde auch die Nutzung von Kollektoren als alternative Spitzenlastquelle in Kombination mit Luft untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Entzugsleistung je nach Bivalenztemperatur (Umschalttemperatur von reinem Luftbetrieb auf reinen Erdkollektorbetrieb) bis zum Faktor 2 erhöht werden kann, siehe Abbildung 3.



Peter Kömmelt, Technischer Leiter MultiQ Energy Systems. Der MultiQ-Absorber hat eine grosse Oberfläche und bietet damit gute Voraussetzungen für den Einsatz im Spitzenlastbetrieb.

Aus den Gesprächen mit den Experten und aus dem Forschungsbericht ErdEis I [41] konnten folgende Schlüsse abgeleitet werden:

- Es gibt kaum Erfahrungen in der Nutzung von Erdkollektoren als Spitzenlastquelle. Erfahrungen gibt es bei der Kombination mit Regeneration (MultiQ), womit die benötigte Kollektorfläche um bis zu 30 % gegenüber einem monovalent ausgelegten System reduziert werden kann.
- Bei versiegeltem oder überbautem Boden ist eine technische Regeneration zwingend. Bei unversiegeltem Boden ist die natürliche Regeneration (Sonne, Regen) dominant, jedoch kann eine technische Regeneration insbesondere im Frühjahr, falls der Boden teilweise gefroren ist, ein schnelles Auftauen unterstützen. Bei gefrorenem Boden kann das Wasser nicht mehr gut ablaufen und damit der Boden verschlammen.
- Durch den Einbau von Drainagerohren oberhalb von senkrecht stehenden Kollektoren kann die Entzugsleistung deutlich erhöht werden, selbst ohne Nutzung der Dachentwässerung [41], da damit das Wasser aus dem umgebenden Erdreich gezielt über den Kollektoren abgegeben werden kann.
- Eine Vereisung des Bodens ist für den Kollektor selbst kein Problem, kann aber zu Hebungen oder Senkungen des Geländes führen, was z.B. für Mauern oder Zäune zu Problemen führen kann. Gemäss den Planungsunterlagen von GeoCollect [45] kann diese Problematik umgangen werden, wenn die durchschnittliche Wassersättigung zwischen 15 und 50 % liegt, so dass die Volumenänderung in der Kapillarität des Erdreichs ihren Raum findet.
- Grabenkollektoren in Kombination mit Erdwärmesonden wurden schon umgesetzt und haben sich bewährt.
- Beim Fräsen von Schlitzern muss ein Schlitz nach dem anderen gefräst und gleich wieder verfüllt werden, damit das umgebende Erdreich genügend stabil für die Fräsmaschine ist. Das bedeutet, dass das Kollektorsystem so geplant werden muss, dass ein Schlitz komplett installiert werden kann, bevor der nächste Schlitz gefräst wird.

5.3 Wahl des Pilotobjekts

Die Stadt Zürich ist eine der grössten Immobilieneigentümerinnen der Schweiz und besitzt Anlagen im Verwaltungs- und Finanzvermögen im Wert von 15.7 Mia. Franken. Dazu gehören auch insgesamt fast 7500 Wohnungen in Einzelliegenschaften und Wohnsiedlungen. Um die Klimaziele der Stadt Zürich (Netto-Null bis 2040) zu erreichen, müssen jährlich 40-50 Liegenschaften saniert werden.

Im Vorfeld des Projekts wurde mit Liegenschaften Stadt Zürich (LSZ) eine geeignete Liegenschaft für das Pilotobjekt gesucht. Die Entscheidung fiel dann auf die Liegenschaft Limmattalstrasse 161. Das Objekt und die Umgebung ist in Abbildung 11 gezeigt.

Es handelt sich dabei um zwei historische Gebäude mit einem Garten. Die Beheizung und Warmwasseraufbereitung erfolgt durch eine Gastherme mit 60 kW Leistung. Im Laufe der Abklärungen für das Pilotobjekt ergaben sich jedoch zunehmend Herausforderungen, welche zu potenziellen Risiken im Forschungsprojekt führen könnten:

- Unter dem Grundstück werden Bauschuttablagerungen vermutet, welche bei Grabarbeiten teuer hätten entsorgt werden müssen.
- Die ursprünglich nutzbare Fläche des Gartens wurde zu 130 m² angenommen. Durch die vorhandenen Bäume und weitere geplante Pflanzungen am nordöstlichen Rand der Wiese ist der vorhandene Bauraum für Erdkollektoren auf ca. 50 m² zusammengeschrumpft.
- Der Garten steht teilweise unter Denkmalschutz

Aus diesen Gründen wurde entschieden, ein neues Pilotobjekt zu suchen.

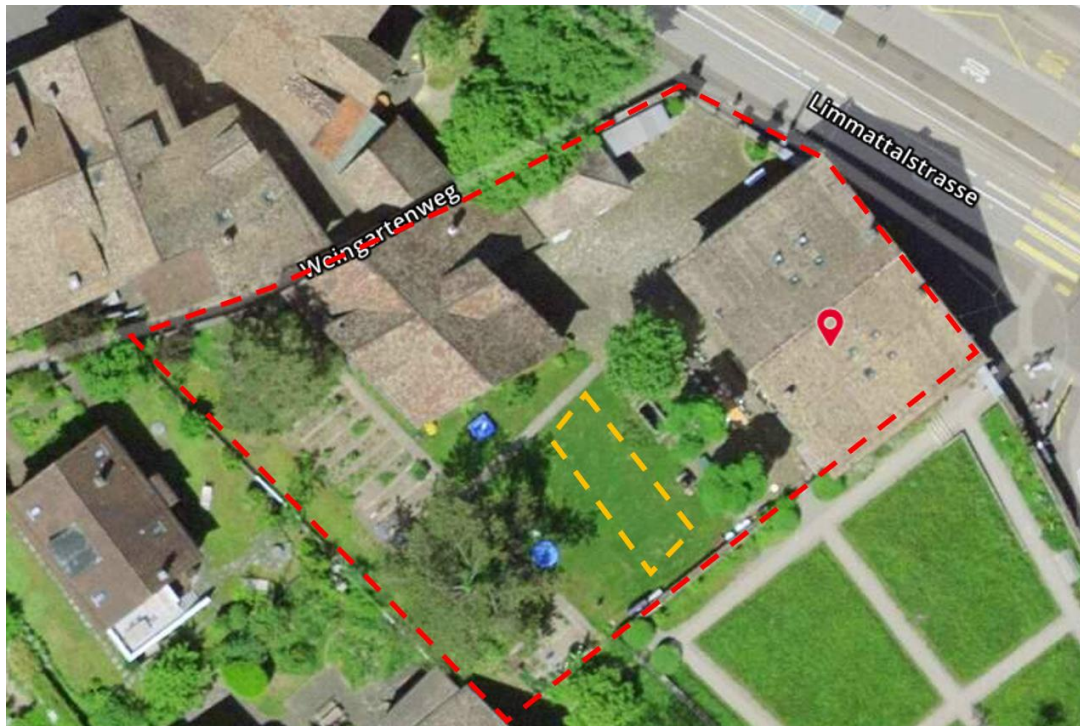


Abbildung 11: Pilotobjekt Limmattalstrasse 161: rot gestrichelt: Grundstücksgrenze, orange gestrichelt: übrig gebliebene Fläche für Erdkollektor

5.4 Pilotobjekt Kalchbühlstrasse

Das Doppel-Mehrfamilienhaus an der Kalchbühlstrasse 169/171 in Zürich (Baujahr 1967, 976 m² EBF) wurde im Jahr 2002 aussengedämmt. Die Wärmeerzeugung für Heizung und Trinkwarmwasser erfolgt mit einer Ölheizung von 2008 und einer Leistung von 50 kW. Die Planung der Pilotanlage erfolgt durch die Firma Alera energies AG, Ballwil, in engem Austausch mit der Forschungsgruppe an der OST.



Abbildung 12: Gartenansicht des Pilotobjekts. links Quelle Google Maps, rechts eigenes Bild

5.4.1. Heizleistungsbedarf

Die Wärmepumpenleistung wurde nach dem Faktenblatt Heizleistung der Stadt Zürich [46] mit Einbezug des Ölverbrauchs der letzten 6 Jahre (Mittelwert 12'558 Liter) ermittelt und beträgt 41 kW bei einem Heizwärmebedarf von 87 MWh (HGT-korrigiert).



5.4.2. Planung des Erdkollektorfelds

Ein unverbauter Wiesenstreifen liegt zwischen dem Haus und der Grundstücksgrenze, welcher sich gut für die Kollektoren eignet. Die Fläche ist eher grosszügig für die angestrebte Kompaktheit des Kollektorfeldes, erlaubt damit aber eine Flexibilität in der Auslegung.

Unter Berücksichtigung eines Grenzabstands von 3 m und dem Wurzelbereich der vorhandenen Bäume im südlichen Teil des Geländes lässt sich ein fünf Meter breites Kollektorfeld über die ganze Länge des Gebäudes realisieren. Zu Forschungszwecken wird das Feld auf 2 Teilfelder unterteilt, was die Möglichkeit bietet, unterschiedliche Kollektortechnologien bezüglich ihrer Spitzenlasteigenschaften zu testen oder die Feldgrösse zu reduzieren, um die minimal notwendige Feldgrösse zu ermitteln.

Um die Kollektoroberfläche im Vergleich zu einer monovalenten Auslegung eines Erdkollektorfeldes für den Spitzenlastbetrieb zu vergrössern, werden die Kollektoren enger aneinandergelegt als nach Standardauslegung für einen monovalent betriebenen Erdkollektor.

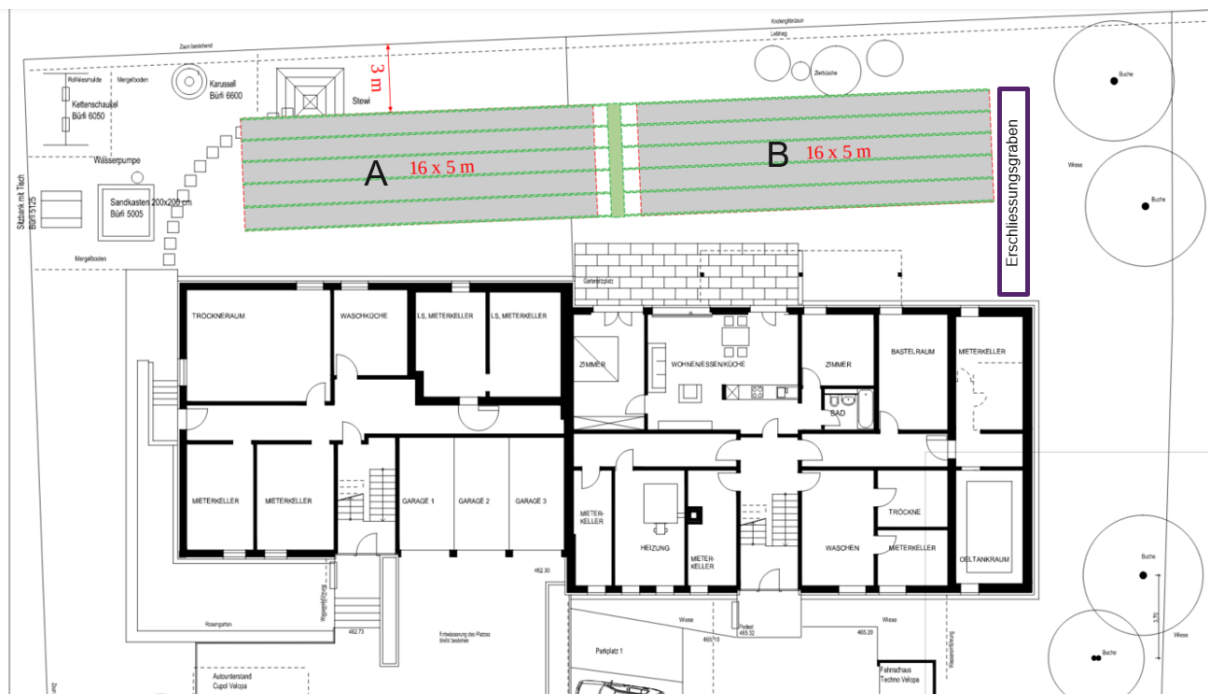


Abbildung 13: Erdkollektorfeldanordnung. Die Erschliessung erfolgt über einen Graben am rechten Rand des Feldes, da hier die Leitungen gut ins Gebäude eingeführt werden können. Zudem steigt das Gelände in diese Richtung leicht an, was für die Entlüftung vorteilhaft ist.

Abbildung 14 zeigt den Aufbau des Kollektors im Erdreich. Über die Feldbreite werden mit einer Erdfräse Schlitz mit einer Breite von 15 – 20 cm und einer Tiefe von 2.5 m im Abstand von knapp 1 m eingefräst. Damit kann die Menge des anfallenden Aushub-Materials gegenüber einer Grabung mit Bagger minimiert werden. Die Schlitz werden nach Einsetzen des Kollektors mit Sand oder aufgeschlämmtem Aushubmaterial wieder verfüllt. Der Kollektor befindet sich in den unteren 1.3 m des Schlitzes. Oberhalb des Kollektors wird ein Drainagerohr eingebracht, welches an die Dachentwässerung angeschlossen werden kann. Damit kann das Erdreich bzw. die Sandverfüllung um den Kollektor feucht gehalten werden, was die Wärmeleitfähigkeit deutlich verbessert. In [41] konnte selbst ohne Anschluss an die Dachentwässerung die Wärmeleitfähigkeit mit den Drainagerohren deutlich verbessert werden, da damit das Wasser an der Oberfläche gesammelt und gezielt über dem Kollektor abgegeben werden konnte. Im Weiteren dient das Drainagerohr zur Entwässerung, falls im Frühjahr das Erdreich um den Kollektor zu stark vereist und damit das Oberflächenwasser nicht mehr durch den unteren Teil des Erdreichs abfließen kann, wie auch in [45] beschrieben.

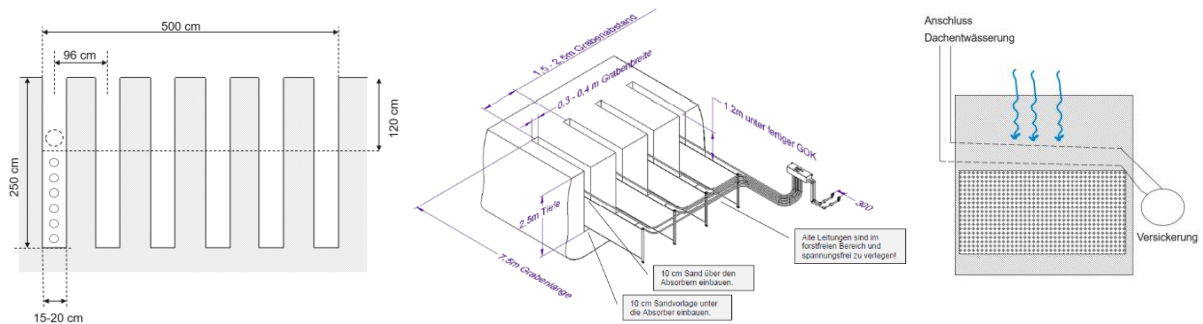


Abbildung 14: Abmessungen der Schlitz für die Kollektoren, links. Drainagerohr zur Be- und Entwässerung, rechts. Das Drainagerohr wird oberhalb des Kollektors ins Erdreich eingelegt [6]

Das Feld A ist eine Ausstattung mit «MultiQ Geo»-Erdreichkollektoren geplant, siehe Abbildung 13. Dieser Kollektor basiert auf einer nur wenige [mm] starken Hohlkammerstegplatte mit Sammler und Verteiler an den Enden. Die Platte wird vom Wärmeträgermedium parallel zur Erdoberfläche durchflossen. Dadurch hat der Kollektor eine sehr grosse Oberfläche gegenüber dem Erdreich und einen geringen Wärmewiderstand.

Die MultiQ-Kollektoren sind 7 m lang und 1.2 m hoch. Im Feld von 5 x 16 m mit 6 Schlitzten können 12 Kollektoren eingebaut werden, was eine totale Kollektoroberfläche von 201.6 m² ergibt (Kollektorfläche beidseitig gerechnet). Jeder Kollektor wird einzeln an den Verteiler angeschlossen.

Mit einer Kälteleistung von 20.25 kW ergibt sich damit für den MultiQ eine flächenspezifische Leistung von 100.4 W/m². Aus dem in [44] angegebenen thermischen Widerstand von 0.0406 m²K/W ergibt sich eine spezifische Leistung von 246 W/(m²K), jedoch mit nur einer Seite des Kollektors als Referenzfläche. Umgerechnet auf die doppelte Fläche ergeben sich damit 123 W/(m²K).

Die Grabenbreite und -tiefe für beide Felder orientieren sich an den Planungsvorgaben für den MultiQ-Kollektor, jedoch werden die Gräben mit einem geringeren Abstand gefräst (0.96 m statt 1.5 - 2.5 m), um im vorhandenen Volumen mehr Kollektorfläche unterbringen zu können.

Tabelle 5: Hydraulische Auslegung der Kollektoren

Grösse	Einheit	Wert	Wert
Grabenlänge	m	14	
Anzahl Gräben	-	6	
Totale Grabenlänge	m	84	
Kälteleistung	kW	20.25	
Wärmeträgermedium	%	MEG 33%	
Variante		DN32	DN40
Ringdichte		6	6
Total Rohrmeter	m	1583	1583
Wärmetauschoberfläche	m ²	159	199
Spez. Leistung pro Wärmetauschoberfläche	W/m ²	127.3	101.8
Spez. Leistung pro Rohr	W/m	12.8	12.8
Anzahl hydraulischer Kreise	-	6	6
Spreizung	K	3	3
Druckverlust	kPa	80.0	16.4

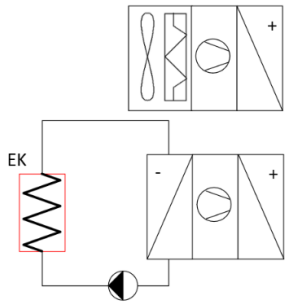
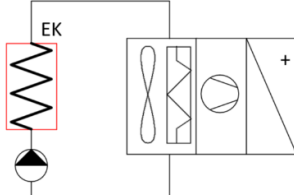
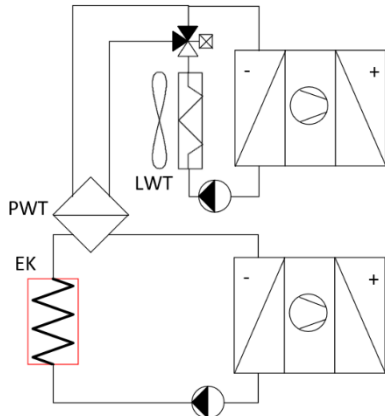
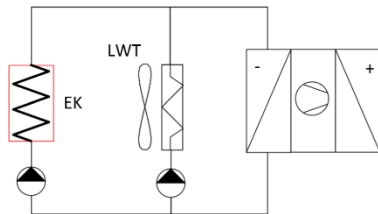
Das Feld B wird mit einem Kollektor basierend auf Rohren ausgestattet, als herstellerunabhängiges System mit möglichst einfachem Aufbau. Die Herausforderung dabei ist, dass, um die Anzahl Verbinder zu reduzieren (Verbindungsaufwand, Leckagerisiko), die einzelnen Rohrabschnitte möglichst lang sein sollten. In der Auslegung wurden verschiedene Rohrdurchmesser (DN 32, 40) bezüglich Wärmetauschoberfläche und Druckverlust mit Auswirkungen auf die Anzahl benötigter hydraulischer Kreise untersucht, wie in Tabelle 5 dargestellt ist. Als mögliche Variante für die weitere Planung hat sich ein

DN40-Rohr herausgestellt, welches wie ein Ringgrabenkollektor senkrecht in den Schlitz eingelegt wird. Mit Überlappung der einzelnen Ringe kann die Anzahl Rohrmeter pro Grabenmeter gesteuert werden. Für die zu erreichende Wärmetauscheroberfläche wurde als Benchmark die 200 m², welche mit den 12 MultiQ-Kollektoren erreicht werden, gesetzt.

5.4.3. Quellenhydraulik und Steuerung

Die Tabelle 6 zeigt verschiedene hydraulische Varianten mit unterschiedlichen Integrationsstufen.

Tabelle 6: Hydraulikvarianten

Variante 1: Luft-Direktverdampfer-WP mit Sole-WP Vorteile: - Einfachste Hydraulik für Erdwärmekollektor (EK) - Kaskadierung sekundärseitig - Kompakter Luftwärmetauscher (LWT) Nachteile: - Leistungsbeitrag der einzelnen Quellen wird durch die Wärmepumpenleistungen begrenzt - keine «passive» Regeneration möglich, jedoch «aktive» Regeneration mit Wärmepumpe möglich	
Variante 2: Kombiverdampfer Vorteile: - einfachste Hydraulik - kompakter LWT, da auf das Kältemittel übertragen wird Nachteile: - kaum Produkte erhältlich, daher Multiplizierbarkeit fraglich	
Variante 3: Zwei Solekreise Plattenwärmetauscher (PWT) für die Regeneration Vorteile: - Regeneration möglich - Wenn Quelle stärker genutzt werden soll als die Wärmepumpe Leistung erbringt, kann Leistung über den PWT an den anderen Kreis übertragen werden - Unterschiedliche Glykolan-teile können realisiert werden Nachteile: - Grädigkeitsverluste über den PWT - aufwendige Hydraulik - zusätzlicher PWT für Abtauung notwendig (nicht eingezeichnet)	
Variante 4: Integrierter Solekreis (analog RenoSource) Vorteile: - freie Wahl der Quelle - direkte Regeneration möglich Nachteile: - aufwendige Hydraulik - zusätzlicher PWT für Abtauung notwendig (nicht eingezeichnet) - Exergieverlust beim Mischen der beiden Quellen	



Obwohl zu Beginn des Projekts zuerst die Variante 1 aufgrund der Einfachheit anvisiert wurde, liegt der Fokus aktuell auf der Variante 4. Diese bietet aus Sicht der Forschung die meisten Möglichkeiten, insbesondere die freie Wahl der Quelle und die Möglichkeit der Regeneration.

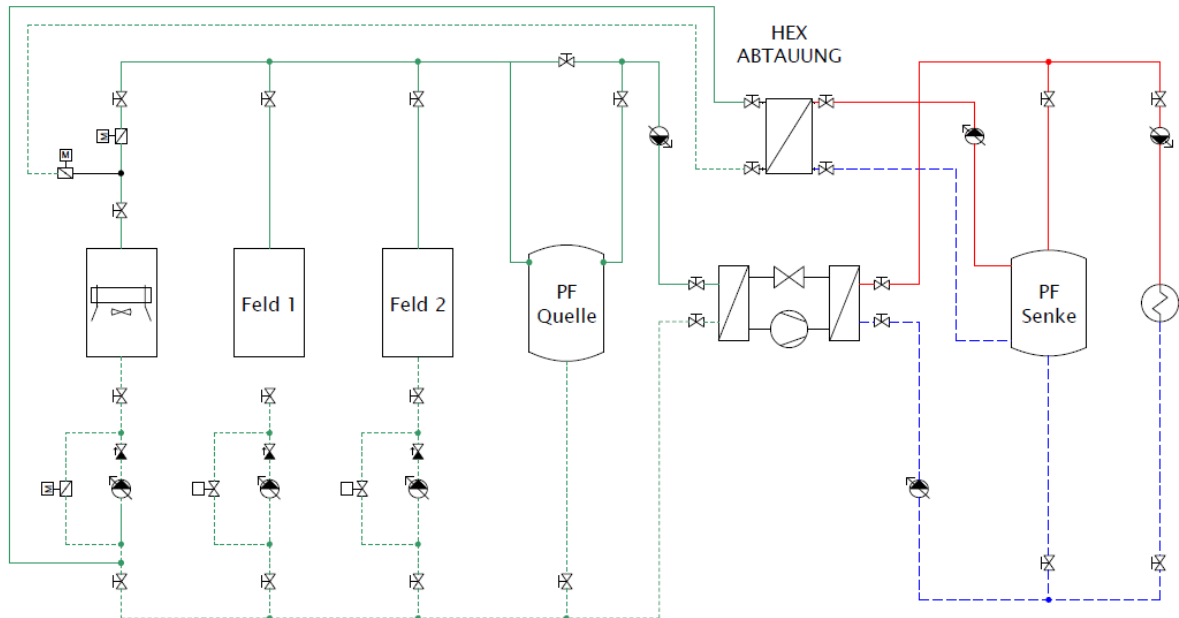


Abbildung 15: Hydraulisches Schema (Stand August 2025, Alera energies AG)

Die Abbildung 15 zeigt den aktuellen Stand der Quellenhydraulik. Aus Forschungsgründen sind die beiden Erdkollektorfelder in separate Stränge eingebunden. Für die Regeneration werden die Kollektorfelder von oben nach unten durchströmt, ein Bypass führt an der Umwälzpumpe vorbei. Es ist dann lediglich die Umwälzpumpe des Luftwärmetauschers in Betrieb.

5.4.4. Praktische Umwagsamkeiten zur Umsetzung der Flächenkollektorvariante

Die Installation der Flächenkollektoren war wie in Abbildung 14 in schmalen Schlitten vorgesehen, die mit einer Erdfräse erzeugt werden können, ohne dass viel Aushub entsteht und damit sehr kostengünstig realisiert werden könnte. Dafür müsste allerdings sichergestellt werden, dass keine Hindernisse im Erdreich vorhanden sind, die die Erdfräse beschädigen könnten. Auf dem Gebiet ist mit kleinen Findlingen zu rechnen, die allerdings allfällig über eine Messung mit einem Georadar detektiert werden könnten. Es konnten jedoch wegen der derzeit geringen Marktnachfrage keine Schweizer Unternehmen mit entsprechenden Erdfräsen ausfindig gemacht werden, die Erdschlitz bis 4 m Tiefe erzeugen können. Beim Baggern besteht hingegen eine Einsturzgefahr, falls das Erdreich nicht standfest genug ist, was für eine Person, die sich für die Installation des Kollektors im Graben befindet, eine Gefahr darstellt, verschüttet zu werden. Ein kompletter Aushub der Fläche, die beispielsweise bei der grösseren Installation von Geocollect-Erdkollektoren gemacht wird, stellt jedoch einen grossen Aufwand dar. Damit wurde auch aus Zeitgründen hinsichtlich der Planung der Anlage die Lösung mit zwei unterschiedlichen oberflächennahen Erdwärmetauschern schliesslich verworfen und auf ein einzelnes System übergegangen.

5.4.5. Derzeit in der Planung favorisierte Lösung

Aufgrund der beschriebenen Umwagsamkeiten ist die derzeit favorisierte Lösung ein System mit Erdwärmekörben, mit denen in der Schweiz bereits Erfahrungen bestehen und die mit einem kleinen Bagger problemlos installiert werden können. Für den Bagger sind auch allfällige Findlinge kein Problem dar. Auch besteht keine Einsturzgefahr, da der Korb mit einem Bagger installiert wird und keine Person in die ausgehobene Grube hinabsteigen muss.



Als Gesamtanbieter für die Anlage besteht Kontakt zur Firma Heim AG, die eine Hydraulik mit zwei Quellen bereits im Repertoire haben, und auch an Multi-Quellen Lösungen für ihr Portfolio interessiert sind. Allerdings sind in ihrer Hydraulik die Quellen seriell verschaltet, so dass die Aussenluft über die Erdwärme vorgewärmt wird. Dies ist nicht die gewünschte Einbindung, die für das Projekt vorgesehen ist, da die zweite Quelle ja nur als Spitzenlast zugeschaltet werden soll. Die hydraulische Integration ist daher mit der Heim AG derzeit noch in Diskussion.

5.5 Kollektormodell

Zur Simulation von oberflächennahen Erdkollektoren wurde ein Modell für die Software Matlab-Simulink entwickelt, dass auf bestehenden Modellen in der Literatur basiert, unter anderem auf den in [40] skizzierten Methoden. Im Gegensatz zur in der Software TRNSYS durchgeführten Implementierung, die quasi-dreidimensional ist [47], ist das entwickelte Modell vollständig dreidimensional und verwendet für die Diskretisierung die Finite-Volumen-Methode.

Um den Temperaturzustand im Boden und die Flüssigkeit innerhalb des Erdwärmekollektors zu simulieren, wird zunächst die Geometrie auf der Grundlage von vier Benutzereingabevariablen definiert. Diese definieren die Konfiguration der Kollektorrohre: Mäander oder parallele Verschaltung sowie die Ausrichtung als vertikal oder horizontal und die Tiefe. Sobald die geometrischen Grenzen des Kollektors so definiert sind, werden sie in jeder geometrischen Dimension, mit Ausnahme der Erdoberflächenrichtung, um 2 m erweitert, um das Berechnungsgebiet zu definieren. Anschliessend wird ein Netz generiert, indem zunächst die Grösse der Zellen definiert wird, welche die Rohrleitungen des Erdwärmekollektors enthalten. Dann ist die Anzahl der Zellschichten festgelegt, die in jeder Koordinatenrichtung zwischen den Grenzen des Berechnungsgebiets und dem Kollektor hinzugefügt werden sollen. Es ist auch möglich, das Netz in jeder Koordinatenrichtung nach Wunsch zu verfeinern.

Hier ist anzumerken, dass die Kollektorrohre nicht physisch erzeugt werden, sondern ihre Wirkung in der Energiegleichung als ein Senken/Quellen-Term berücksichtigt wird. Die Zellen werden daher während der Netzgenerierung mit einem Wert markiert, welcher für die Rohrleitung enthaltende Zellen einen Wert von eins erhalten und die anderen null gesetzt werden. Abbildung 16 zeigt einen horizontalen Kollektor in Mäander-Konfiguration.

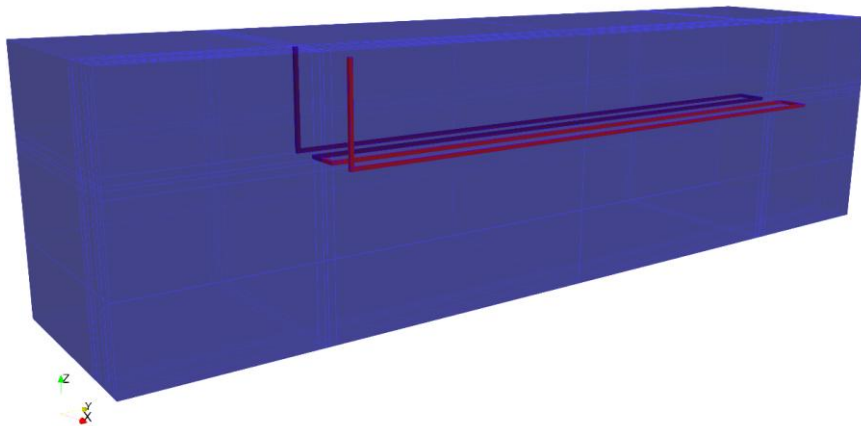


Abbildung 16: Einfacher horizontaler Kollektor, der mäanderförmig verlegt ist, mit generiertem Netz

Die Herausforderungen mit der aktuellen Modellierungsmethode bestehen darin, dass der Mangel an physikalischen Rohrleitungen zwar ein einfaches Mesh ermöglicht, aber das standardmässig generierte Mesh Zellen mit sehr hohen Formfaktoren enthält. Angesichts der diffusen Natur der zugrunde liegenden Gleichungen erhöhen solche Zellen die numerischen Fehler.

Es ist jedoch möglich, die Formfaktoren mithilfe der Eingabeparameter zu reduzieren, was aber zu einer Erhöhung der Anzahl der gesamten Zellen und einer entsprechenden Verlängerung der Rechenzeit führt. Darüber hinaus hängen die Materialeigenschaften des Bodens von Faktoren wie seinem Aufbau, dem Wassergehalt und dem Gefrierzustand ab.



Das Modell berechnet die Temperatur an jedem Knoten im Erdreich anhand der Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung. Die Temperaturen im Erdreich werden daher rein aus der Wärmeleitung berechnet. Die Leistung des Kollektorrohres wird mittels eines Wärmequellen- bzw. -senkenterms zur Wärmeleitung addiert. Die Fluidtemperaturen im Rohr werden eindimensional aus Wärmeleitung und Konvektion im Rohr berechnet. Der Wärmeübergangskoeffizient wird über das Wärmeübergangsgesetz für die Konvektion im Rohr ermittelt.

Um den Temperaturzustand zu simulieren, müssen Randbedingungen an den Grenzen des Berechnungsgebiets implementiert werden. Es ist möglich, eine temperaturbasierte oder eine adiabatische Bedingung an allen Randbereichen anzuwenden. Die temperaturbasierte Randbedingung wird durch die Berechnung des Wärmeübergangs, der sich aus der Kasuda-Korrelation für die ungestörte Bodentemperatur ergibt, ermittelt:

$$T_{ground} = T_{ave} - T_{mag} e^{\left(-h \sqrt{\frac{\pi}{t_0 \alpha_{soil}}}\right)} \cos\left(\frac{2\pi}{t_0} [t - t_{min}] - h \sqrt{\frac{\pi}{t_0 \alpha_{soil}}}\right) \quad \text{Gl. 1}$$

mit T_{ave} durchschnittliche Jahrestemperatur, T_{mag} die Amplitude, h die Tiefe im Boden, t_0 die Periode, α_{soil} die Temperaturleitfähigkeit des Bodens und t_{min} der Zeitpunkt, an dem die Temperatur ihren Minimalwert erreicht.

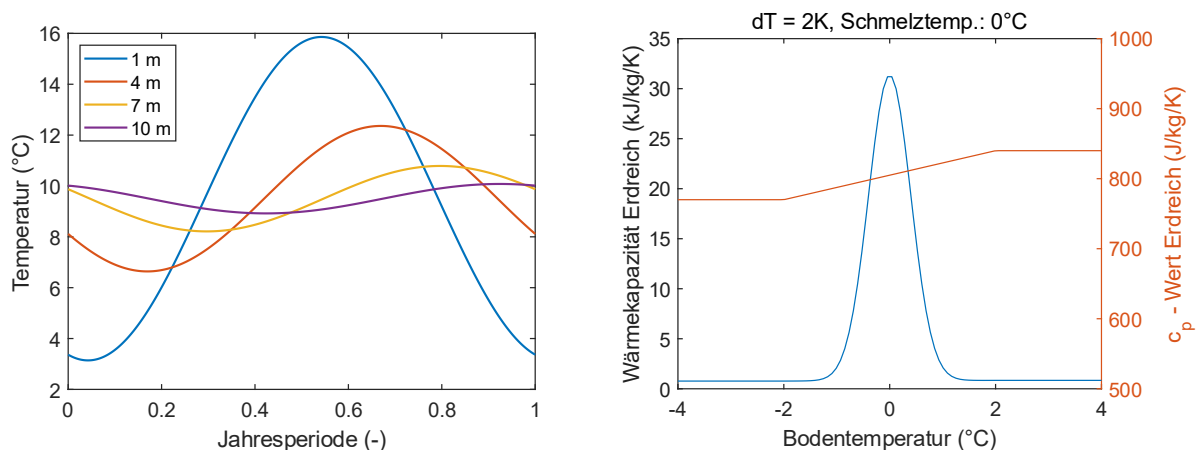


Abbildung 17: Ungestörte Erdreichtemperatur in Abhängigkeit der Tiefe als Temperaturreandbedingung (links, nach Gl. 1) und Berücksichtigung der Vereisung über Normalverteilung der Wärmekapazität (rechts, berechnet nach [40])

Die Vereisung wird entsprechend der Modellierung in [40] über einem festgelegten Temperaturbereich um die Schmelztemperatur als Gauss'sche Normalverteilung der Wärmeleitfähigkeiten so modelliert, dass das Integral im entsprechenden Temperaturbereich der Schmelzenthalpie des vorhandenen Wassers entspricht. Die Wärmekapazität entspricht in diesem Temperaturbereich des Phasenwechsels dann der latenten Wärmekapazität und einer linearen Interpolation zwischen der Wärmekapazität des ungefrorenen und des gefrorenen Erdreichs.

Das Modell wird derzeit mit einem Programmvergleich validiert. Weitere Validierung sollen mit Messwerten realer Anlagen durchgeführt werden, u. a. auch aus den Messwerten der Pilotanlage.



6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das erste Jahr im Projekt fokussierte auf der Konzeptionierung einer Pilotanlage in Zusammenarbeit mit Liegenschaften Stadt Zürich (LSZ) und des von LSZ beauftragten Planungsunternehmens ALERA energies AG. Zunächst wurde ein geeignetes Objekt identifiziert, die Systemwahl unter den Forschungsaspekten für die Pilotanlage diskutiert und erste Planungen und Systemabklärungen durchgeführt [43]. Wegen Einschränkungen durch die Garten-Denkmalpflege und der dadurch im Verhältnis zur Leistungsanforderung stark reduzierten zur Verfügung stehenden Fläche wurde ein anderes Objekt aus dem Portfolio von LSZ ausgewählt, welches genügend Fläche zur Behandlung der Forschungsaspekte bietet. Nach verschiedenen Abklärungen zu oberflächennahen Systemen kristallisiert sich eine Lösung mit Erdwärmekörpern in Verbindung mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe heraus.

Parallel wurden Grundlagendaten zur Planung von Wärmequellen in Verbindung mit einer Markt- und Literaturrecherche durchgeführt. Bis auf einen Hersteller von flächigen Erdkollektoren sind in den Planungsunterlagen keine Angaben für die Auslegung auf einen Mehrquelleneinsatz verfügbar. Anhand der Recherche wurden die Eigenschaften und Einschränkungen von Wärmequellen charakterisiert und eine erste qualitative Einschätzung günstiger Quellenkombinationen anhand einer Matrix vorgenommen. Die verfügbaren Planungsgrundlagen wurden für die wichtigsten Quellen zu Factsheets zusammengefasst, die im weiteren Projektverlauf mit Informationen zum Mehrquelleneinsatz ergänzt und erweitert werden.

Der Schwerpunkt des zweiten Projektjahres liegt auf der Auswahl von vielversprechenden Quellenkombinationen, die im Anschluss in einer Simulationsumgebung modelliert werden. Mittels Parameterstudien werden in der Simulation Auslegungsdaten ermittelt sowie die energetische und wirtschaftliche Auswertung vorgenommen, und mit Systemvergleichen die Vorteilhaftigkeit und Limitierungen des Mehrquelleneinsatzes charakterisiert.

Parallel wird der Planungsfortschritt der Pilotanlage begleitet. Mit Beginn der Heizperiode 26/27 sind die Feldmessungen an der Pilotanlage vorgesehen. Mit Verfügbarkeit von Messdaten aus der Pilotanlage können auch Validierungen für die Systemkombination mit oberflächenflächennahen Kollektoren durchgeführt werden.

Ziel der Pilotanlage ist die Auswertung und Dokumentation eines Best-Practices Systems, das zusammen mit den Planungsempfehlungen und Systembewertungen aus der Simulation Vorteile und Einschränkungen von Mehrquellensystemen aufzeigen und deren Sinnhaftigkeit für die Praxisumsetzung demonstriert und zugänglich macht. Dazu werden begleitend zu den Simulationen die Planungsgrundlagen auf den Mehrquelleneinsatz erweitert und für günstige Systemkombinationen damit die Praxisumsetzung unterstützt.

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Bisher besteht keine nationale und internationale Zusammenarbeit statt, die über den Austausch mit den in der Literaturrecherche aufgeführten Projekten hinausgeht.

8 Publikationen und andere Kommunikation

Das Projekt ist als Kurzpräsentation mit Poster an der 30. BFE-Tagung des Forschungsbereichs Wärmepumpen und Kältetechnik vorgestellt worden [48]. Weitere Publikationen sind im Projektverlauf vorgesehen.



9 Literaturverzeichnis

- [1] BFS, *Statistiken, Bau- und Wohnungswesen, Gebäude: Energiebereich*, 2024.
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bau-wohnungswesen/gebäude/energiebereich.html> (accessed Dezember 2, 2025).
- [2] Wemhoener C., Meier C., Büttgenbach, S., Meier R., Huber R., Huber J., and Jacober M., “RenoSource: Pilot- und Demonstrationsprojekt «im Kehl», Baden: Mehrquellen-Wärmepumpensystem für den Wärmeerzeugersersatz mit Erdwärmesonden zur Spitzenlastdeckung,” 2. Zwischenbericht. Rapperswil, 2025.
- [3] Wemhoener C., Meier C., Buesser S., and Baetschmann M., “HP-Source: Integrationsmöglichkeiten von Wärmequellen,” Rapperswil, 2023.
- [4] SIA 384/6:2021. Erdwärmesonden.
- [5] Yang, L. W., Xu, R. J., Hua, N., Xia, Y., Zhou, W. B., Yang, T., Belyayev, Y., and Wang, H. S., “Review of the advances in solar-assisted air source heat pumps for the domestic sector,” *Energy Conversion and Management*, vol. 247, p. 114710, 2021.
- [6] Tan, Y., An, L., Wang, L., Hou, Z., Zhao, S., Liu, B., and Guo, Y., “Proposal and performance evaluation of a solar hybrid heat pump with integrated air-source compression cycle,” *Energy Conversion and Management*, vol. 321, p. 119097, 2024.
- [7] Namdar, H., Di Rossi Schio, E., Semprini, G., and Valdiserri, P., “Photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump systems for building applications: A technical review on direct expansion systems,” *Energy and Buildings*, vol. 334, p. 115516, 2025.
- [8] Li, Y., Cui, Y., Song, Z., Zhao, X., Li, J., and Shen, C., “Eco-economic performance and application potential of a novel dual-source heat pump heating system,” *Energy*, vol. 283, p. 128478, 2023.
- [9] Reum, T., Schmitt, D., Summ, T., Trinkl, C., Ochs, F., and Schrag, T., “Experimental analysis of parallel operation of two heat sources in a dual-source heat pump incorporating two compressors,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 171, pp. 124–138, 2025.
- [10] You, T., Wu, W., Yang, H., Liu, J., and Li, X., “Hybrid photovoltaic/thermal and ground source heat pump: Review and perspective,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 151, p. 111569, 2021.
- [11] Adebayo, P., Shor, R., Mohamad, A., Wemhöner, C., and Mwesigye, A., “Performance analysis of a solar-assisted ground source heat pump with a single vertical U-tube ground heat exchanger,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 257, p. 124452, 2024.
- [12] Xu, L., Pu, L., Zhang, S., and Li, Y., “Hybrid ground source heat pump system for overcoming soil thermal imbalance: A review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 44, p. 101098, 2021.
- [13] Wang, J. L., Yan, T., Tang, X., and Pan, W. G., “Design and operation of hybrid ground source heat pump systems: A review,” *Energy*, vol. 316, p. 134537, 2025.
- [14] Kirschstein, X., Ohagen, M., Reber, J., Vardon, P. J., and Bishara, N., “Regeneration of shallow borehole heat exchanger fields: A literature review,” *Energy and Buildings*, vol. 317, p. 114381, 2024.



- [15] Sommerfeldt, N. and Madani, H., "In-depth techno-economic analysis of PV/Thermal plus ground source heat pump systems for multi-family houses in a heating dominated climate," *Solar Energy*, vol. 190, pp. 44–62, 2019.
- [16] Liravi, M., Karkon, E., Jamot, J., Wemhoener, C., Dai, Y., and Georges, L., "Energy efficiency and borehole sizing for photovoltaic-thermal collectors integrated to ground source heat pump system: A Nordic case study," *Energy Conversion and Management*, vol. 313, p. 118590, 2024.
- [17] Sang, X., Qu, M., Yan, N., Li, Z., and Liu, H., "Energy, economic and environmental analysis of a photovoltaic-thermal integrated dual-source heat pump system under a system coefficient of performance – based switching strategy," *Energy and Buildings*, vol. 323, p. 114759, 2024.
- [18] Bordignon, S., Marigo, M., Carli, M. de, and Zarrella, A., "Evaluation of control strategies for a dual-source heat pump," *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 31, no. 10, pp. 1169–1180, 2025.
- [19] Corberán, J. M., Cazorla-Marín, A., Marchante-Avellaneda, J., and Montagud, C., "Dual source heat pump, a high efficiency and cost-effective alternative for heating, cooling and DHW production," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 13, no. 2, pp. 161–176, 2018.
- [20] Grossi, I., Dongellini, M., Piazzzi, A., and Morini, G. L., "Dynamic modelling and energy performance analysis of an innovative dual-source heat pump system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 142, pp. 745–759, 2018.
- [21] Natale, C., Naldi, C., Dongellini, M., and Morini, G. L., eds., *Long term performance analysis of a Dual-Source Heat Pump system by means of ALMABuild.*, 2023.
- [22] Natale, C., Dongellini, M., Naldi, C., and Morini, G. L., "Evaluation of the Seasonal Energy Performance of a Dual-Source Heat Pump Through Dynamic Experimental Tests," *Energies*, vol. 18, no. 10, p. 2532, 2025.
- [23] *Tri-HP*. www.tri-hp.eu (accessed Dezember 2, 2025).
- [24] Hobe, A., Birchler, D., Ruesch, F., and Carbonell, D., "Ice Grid: Yearly report 2023 Ice-Grid Implementation of ice storage tanks into 5GDHC networks as seasonal storage or load shifting element," Rapperswil, 2023.
- [25] Ruesch, F. and Schmitt, A., "AsphaltReg: Demonstration und Optimierung eines rezyklierbaren Asphaltkollektors zur Regeneration von Erdwärmesonden," SI/502561. Rapperswil.
- [26] Schmitt, A., Vassella, C., Kelevitz, K., Ruesch, F., Bosshard, I., and Philippen, D., "OblaTherm: Deckung des Kälte- und Wärmebedarfs eines Minergie-P Bürogebäude mit thermischer Aktivierung der Bodenplatte und PVT Kollektoren," Rapperswil, 2024.
- [27] Ruesch, F., Lichtensteiger, F., Bataglia, M., Haller, M., Villasmil, W., Ammann, S., Brauchli, L., and Worlitschek, J., "SensOpt - Sensible saisonale Wärmespeicherung optimal eingesetzt für die vollständig solare Beheizung von Mehrfamilienhäusern: Weiterentwicklung des Jenni-Aktivhauses in Bezug auf Raum- und Kosteneffizienz," Rapperswil, 2022.
- [28] Muller, V., Carisch, L., and Ménard, M., "Effiziente Abluft-Erdsonden-Wärmepumpe für die Gebäudeerneuerung: Wohnsiedlung Dettenbühl, Wettswil a. Albis," Schlussbericht, 2016.



- [29] Metz J., "Entwicklung und experimentelle Analyse eines Mehrquellen-Wärmepumpensystems aus Erdreich und Aussenluft," Dissertation. Freiburg im Breisgau, 2023.
- [30] Kropp M., Vadadkar S. V., Velte-Schäfer A., and Herkel S., "Vergleichende Betrachtung von verschiedenen Konfigurationen hybrider Wärmepumpensysteme im Mehrfamilienhaus-Bestand," In *Tagungsband Bausim 2024, Wien*.
- [31] energieschweiz, "Bewilligungsverfahren Erdwärmesonden in den Kantonen," 2017.
- [32] Bundesamt für Umwelt BAFU, *Wärmenutzung aus Boden und Untergrund: Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung*, 2009 (accessed September 5, 2024).
- [33] Huber Energietechnik AG, EWS, 2022.
- [34] geowatt engineering AG, *GeowattCore Online Plattform*. <https://geowatt.ch/de/geowattcore-online-plattform> (accessed Dezember 2, 2025).
- [35] Huber, A. and Ochs, M., "Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen mit der Software EWS-Druck Vers.2.0," Zürich, 2007.
- [36] 384/7. Grundwasserwärmenutzung.
- [37] energieschweiz, "Bewilligungsverfahren Grundwasserwärmenutzung in den Kantonen," Bern, 2017.
- [38] eawag, *Thermische Nutzung von Seen und Flüssen*. <https://thermdis.eawag.ch/de> (accessed Dezember 2, 2025).
- [39] Franziska Bockelmann, Markus Peter, Matthias Schlosser, "future:heatpump: Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen," Braunschweig, 2019.
- [40] Klaus Ramming, "Bewertung und Optimierung oberflächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle: Dissertation," 2007.
- [41] Victor Stauding, Volker Stockinger, Werner Jensch, "ErdEis: Erdeisspeicher und oberflächennahe Geothermie," Schlussbericht, 2019.
- [42] Bassetti S. and Rohner E., "Handbuch Erdwärmekörbe - Dokumentation, Auslegung und Anwendungsbeispiele," BFE Schlussbericht, 2004.
- [43] "Planungs- und Betriebsanleitung multiQ Geo," 2022.
- [44] "multiQ - Energiequellen für Sole-Wasser-WP,"
- [45] "Das Prinzio GGeoCollect: Planungs- und Installationshandbuch," Chemnitz.
- [46] "Einmal rechnen, Jahre sparen: Die richtige Leistung einer neuen Heizung,"
- [47] Hirsch, H., "Erdwärmekollektoren in Kombination mit Solarkollektoren als Quelle für Wärmepumpensysteme,"
- [48] Wemhoener C., "Forschungsprojekt MultiSource Mehrquellen-Wärmepumpensysteme für den monovalenten Wärmeerzeugerersatz," In *Tagungsband der 31. Tagung des Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kältetechnik des Bundesamts für Energie BFE*.



10 Anhang

- 10.1 Planungsgrundlagen Factsheets
- 10.2 Planungsgrundlagen von Wärmequellen
- 10.3 Einschränkungen von Wärmequellen
- 10.4 Einschätzung Quellenkombinationen anhand von Einschränkungen



Luftwärmetauscher (LWT) / Luft-Wärmepumpen

Funktionsweise

Ein Ventilator transportiert die Luft durch ein Wärmeregister (meist Lamellenwärmetauscher). Dabei wird die Luft abgekühlt und die Wärme auf ein Wärmeträgermedium übertragen. Sonderformen (z.B. Solar-Luft-Absorber, Energiezaun) benötigen keinen Ventilator.

Marktverfügbarkeit

Luftwärmepumpen sind bis ca. 25 kW in grosser Vielfalt und mässigen bis guten akustischen Eigenschaften erhältlich. Grössere Leistungen mit zunehmend schlechteren akustischen Eigenschaften und geringerer Vielfalt. Luftwärmetauscher (Luft/Sole, teils auch Luft/Kältemittel) sind bis zu sehr grossen Leistungen aus dem industriellen Umfeld verfügbar.

Bauformen	Besonders zu beachtende Punkte
• Luft/Kältemittel-WT • Direktverdampfung im LWT (üblich bei Luft-Wärmepumpen) • Luft/Sole-Wärmetauscher • Sole-Zwischenkreis transportiert die Wärme zum Verdampfer	• Abtauzyklen bei vereisendem Betrieb • Druckverlust und Spreizung luftseitig: Ventilatorleistung, Gesamteffizienz • Akustische Eigenschaften: besser mit zunehmendem WT-Volumen pro Leistung • Kältemittelmenge als begrenzender Faktor • Propan als Kältemittel mit guten Eigenschaften (Ökologie, Effizienz) gewinnt zunehmend Verbreitung bei aussen aufgestellten Wärmepumpen

Typische Kennwerte für Luftwärmepumpen (Direktverdampfung)	
Luftmengen	250 – 800 m ³ /kW Heizleistung, Spreizung luftseitig 2.5 – 7 K
COP	A2/W35: 3.1 – 3.5 [1]
Abmessungen	Platzbedarf in [m ²] ca. 0.7 + 0.1*(Leistung [kW]) für Ausseneinheiten bei Standard-Split-Wärmepumpen.
Platzierung	In, um und auf dem Gebäude möglich. Einschränkungen durch: akustische Emissionen, Platzverhältnisse, zulässige Dachlasten, Anforderungen an die Leitungsführung, gestalterische Aspekte
Investitionskosten	Luft/Sole-Wärmetauscher inkl. Installation + Anschlussleitungen: Kosten [CHF] = 31000 * ln(Leistung [kW]) – 35266 (Leistung nach EN 1048 [2] mit T _{luft,in} – T _{sole,in} = 15 K)
Lebensdauer	20 Jahre
Regularien/Normen	Lärmschutznachweis: Kantonal geregelt
Vorteile	Nachteile
• Hohe Leistungsdichte • Bewährte Technologie • Für Kühlung begrenzt nutzbar • Niedrige Investition	• Temperaturniveau tief im Winter • Grosse Kältemittelmenge bei Direktverdampfer • Gefahr der Vereisung • Akustische Emissionen=> Schallschutzanforderung • Verfügbarkeit grössere Leistungen

[1] Eschmann, M. Qualitätsüberwachung von Kleinwärmepumpen, energieschweiz, 2023

[2] EN 1408 Wärmeübertrager-Luftgekühlte Flüssigkeitskühler (Trockenkühltürme)-Prüfverfahren zur Leistungsfeststellung, 2014



Erdwärmesonden (EWS)

Funktionsweise

Das Wärmeträgermedium (üblicherweise Monoethylenglykol) fliesst in einem geschlossenen System durch die Erdwärmesonde in die Tiefe und wieder zurück und nimmt dabei die Wärme vom umgebenden Erdreich auf. Die Fluidtemperatur pendelt sich entsprechend der entnommenen Leistung, der Erdréichtemperatur und der thermischen Widerstände ein.

Bauformen	Besonders zu beachtende Punkte
• U-Rohr-Sonden (Simplex, Duplex) • Koaxialsonden • Spezialrohre mit erhöhter Druckfestigkeit oder verbessertem Wärmeübergang (Wellrohr) • Speichersonden (HEP)	• Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung • Durchmesser => Druckverlust (Energiebedarf für Pumpen), turbulente Strömung für besseren Wärmeübergang • Druckfestigkeit bei grösseren Tiefen • Prüfung alternativer Wärmeträger, z.B. Wasser, Wasser/Ethanol-Gemisch • Entzugsleistung vs. Entzugsenergie in Mehrquellensystemen • Thermische Festigkeit des Rohrmaterials bei Regeneration • Beeinflussung durch Nachbarsonden

Kennwerte	Wärmeentzug ohne Regeneration	Wärmeeintrag
Spez. Leistung	30-50 W/m [2]	30 W/m [1]
Spez. Energie	80-90 kWh/m/a	
Spreizung	3 K	5-10 K
Temperaturniveau	0-10°C	10 – 30°C
Abmessungen	• Länge (Bohrtiefe): 50 – 500 m • Rohraussendurchmesser: 32 – 63 mm (Koaxial: bis 130 mm)	
Platzierung	• Abstand zwischen Sonden: > 5 m • Mindestabstand zur Grundstücksgrenze: ca. 2-3 m (kantonal geregelt)	
Investitionskosten	• Bei kleinen bis mittelgrossen Anlagen 100 CHF/m, bei Grossanlagen und Sondenfelder 70 CHF/m inkl. Zuleitung und Hauseinführung	
Lebensdauer	• > 50 Jahre	
Regularien/Normen	• SIA 384/6:2021 [2] • Bewilligungsverfahren Erdwärmesonden in den Kantonen [3]	

Vorteile	Nachteile
• Temperaturen kaum abhängig von Aussen-temperatur • Bewährte Technologie • Für Kühlung nutzbar ohne Mehrkosten	• Hohe Investitionskosten • Zugang für Bohrgerät nötig (Sanierung) • Beeinflussung von Sonden in Nachbarschaft zu berücksichtigen nach SIA 384/6:2021 [1]

[1] Afjei, Th., Dott, R., Huber, A. Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen, BFE-Schlussbericht, Muttentz, 2010

[2] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband. SIA 384/6 Erdwärmesonden, 2021

[3] energieschweiz. Bewilligungsverfahren Erdwärmesonden in den Kantonen, 2017



Oberflächennahe Erdreichnutzung

Funktionsweise

Ein Rohr wird als Wärmetauscher im oberflächennahen Erdreich verlegt. Das Wärmeträgermedium nimmt beim Durchfliessen die Wärme aus dem umgebenden Erdreich auf. Idealerweise werden Erdregister in wasserspeichernde Untergründe verlegt. Das Erdreich wird durch die Solareinstrahlung und Regenwasser wieder regeneriert. Eine gezielte Bewässerung (z.B. mit Regenwasserrigole) kann die Leistung deutlich verbessern. Die energetischen Eigenschaften sind stark von der Erdreichbeschaffenheit abhängig. Die ungestörte Erdreichtemperatur im Winter nimmt mit der Tiefe zu, im oberen Bereich kommt jedoch die sommerliche Regeneration stärker zum Tragen.

Bauformen

Erdwärmekörbe: einzelne Körbe werden bis 5 m Tiefe vergraben

Spiralkollektoren/-sonden: Einbau in bis zu 12 m Tiefe mithilfe von Erdbohrern

Grabenkollektoren: Einbau eines flächigen oder auf Rohren basierenden Kollektors in lange Gräben

Ringgrabenkollektor: Kollektor wird ringförmig in schmalen Gräben um das Grundstück ausgelegt

Flächenkollektor: Grossflächig ausgelegtes Register, z.B. einzelne Rohre oder Kapillarmatten

Kennwerte	Erdwärmekörbe Spiralkollektor	Grabenkollektor	Flächenkollektor
Spez. Leistung	700-2000 W/Korb	80-140 W/m²	10-35 W/m²
Spez. Energie bez. Bodenfläche	56 kWh/(m²a)	150 – 220 kWh/(m²a)	60 – 70 kWh/(m²a)
Platzbedarf Unversiegelter Boden	15 – 37 W/m²		12.5 W/m²
Einbautiefe (Unterkante Kollektor)	Körbe 3 – 5 m Spiralkollektor bis 12 m	bis 2.5 m	bis 1.5 m
Platzierung	in unversiegeltem Boden		
Investitionskosten	1'500 CHF/kW Kälte	2'000 CHF/kW Kälte	
Lebensdauer	50 Jahre oder mehr		
Regularien/Normen	Grundlegende Anforderungen Erdreichnutzung in [1]		

Vorteile	Nachteile
• Bis ca. 12 kW Heizleistung können EWK • kostengünstiger als EWS sein. • Beim Neubau Nutzung von bestehenden • Baugruben	• Benötigen viel unversiegelte Fläche

[1] BAFU. Wärmenutzung aus Boden und Untergrund, 2009



Solarthermie

Funktionsweise

Der mit Rohren versetzte Kollektor wird von einem Wärmeträgerfluid durchflossen. Die Sonne heizt den Kollektor auf, das Wärmeträgerfluid übernimmt die Wärme und leitet sie ins System. Übliche Wärmeträgerfluide sind Wasser-Glykol-Gemische.

Mit abnehmender Senktemperatur und zunehmender Umgebungstemperatur steigt der Ertrag. Isolierte Kollektoren (abgedeckte Kollektoren und Röhrenkollektoren) reagieren weniger empfindlich auf kalte Umgebungstemperaturen und Wind.

Kollektoren für hohe Temperaturniveau haben als Quellen für EWS-Systeme keine grosse Bedeutung.

Bauformen:

- **Unabgedeckte Kollektoren**, auch als Hybridkollektor mit PV kombiniert (PV/T). Niedriges Temperaturniveau
- **Abgedeckte Kollektoren**. Mittleres Temperaturniveau
- **Röhrenkollektoren**. Höheres Temperaturniveau
- **Sonderformen** wie luftgekühlte Kollektoren, Vakuumflachkollektoren, Schwimmbadabsorber etc.

Kennwerte	Unabgedeckt
Spez. Leistung	Bis 600 W/m ² , abhängig von Temperaturniveau
Spez. Energie	150 kWh/(m ² a) (WW-Produktion) bis 400 kWh/(m ² a) (Regeneration)
Spreizung	10 - 20 K
Temperaturniveau	Bis ca. 50 °C (unabgedeckt) bzw. 100 °C (abgedeckt, Röhren)
Kosten (inkl. Installation)	300-500 Fr/m ² (je nach Ausführungsart)
Lebensdauer	> 25 Jahre

Vorteile	Nachteile
• Integration in Gebäudehülle möglich • Bewährte Technologie • Geräuschlos • Nutzung für direkte WW-Erwärmung möglich	• Hohe Investitionskosten • Speicher notwendig • Abhängigkeit der Leistung von der Senktemperatur



Grundwasser / Oberflächenwasser

Funktionsweise

Grundwasser oder Wasser aus Seen bzw. Flüssen wird zu einem Wärmetauscher geleitet. In diesem wird Wärme entzogen und auf ein sekundäres, üblicherweise mit Wasser-Glykol-Gemisch gefülltes Verteilsystem übertragen. Die Wärme kann damit zu einer einzelnen Wärmepumpe oder in einem Anergieverbund zu verschiedenen Verbrauchern transportiert werden. Das Wasser kann auch zur Rückkühlung verwendet werden.

In der Schweiz unübliche Varianten sind Wärmetauscher, welche direkt im Wasser liegen.

Besonders zu beachtende Punkte

- Die Nutzung von Grundwasser und Oberflächenwasser ist stark reguliert und muss mit den örtlichen Behörden geklärt werden.

Kennwerte	
Leistung	Beliebig. Abhängig von der Quellenergiebigkeit, dem benötigten Leitungsnetz (Anzahl Abnehmer) und den regulatorischen Vorgaben.
Spreizung	Max. 3-4 K, je nach Kanton
Temperaturniveau	Grundwasser: 8-12 °C Fluss- und Seewasser: 4-8 °C im Winter

Investitionskosten	Die Investitionskosten sind stark abhängig von der Anlagengrösse. Betriebskosten setzen sich zusammen aus • Strom für Pumpen • Konzession / Wasserzins • Unterhalt
Regularien/Normen	Bewilligungsverfahren Grundwassernutzung in den Kantonen [1]

Vorteile	Nachteile
• Hohe Quellentemperatur • Geräuschlos • Rückkühlung technisch möglich, z.T. regulatorisch eingeschränkt/verboten	• Hohe Investitionskosten • Stark reguliert • Eingeschränkte Verfügbarkeit

[1] energieschweiz. Bewilligungsverfahren Grundwassernutzung in den Kantonen, 2017



Abluft

Funktionsweise

Die im Gebäude erwärmte Abluft wird durch einen Wärmetauscher geleitet. Dieser überträgt die Wärme entweder in einen hydraulischen Kreislauf oder dient direkt als Verdampfer einer Luftwärmepumpe.

Im Gegensatz zur Aussenluft, ist die Abluft nur begrenzt verfügbar. Diese steht nur dann zur Verfügung, wenn gelüftet wird und dann auch nur in begrenzten Volumenströmen.

Besonders zu beachtende Punkte

- Aufstellung so, dass Rohrleitungssystem so kurz wie möglich ist
- Fortluftöffnung sollte nicht auf Hauptwindseite oder vor benachbarte Fenster platziert werden
- Braucht meist Spitzenlastabdeckung (bis max. Heizlast 10 W/m²)

Kennwerte	
Spez. Leistung	Ca. 11 W/m ³ (Abkühlung der Abluft auf 0°C)
Spreizung	15 – 45 K
Temperaturniveau	Ca. 23 °C (Wohn- und Bürogebäude) 5-15 °C (Tiefgaragenabluft)
Volumenstrom	EFH: 0.6 m ³ /(m ² h) [1] MFH: 1.0 m ³ /(m ² h) [1]

Investitionskosten	Die Kosten sind stark von der Anlagengrösse abhängig.
Lebensdauer	20 Jahre
Regularien/Normen	"SIA2024:2015" für Raumnutzungsdaten

Vorteile	Nachteile
• Hohe Quellentemperatur • Hohe Systemeffizienz	• Konkurrenzierung durch Lüftungs-WRG • Abluft nur in begrenzter Menge verfügbar • Notwendigkeit eines mech. Abluftsystems

[1] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA 2024 Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik, 2021



Abwasser

Funktionsweise

Mit einem Wärmetauscher wird dem Abwasser Wärme entzogen und über ein hydraulisches System der Wärmepumpe zugeführt.

Bauarten

Gebäudeintern: Das Abwasser eines Gebäudes wird zentral in einem Speicher gesammelt. Ein in diesem Speicher liegender Wärmetauscher entzieht dem Abwasser bei Bedarf die Wärme. Die zurückgewonnene Abwärme reicht für die Deckung des Warmwasserbedarfs.

Kanalwärmetauscher im Rohabwasser: Der Wärmetauscher ist in einem grösseren Sammelkanal eingebaut und entzieht dem Abwasser kontinuierlich die Wärme.

Kanalwärmetauscher im geklärten Abwasser: Die Wärme wird dem Abwasser nach der Kläranlage entzogen. Wegen der hohen Leistung wird diese Wärme üblicherweise in ein Anergienetz oder via Wärmepumpe in einen Wärmeverbund eingespeist, um damit grössere Überbauungen und Ortsteile zu versorgen.

Kennwerte	Gebäudeintern	Kanalwärmetauscher im Rohabwasser
Leistung	Ca. 2.5 W/m ² Wohnfläche	Ca. 4 kW/m Kanal Minimalabfluss 10 l/s (3000 Einwohnerwerte, DN400)
Spreizung	Bis 15K	Max. 1 K
Temperaturniveau	16-23 °C	Winter: 10-12 °C Sommer: 17-20 °C
Wirtschaftlichkeit, Wärmegestehungskosten	Ab 10 Wohneinheiten, 2.5 kW	Ab 100 kW 8-16 Rp/kWh
Regulierung	Keine Bewilligung notwendig	Bewilligung des ARA-Betreibers bzw. der Gemeinde notwendig.

Vorteile	Nachteile
• Hohe Quellentemperatur • Geräuschlos • Hohe Verfügbarkeit bei Wohngebäuden • Nachrüstung bestehender Kanäle möglich	• Hohe Investitionskosten • Regelmässige Reinigung notwendig • Platzbedarf (für Gebäudeintern)



10.2 Übersicht Planungsgrundlagen von Wärmequellen

(Daten beruhen teils auf einzelnen Informationsquellen und werden in Projektverlauf konsolidiert)

Wärmeübertragungssystem	Wärmequelle	Abmessung Überträger	Einbautiefe	Spez. Entzugs-/ Eintragsleistung	Energieentzug	Investitionskosten
Erdwärmesonde	Erdreich	Bohrloch Ø 70 – 185 mm	80 – 400 m	30 – 100 W/m 30 – 100 W/m	80-90 kWh/m/a	- Klein-mittelgross 100 CHF/m, - Grossanlagen/Sondenfelder: 70 CHF/m inkl. Zuleitung und Hauseinführung
Phasenwechselsonde	Erdreich	Ø 60 cm	bis 250 m Pilot:400-600 m	k. A.	k. A.	k. A.
Energiepfähle	Erdreich, Solar	Ø 0.6 m und grösser	10 - 30 m	40 – 85 W/m 20 – 60 W/m	k. A.	15 CHF/m plus 10 CHF/m für horizontale Anbindung
Flächenkollektoren	Erdreich, Solar, Niederschlag	Abstand Rohr 0.2 – 0.8 m	1.2 – 3 m	10 – 40 W/m ² 10 – 40 W/m ²	60 – 70 kWh/(m ² a)	2000 CHF/kW Kälteleistung inkl. Installation
Spiralkollektoren	Erdreich, Solar, Niederschlag	Ø 520 mm	bis 25 m	200 – 1500 W/Kollektor	55 kWh/(m ² a)	1500 CHF/kW Kälteleistung inkl. Installation
Erdwärmekörbe	Erdreich, Solar, Niederschlag	Ø 0.9 – 4 m	1.5 – 5 m	500–2000 W/Erdkorb	55 kWh/(m ² a)	1500 CHF/kW Kälteleistung inkl. Installation
Eisspeicher	Erdreich, Solar	Ø 2.7 und Sonderanfertigung	Bis 10 m tief	4 – 18 kW 3.5 – 7 kW	85 kWh/m ³ im Phasenwechsel	6000 CHF/m ³ bei kleineren Eisspeichern
Brunnen	Grundwasser	>Ø 0.6 Schacht Ø 0.25-0.3 Filterrohr	5 – 20 m abhängig von Lage des Grundwassers	500 – 600 W/(m ³ /h)	Abhängig von Mächtigkeit, Wasservolumen	Reine Bohrkosten: 80 – 185 CHF/m Komplette Anlage mit 2 Brunnen, WP 25'000 – 40'000 CHF inkl. Installation
Übertragungssysteme für Seen, Flüsse, Gewässer	Oberflächen- wasser	1.1 m x 1.1 m	3 – 30 m tief	6 – 15 kW/Einheit 6 – 26 kW/Einheit	Abhängig von Gewässer	Abhängig von Wärmetauscher
Abwasserwärmetauscher	Abwasser	1 m x 0.65 m	im Kanal	350 – 1800 W/m ²	Abhängig von Volumenstrom, ΔT	Abhängig von Wärmetauscher
Solar-Luft-Absorber	Luft, Solar	2 m ² /Kollektor	Aufdachinstallation/ Aussenaufstellung	< 60 W/m ² Luft < 600 W/m ² solar	150 kWh/(m ² a) 400 kWh/(m ² a)	Unabgedeckter Absorber 200 CHF/m ² , PVT 350 CHF/m ²
Abluft-Wärmetauscher	Abluft	nach Leistung	Innenaufstellung Aussenaufstellung	≈ 10 W/m ³ /h @ ΔT = 20 K	≈ 0.010 kWh/m ³ @ ΔT=20 K	Abhängig von Leistung
Luft-Wärmepumpe	Luft	nach Leistung	Innenaufstellung Aussenaufstellung Split-Gerät Dachinstallation	≈ 5 W/m ³ /h @ ΔT = 10 K	≈ 0.05 kWh/m ³ @ ΔT=10 K	Luft/Sole-Wärmetauscher inkl. Installation + Anschlussleitungen: Kosten [CHF] = 31000 * ln(Leistung [kW]) – 35266 (Leistung nach EN 1048 [2] mit T _{luft,in} – T _{sole,in} = 15 K)

Legende: **Rot** – Wärmeentzug aus der Quelle, **Blau** – Wärmeeinspeisung in die Quelle (bei Differenz)



10.3. Einschränkungen von Wärmequellen

	Klima				Standort								Eigenschaften				Rechtliche Rahmenbedingung				Wirtschaftlichkeit				Bemerkung					
	Aussenlufttemperatur	Saisonalität	Niederschlag	Einstrahlung	Bodenkennwerte	Grundwasser	Verfügbarkeit	Platzbedarf/Leistung	Zugänglichkeit	Bepflanzung	Tiefenbeschränkung	Dachlast	Verschattung	nachbarschaftliche	Eignung Kühlung	Überbaubar	Speicherfähigkeit	Sichtbarkeit	Lärmschutz	Genehmigung	Grundwasserschutz	Temperaturdifferenz	Denkmalschutz	Investition	Betriebskosten	Wartungskosten	Lebensdauer	Amortisation		
Wärmequelle																														
Natürlich																														
Aussenluft	X	X		X			(X)	X	X	X	x	X			X	X		X	X			(x)	X	X						
Solar-/Luft	X	X			X	X	X	X	X	(X)	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X		
Erdwärmesonde					X	X								X	X	X	X													
Erdregister, Grabenkollektor	X	X	X	X	X	(X)		X	X	X					X	X	X	X	(X)	(X)	X		(X)	X	X					
Spiralkollektor	X	X	X	X	X	(X)		X	X	X					X	X	X	X	(X)	(X)	X		(X)	X	X					
Erdwärmekorb	X	X	X	X	X	(X)			X	X					X	X	X	X	(X)	(X)	X		(X)	X	X					
Brunnen			(x)			X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X				
Oberflächenwasser	X	(x)	(X)	X			X		X					X	X	X	X							X	X					
Abwärme																														
Haus-Abluft						X	X	(X)										X						X	X				Passive WRG	
Haus-Abwasser						X	X									X	X			X			X	X	X				Verfügbarkeit in Nichtwohngebäuden	
Kanalabwasser														X	X	X	X		X	X				X						
Gebäudekühlung	X	X		X			X								X	X				X				X	X					
Industrieabwärme						X	X							X		X							X	X					Fallspezifisch	
Energienetz							X							X										X					Fallspezifisch	
Aktivierung																														
Fundamentplatte	X				X	X	X		X						X	X	X			X				(X)					nur im Neubau	
Energiepfähle	X				X		X								X	X	X													
Asphaltdalle	X																													
Speicher																														
Eis bzw. Latentspeicher	X			X												X													abhängig von Ladung	
Sensible Speicher	X			X																			X						AT bei Installation Erreich	
eTank					X											X	X												abhängig von Ladung	
eTank																								X					abhängig von Ladung	
Legende X ausgeprägt (X) wenig ausgeprägt ☐ keine Bedeutung																														



10.3 Einschätzung Wärmequellenkombinationen anhand von Einschränkungen

Primäre Quelle (Grundlast)	Aussenluft	Solarthermie/ PV/T	Erdwärmesonde	Erdkollektor	Eisspeicher	Fundamentplatte	Grundwasser	Oberflächenwasser	Abluft	Abwasser	Abwärme/ARA/ Gebäudekühlung
Sekundäre Quelle (Spitze)					Regenerationsquelle notwendig	nur Neubau					
Bemerkungen											
Luft		L, P, I, R	L, P, I, V	L, P, I	L, S, LÄ, P, R, T	L, S, LÄ, P, R, T	L, S, T, I, E, V	L, S, T, I, E, V	L, E	L, E	L, E
Solarthermie / PV/T	L, I, V		L, S, R, T, E	L, P, R	L, S, P, R, T, E	L, S, P, R, T, E	L, S, T, I, E, V	L, S, T, I, E, V	L, S, E	L, S, E	L, S, E
Erdwärmesonde	L, S, LÄ, R, T	L, S, E, V		L, R, E	L, R	L, R	L, E	L, E	L, E	L, E	L, E
Erdkollektor	L, S, LÄ, R, T	L, S, T, E	L, P, E		L, R	L, R	L, E	L, E	L, E	L, E	L, E
Eisspeicher	L, LÄ, R, T	L, R, T, E	L, P, R, V	L		L, R	L, E	L, T, I, E	L, E	L, E	L, E
Fundamentplatte	L, LÄ, R, T, I, V	L, P, R, T, I, E	L, I	L, I	L, R		L, E	L, S, T, I, E	L, E	L, E	L, E
Grundwasser	L, S, LÄ, P, R, T	L, S, P, R, T, E	L, P, T, E	L, S, P, R, T, E	L, S, P, R, T	L, S, P, R, T		L, S, T, I, E	L, E	L, E	L, E
Oberflächenwasser	L, LÄ, T	L, S, T, E	L, R	L, E	L, R, T	L, R, T	L, S, T, E		L, E	L, E	L, E
Abluft	L, S, LÄ, T, I	L, S, P, T, I	L, P, T, I	L, S, P, T, I	L, S, P, R, T, I	L, S, P, R, T, I	L, T, E	L, S, T, I, E		L, E	L, E
Abwasser	L, S, LÄ, R, T, I	L, S, P, T, I	L, P, T, I	L, S, P, T, I	L, S, P, R, T, I	L, S, P, R, T, I	L, T, E	L, S, T, I, E	L, E		L, E
Abwärme/ARA Gebäudekühlung	L, S, LÄ, T, V	L, S, P, T, I, E	L, P, T, I	L, S, P, T, I	L, S, P, R, T, I, E	L, S, P, R, T, I, E	L, T, E	L, S, T, I, E	L, E	L, E	

Legende: L - Leistungsbeschränkung S - Saisonalität LÄ - Lärm P - Platzsparend R - Regeneration T - Temperaturniveau I - Investition E - Energiebeschränkung V - Vorschriften