



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung

Schlussbericht vom 30.11.2023

HP-Source

Integrationsmöglichkeiten von Wärmequellen



Quelle: © Lägern Wohnen



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung

IET | Institut für
Energietechnik

 **OST**
Ostschweizer
Fachhochschule

Datum: 30.11.2023

Ort: Rapperswil

Subventionsgeberin:

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

Ko-Finanzierung:

Tend AG
Zürcherstrasse 39, 8952 Schlieren
www.tend.ch

Subventionsempfänger/innen:

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

Autor/in:

Carsten Wemhöner, OST IET, carsten.wemhoener@ost.ch
Christoph Meier, OST IET, christoph.meier@ost.ch
Simon Büscher, Rückenwind, simon.buesser@rwind.ch
Marc Bätschmann, Tend AG, marc.baetschmann@tend.ch

BFE-Projektbegleitung:

Dr. Carina Alles, carina.alles@bfe.admin.ch
Stephan Renz, renz@renzconsulting.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502144-01

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

Zusammenfassung

Mit einem massiven Ausbau von Wärmepumpen werden für eine hohe Effizienz auch gute Wärmequellen benötigt. Insbesondere im höheren Leistungsbereich ab 50 kW und bei dichter Bebauung weisen einzelne Wärmequellen wie die Aussenluft oder das Erdreich Einschränkungen hinsichtlich Lärm respektive Platz und Bohrtiefe auf. Im Projekt HP-source wurden Integrationsmöglichkeiten von Wärmequellen anhand von Systemsimulationen mit dem Ziel untersucht, die Einschränkungen zu umgehen und einen monovalenten Wärmepumpenbetrieb mit hoher Effizienz zu ermöglichen. Dabei wurde auf zwei Strategien fokussiert: Einer Spitzenlastdeckung, bei der beide Quellen auf einen Teil der Leistung ausgelegt und die Erdreichquelle für die Spitzenlast im Winter zugeschaltet wird, sowie einer Regeneration, bei der die Erdreichquelle im Sommer und in der Übergangszeit durch eine zweite Quelle regeneriert wird, die im Sommer auch allein betrieben werden kann. Dabei wurde festgestellt, dass mit beiden Strategien Einschränkungen von Einzelquellen umgangen und durch Synergien und Auslegungsvorteile zwischen den Quellen Effizienz- und Kostenvorteile genutzt werden können, die die Zusatzkosten für die Integration einer zweiten Quelle sogar überkompensieren können, was Mehrquellsysteme auch für einen Einsatz ohne Einschränkungen interessant macht. Bei reiner Spitzenlastdeckung kann die Erdreichquelle überproportional kleiner ausgelegt werden, und mit Regeneration lassen sich Sondenfelder ebenfalls deutlich kleiner dimensionieren, was Platz- und Bohrtiefenbeschränkungen entschärft und Lärmeinschränkungen auf Luftseite beseitigt. Abhängig vom Preisniveau ist eine Integration auch wirtschaftlicher als fossile Spitzenlastdeckung. Es ist daher sinnvoll, bei grösseren Anlagen immer auch Mehrquellsysteme im Planungsprozess zu untersuchen und die Planungsverfahren für Mehrquellenintegration weiterzuentwickeln, um die Praxisverbreitung zu erhöhen.

Résumé

Avec le développement massif des pompes à chaleur, de bonnes sources de chaleur sont également nécessaires pour une efficacité élevée. En particulier dans la plage de puissance supérieure, à partir de 50 kW, et dans les zones densément construites, certaines sources de chaleur comme l'air extérieur ou le sol présentent des restrictions en termes de bruit, d'espace et de profondeur de forage. Dans le cadre du projet HP-source, les possibilités d'intégration des sources de chaleur ont été étudiées à l'aide de simulations de systèmes dans le but de contourner les restrictions et de permettre un fonctionnement monovent de pompes à chaleur avec une grande efficacité. L'accent a été mis sur deux stratégies: Une couverture de la charge de pointe, dans laquelle les deux sources sont dimensionnées pour une partie de la puissance et la source géothermique est activée pour la charge de pointe en hiver, ainsi qu'une régénération, dans laquelle la source géothermique est régénérée en été et pendant la période de transition par une deuxième source qui peut également fonctionner seule en été. Il a été constaté que les deux stratégies permettent de contourner les restrictions imposées par les sources individuelles et de profiter d'avantages en termes d'efficacité et de coûts grâce aux synergies et aux avantages d'exploitation entre les sources, qui peuvent même surcompenser les coûts supplémentaires liés à l'intégration d'une deuxième source, ce qui rend les systèmes multi-sources intéressants pour une utilisation sans restrictions. En cas de couverture de la charge de pointe uniquement, la source souterraine peut être dimensionnée de manière proportionnellement plus petite, et la régénération permet également de réduire considérablement les champs de sondes.



Summary

With a massive expansion of heat pumps, good heat sources are also required for high efficiency. Particularly in the higher output range above 50 kW and in densely built-up areas, individual heat sources such as outside air or the ground have limitations in terms of noise, space and drilling depth. In the HP-source project, integration options for heat sources were investigated using system simulations with the aim of circumventing the restrictions and enabling monovalent heat pump operation with high efficiency. The focus was on two strategies: A peak load coverage, in which both sources are designed to cover part of the output and the ground source is switched on for the peak load in winter, and a regeneration, in which the ground source is regenerated in summer and in the transition period by a second source, which can also be operated alone in summer. It was found that both strategies can circumvent the limitations of individual sources and that efficiency and cost benefits can be exploited through synergies and design advantages between the sources, which can even more than compensate for the additional costs of integrating a second source, making multi-source systems also interesting for the use without restrictions. With pure peak load coverage, the ground source can be designed to be disproportionately smaller, and with regeneration, probe fields can also be designed significantly smaller.

Take-home messages

- Durch Integration von Wärmequellen können Einschränkungen, die bei Einzelquellen bei schwierigen Randbedingungen oder höheren Leistungen auftreten, entschärft bzw. ganz vermieden werden. Dies kann einen monovalenten Einsatz von Wärmepumpen ohne fossile Spitzendeckung auch unter schwierigen Bedingungen ermöglichen. Typische Einschränkungen sind bei der Wärmequelle Aussenluft beispielsweise Probleme mit Lärmemissionen und bei der Wärmequelle Erdreich Platz- und Bohrtiefenbeschränkungen, insbesondere bei hohen Wärmepumpenleistungen oder in Gebieten mit dichter Bebauung.
- Durch Synergien zwischen den Wärmequellen lassen sich je nach Konfiguration des Referenzsystems Effizienzvorteile erzielen, insbesondere wenn das Referenzsystem die Wärmequelle Luft einsetzt. Diese resultieren aus besseren Temperaturniveaus von beispielsweise Erdreichtemperaturen im Winter oder Aussenlufttemperaturen im Sommer. Speicherbare Quellen wie das Erdreich lassen sich durch eine zweite Quelle regenerieren, die allfällig vorteilhaft auch direkt eingesetzt werden kann.
- Durch Synergien zwischen den Wärmequellen können ebenfalls wirtschaftliche Vorteile erzielt werden, so dass die Zusatzkosten einer zweiten Wärmequelle durch Auslegungsvorteile kompensiert oder sogar überkompensiert werden können und damit ein Mehrquellsystem nicht zwangsläufig höhere Kosten aufweist als eine Einzelquelle. Damit können Mehrquellsysteme auch ohne Einschränkungen interessant sein und sollten daher im Planungsprozess als Variante immer mitberücksichtigt werden.
- Für eine weitere Marktverbreitung zur Nutzung der Vorteile von Mehrquellsystemen sollten Planungsverfahren weiterentwickelt und vereinfacht werden.



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Executive summary	8
1 Einleitung.....	13
1.1 Ausgangslage und Hintergrund.....	13
1.2 Motivation des Projektes.....	13
1.3 Projektziele.....	13
1.4 Abgrenzung	14
2 Literaturüberblick	15
2.1 Wissenschaftliche Forschungsarbeiten	15
2.2 Marktüberblick	15
2.3 Realisierte Projekte.....	17
3 Charakterisierung von Wärmequellen	18
3.1 Luft.....	18
3.2 Erdwärme	18
3.3 Solarwärme	20
3.4 Wasser.....	20
3.5 Abluft.....	20
3.6 Abwasser.....	21
3.7 Gebäudekühlung	23
3.8 Gewerbliche Abwärme.....	24
3.9 Kategorisierung der Wärmequellen	24
4 Hydraulische Integration	26
4.1 Herausforderungen bei der Kombination von Quellen.....	26
4.2 Typologien.....	27
4.3 Hydraulische Verschaltung im Quellenkreis.....	27
5 Kombination von Wärmequellen.....	29
5.1 Typologien und Zielerreichung	29
5.2 Vorgehen und Methode.....	31
5.3 Strategie Regeneration	35
5.4 Strategie Spitzenlastdeckung	44
5.5 Strategie Spitzenlastdeckung mit Regeneration	51
5.6 Verringerung Wärmebedarf im Lebenszyklus des Gebäudes.....	59
5.7 Strategie Vorwärmung	64
5.8 Strategie Grundlast.....	66
5.9 Zusammenfassung der Ergebnisse	67

6	Empfehlungen.....	68
6.1	Quellenintegration.....	68
6.2	Auslegung	69
6.3	Effizienz.....	69
6.4	Kosten und Wirtschaftlichkeit	69
6.5	Regelung und Betriebsüberwachung.....	70
7	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	71
8	Literaturverzeichnis.....	73
9	Anhang.....	76
9.1	Simulationsparameter.....	76
9.2	Lastprofile.....	76
9.3	Randbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	79
9.4	Validierung des Luftwärmetauschers.....	80
9.5	Validierung der Simulation "Solare Regeneration"	81
9.6	Fallbeispiel Kostenfeld	83



Executive summary

Das BFE-Projekt WP-Source hat die primäre Zielsetzung, Einschränkungen auf Seite Wärmequelle im höheren Leistungsbereich ab 50 kW zu entschärfen und einen monovalenten Wärmepumpenbetrieb auch dort zu ermöglichen, wo die Randbedingungen den monovalenten Betrieb mit einer einzigen Wärmequelle verunmöglichen. Dazu wurden Kombinationen von Wärmequellen betrachtet, um die Einschränkungen von einzelnen Wärmequellen zu überwinden. Auf dem Markt und in der Literatur gibt es bisher nur wenige Beispiele eines Mehrquelleneinsatzes. Am häufigsten ist die Kombination im Rahmen von Regeneration des Erdreichs, die inzwischen häufiger angewendet wird, insbesondere als solare Regeneration. Je nach Randbedingungen gibt es auch Potenzial für eine Effizienzerhöhung und Kostenreduktion durch Synergien der Wärmequellen.

Zur Kombination der Wärmequellen wurden verschiedenen Strategien betrachtet, wobei auf die Wärmequellen Luft und Erdreich fokussiert wurde, die in der Schweiz am häufigsten eingesetzt werden.

- Spitzenlastdeckung der primären Wärmequelle Luft durch die sekundäre Quelle Erdreich
- Regeneration der primären Wärmequelle Erdreich mit der sekundären Wärmequelle Luft sowie alleiniger Betrieb der Luft-Wärmequelle
- Vorwärmung der primären Wärmequelle Luft durch die sekundäre Wärmequelle Abluft
- Nutzung einer zweiten Wärmequelle Luft neben einer Grundlastquellen Abwasser, die über das ganze Jahr einen konstanten Anteil zum Wärmebedarf beiträgt

Die Untersuchung erfolgte mit dynamischer Simulation für einen Neubau mit hohem Anteil an Warmwasserwärmebedarf von 66% und einem Bestandsgebäude mit dominanter Heizwärmebedarf von 80% um die Unterschiede zu charakterisieren. Bei der Untersuchung stellte sich heraus, dass die grössten Potenziale in den ersten beiden Strategien liegen, weshalb diese schwerpunktmaessig untersucht wurden.

Ergebnisse der Strategie Spitzenlastdeckung

Für die Strategie Spitzenlastabdeckung mit Erdwärmesonden bieten sich Vorteile in Kombination mit Leistungsbeschränkungen der primären Wärmequelle, wie sie bei der Wärmequelle Aussenluft aufgrund von Lärmemissionen bestehen können. Bei reiner Erdreichquelle über Erdwärmesonden können hingegen Platzbeschränkungen für die Installation einer ausreichenden Anzahl von Sonden bestehen. Abbildung 1 zeigt die relative Sondenlänge im Vergleich zu einer 100% Erdwärmesonden-Wärmequelle für die durchgeführten Parametervariationen. Durch die Spitzenlastdeckung können beide Quellen Luft und Erdreich kleiner, z.B. auf 50% der erforderlichen Quellenleistung ausgelegt werden, wodurch Lärm- wie auch Platz- und Bohrtiefenbeschränkungen entschärft werden.

Die meisten Variationen zeigen ein robustes Verhalten, was eine Auslegung für unterschiedlichen Randbedingungen vereinfacht. Der grösste Unterschied besteht in der Sondenanordnung zwischen Linien- und kompaktem Feld. Letzteres zeigt starker degressives Verhalten, da die natürliche Regeneration durch die gegenseitige Beeinflussung der Sonden (Feldeffekt) beschränkt ist und eine Reduktion der Sondenlänge/-anzahl sowie eine geringere Belastung im Spitzenlastfall grösseren Einfluss hat.

Bei der Kombination von Luft als primärer Quelle und Erdreich für reinen Spitzenlastbetrieb wird dem Erdreich deutlich weniger Energie entzogen als bei reiner Erdreichquelle. Dadurch kann die gesamte installierte Sondenlänge überproportional reduziert werden, was weiter zur Überwindung von Einschränkungen beiträgt, die insbesondere bei Bestandsgebäuden bestehen. Bei kompakten Erdsondenfeldern entspricht die Reduktion der Sondenlänge ungefähr dem Energieentzug aus dem Feld, z.B. ca. 20% der gesamten Quellenenergie bei Auslegung auf 50% der gesamten Heizleistung. Die Simulationsergebnisse bestätigen weiterhin auch Effizienzvorteile durch bessere Quellentemperaturen und wirtschaftliche Vorteile.

Die Jahresarbeitszahl kann in den Simulationen in Abhängigkeit des Leistungsanteils über die Erdwärmequelle von knapp 3 (reine Luftquelle) bis 4.5 (reine Erdsondenquelle) gesteigert werden. Die Unterschiede zwischen Neu- und Altbau fallen relativ gering aus, da die niedrigeren Heiztemperaturen im Neubau durch den höheren Warmwasseranteil kompensiert werden.

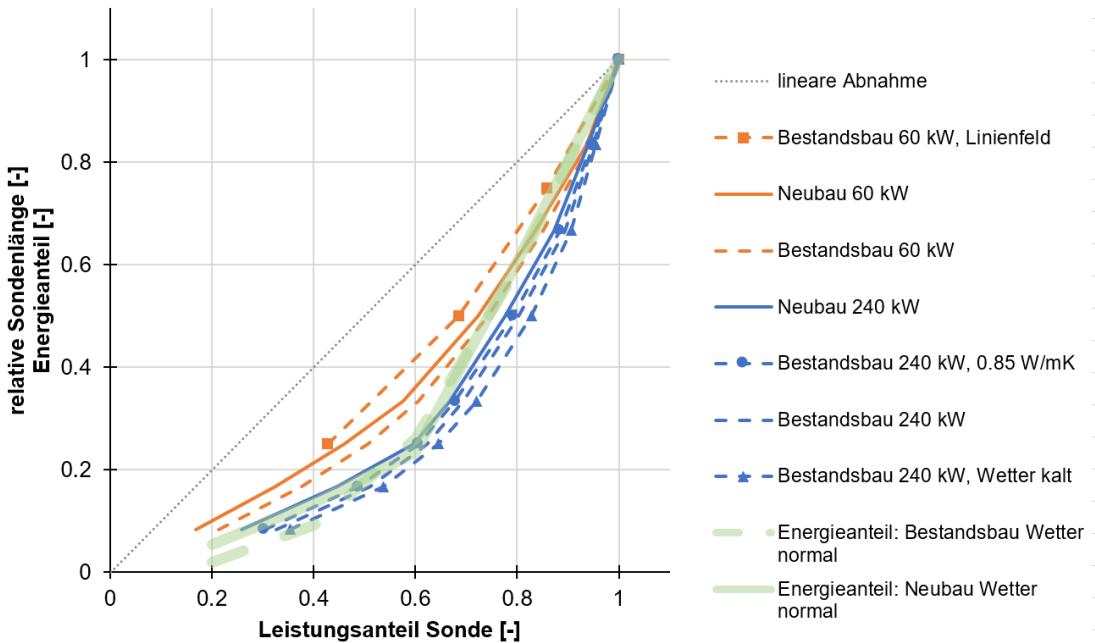


Abbildung 1: Parametervariationen für die Strategie "Spitzenlastdeckung"

Abbildung 2 zeigt die Kostenstruktur für ein Bestandsgebäude in Abhängigkeit des Leistungsanteils über die Erdsonde und im Vergleich zu einer bivalenten Lösung mit Erdgas für die Marktsituation im Juni 2022. Für die Wärmepumpenlösungen ergeben sich bei kleineren Leistungen von 60 kW Vorteile der Einzelquellen. Die Zusatzkosten für eine Wärmepumpenlösung sind mit 50 CHF/kW aber moderat und ermöglichen allfällig einen monovalenten Wärmepumpeneinsatz. Bei grösseren Leistungen verringern sich die Kostenvorteile der Einzelquellen oder weisen sogar höhere Kosten auf. Unter diesen Preis- und Kostenrandbedingungen ergeben sich sogar geringere spezifische Kosten der monovalenten Lösung nur mit Wärmepumpe als die Spitzendeckung über Erdgas. Im Neubau besteht im Vergleich zu reiner Luftquelle zusätzlich noch ein Kühlpotenzial über die Erdsonden.

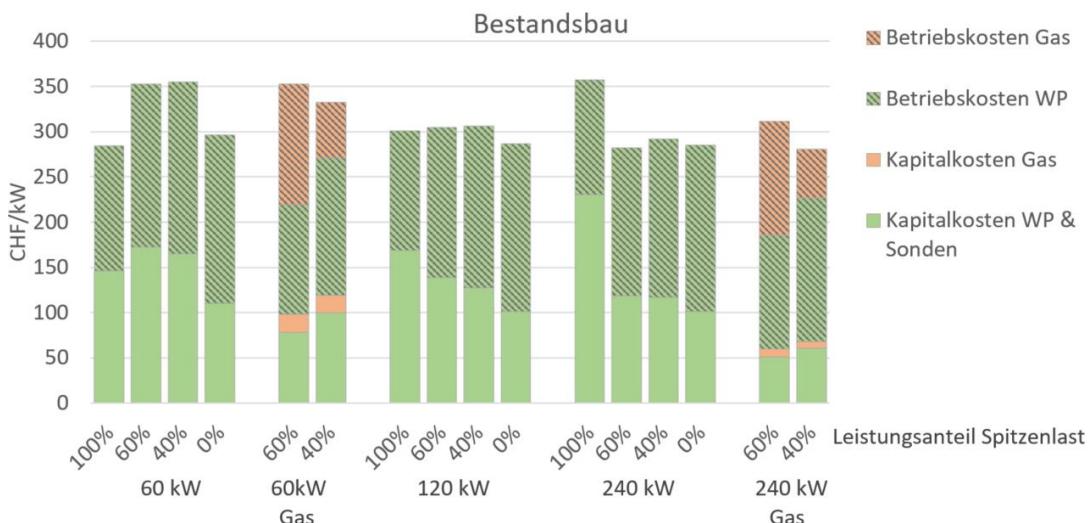


Abbildung 2: Wirtschaftlichkeit des Konzepts "Spitzenlastdeckung"



Ergebnisse der Strategie Regeneration

Die Auswertung erfolgte primär hinsichtlich erforderlicher Fläche und Bohrtiefe als Trade-off zwischen Kosten und Regenerationsgrad. Bei Regeneration können die Sonden mit geringerem Abstand zueinander angeordnet werden, was Optionen für mehr Sonden auf weniger Platz eröffnet. Zur Regeneration wurden Solarabsorber, PV/T-Kollektoren und Aussenluftwärmetauscher systematisch in Parametervariationen u.a. für verschiedene Gebäudegrößen, Sondenfeldgrößen, Bohrtiefen, Sondenabstände und Sondenanordnungen im Feld untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Regeneration wirtschaftliche Vorteile durch eine geringere notwendige Sondenlänge erzielt und damit auch Platz- und Bohrtiefenbeschränkungen umgangen werden können.

Die Kosteneinsparungen können in vielen Fällen die Investitionskosten für die Regenerationsquelle refinanzieren bzw. sogar überkompensieren. Bei solarer Regeneration kann beispielsweise eine kostenoptimale Auslegung als Verhältnis zwischen Kollektorfläche und eingesparter Sondenlänge erfolgen.

Der kostenoptimale Regenerationsgrad lag bei unterschiedlichen Parametervariationen im Bereich von 60-80%. Weiterhin wurde bestätigt, dass die Effektivität einer Regeneration bei grösseren Feldern und geringerem Sondenabstand steigt.

Aus den Ergebnissen wurde eine neue Darstellung entwickelt, welche für gegebenen Heizleistungsbedarf und Platzverhältnisse (Grundstücksfläche, Bohrtiefe) sowie den Kostenparametern die Notwendigkeit und Wirtschaftlichkeit einer Regeneration zeigt, die in Abbildung 3 links dargestellt ist.

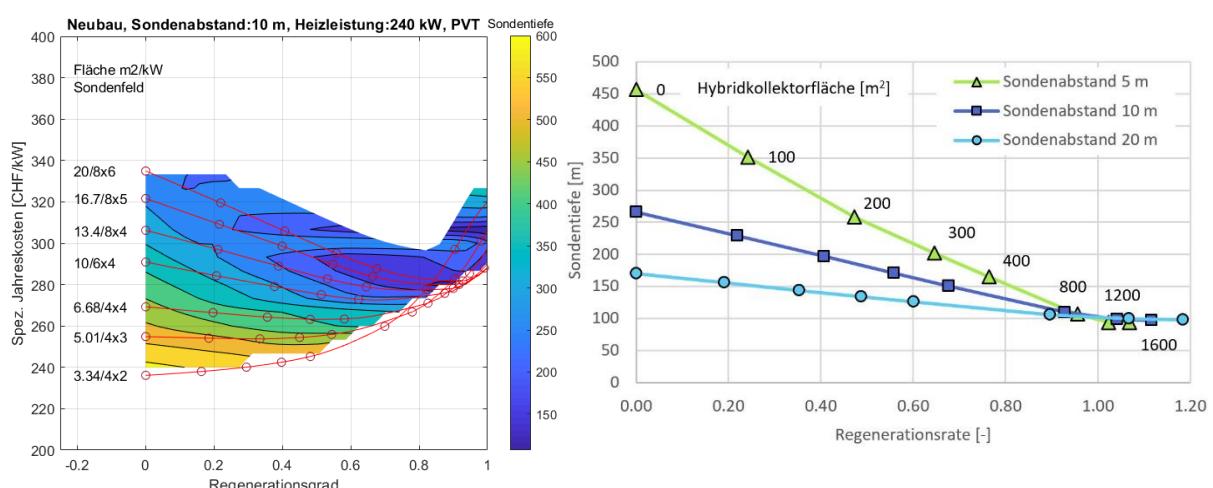


Abbildung 3: Jahreskosten abhängig vom Regenerationsgrad (links) und erforderliche Bohrtiefe (rechts)

Der Regenerationsgrad auf der x-Achse kann auch als Verteilung zwischen zwei Quellen interpretiert werden, wodurch sich diese Darstellung auch für andere Systeme wie die Spitzenlastdeckung nutzen lässt. Abbildung 3 rechts illustriert die notwendige Bohrtiefe abhängig vom Sondenabstand und Regenerationsgrad. Wenn ausreichend Platz vorhanden ist, kann die Auslegung ohne Regeneration und mit geringerer Bohrtiefe erfolgen. Platz- oder Bohrtiefenbeschränkungen können jedoch mit steigendem Regenerationsgrad überwunden werden, wobei die Regeneration bei engen Platzverhältnissen effektiver wird. Ab Regenerationsgraden von 60-80% sind keine grossen Änderungen mehr zu verzeichnen, aber die notwendige Regenerationsfläche und die Kosten der PV/T Kollektoren steigen stark an. Abbildung 4 zeigt die spezifischen Jahreskosten verschiedener Systemvarianten ohne bzw. mit Regeneration. Die niedrigsten Kosten werden bei dieser Auswertung mit dem unabgedeckten Solarkollektor (USK) kombiniert mit PV erreicht, allerdings liegen die Systeme nicht weit auseinander. Die wirtschaftliche Überlegenheit einzelner Lösungen wird zudem stark von den Kostenparametern (Bohrkosten, Tarifstruktur, Systemkosten, Verzinsung etc.) beeinflusst.

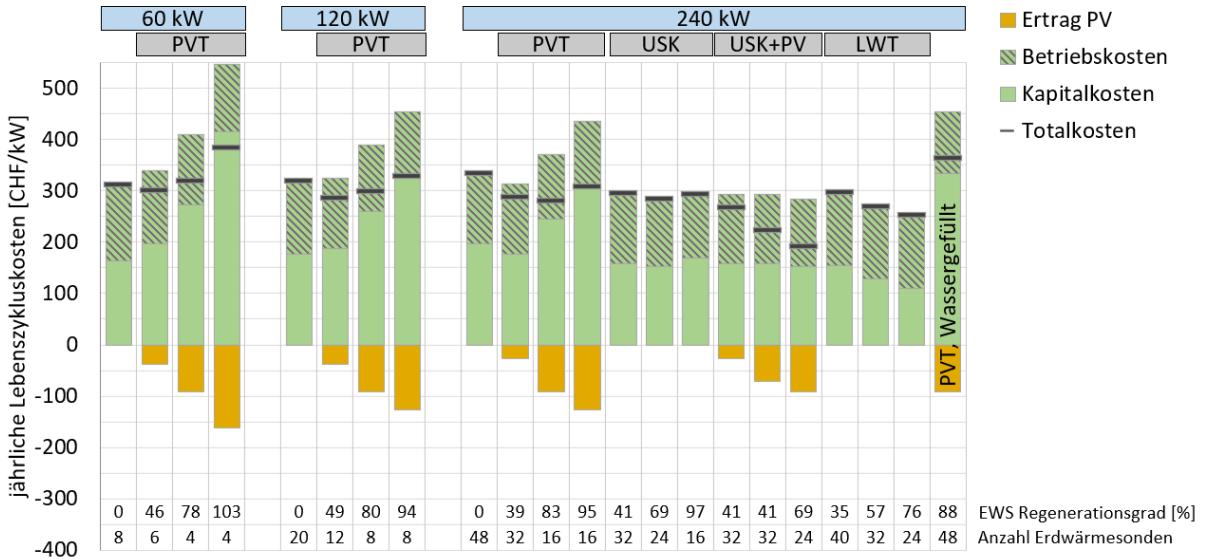


Abbildung 4: Wirtschaftlichkeit der Regeneration. Bei der Variante USK + PV wurde jeweils die gleiche Dachfläche genutzt wie bei der Variante PVT/T, jedoch die Dachfläche, welche nicht für die USK genutzt wird, mit PV belegt

Kombination der Strategien

Für grössere Leistungen kann sich auch eine Kombination der beiden Strategien "Regeneration" und "Spitzelastabdeckung" anbieten. Da durch die Spitzelastlastdeckung die Sondenanzahl bereits deutlich reduziert wird, die Effektivität einer Regeneration jedoch bei wenigen Sonden abnimmt, ist die Kombination erst bei höheren Leistungen sinnvoll. Die Regeneration sorgt für leicht höhere Arbeitszahlen und für eine zusätzliche Robustheit der Auslegung. Die Abbildung 5 zeigt die Jahreskosten für das untersuchte System mit 240 kW Heizleistung und 160 m tiefen Sonden.

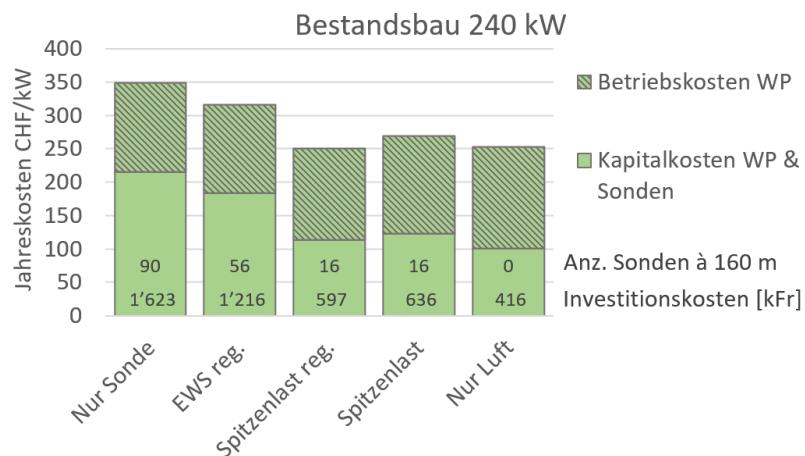


Abbildung 5: Jahreskosten für das System mit 240 kW und 160 m Sondenlänge

Durch die geringeren Leistungsanteile über das Erdreich im Spitzenlastkonzept sind die Effizienzsteigerungen nicht sehr ausgeprägt. Eine Überwachung der Sondeneintrittstemperatur ist notwendig um einer Unterkühlung vorzubeugen. Mit geregelter Rücklaufbeimischung wird die Sondeneintrittstemperatur auch bei kalten Austrittstemperaturen aus der Wärmepumpe stabilisiert. Die Kombination der Strategien wird in einem P&D Projekt des BFE zum Wärmeerzeugersatz eines 200 kW Heizkessels durch zwei Propan-Wärmepumpen mit den beiden Wärmequellen Außenluft und Erdreich im Praxisbetrieb über drei Heizperioden mittels Monitoring weiter untersucht. Anhand der Monitoringdaten können die Simulationsmodelle validiert und weiterentwickelt werden sowie erweiterte Untersuchungen zum Systemverhalten und der Regelung ausgewertet werden.



Einflüsse auf den Wärmebedarf im Lebenszyklus von Erdwärmesonden

Erdwärmesonden werden mit einer sehr langen Perspektive über 50 Jahre auf die dann vorliegenden Erdreichtemperaturen dimensioniert. Dadurch bestehen im Lebenszyklus gewisse Sicherheiten, da durch Klimawandel und/oder Gebäudesanierung der Leistungs- und Energiebedarf abnehmen kann. Der Einfluss der Klimaerwärmung auf die Quellenauslegung ist wesentlich geringer als der Einfluss schon einer leichten Sanierung. So ergeben sich schon im monovalenten EWS-System unter Berücksichtigung von Sanierungszyklen Dimensionierungsvorteile. In Mehrquellsystemen steigt das Einsparpotenzial hinsichtlich der Anzahl benötigter Erdsonden massiv an.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen das Potenzial, über Mehrquellenlösungen Einschränkungen verschiedener Einzelquellen zu überwinden und einen monovalenten Wärmepumpenbetrieb zu ermöglichen. Weiterhin können Effizienzsteigerung durch Nutzung der saisonal besten Temperaturbedingungen und Kosteneinsparung, insbesondere durch Einsparungen von Sondenlänge im Erdsondenfeld, erzielt werden, die die Kosten der weiteren Quellen kompensieren oder sogar überkompensieren, was Mehrquellenlösungen auch für Anwendungsfälle ohne Einschränkungen attraktiv erscheinen lässt. Die Kombination von Wärmequellen ist nicht auf die hier betrachtete Kombination von Aussenluft und Erdwärmesonden limitiert. Die Aussenluft steht dabei vielmehr stellvertretend für eine leistungsbegrenzte Quelle, bei Aussenluft etwa durch Lärmschutzanforderungen, und das Erdreich für eine speicherbare Wärmequelle, die aber ebenfalls Einschränkung unterworfen sein kann. Als weitere Kombinationen kommen z.B. auch Grundwasser oder Oberflächenwasser mit begrenztem Fördervolumen oder Abwärme mit begrenzter Leistung in Kombination mit Luft oder Erdwärmesonden in Frage.

Beim Konzept der Regeneration dient die zweite Quelle primär der Bewirtschaftung der speicherbaren primären Wärmequelle. Darüber hinaus kann die Regenerationsquelle aber auch z.B. den Sommerbetrieb allein übernehmen, und dadurch saisonale Vorteile, bei solarer Regeneration etwa das gute sommerliche Strahlungsdargebot und bei Luftpärmetauscher die höheren Sommertemperaturen nutzen und damit die Regeneration der primären Wärmequelle weiter befördern. Dabei muss aber auch eine allfällig höhere Komplexität der Anlage beachtet werden.

Teils können durch die Kombination auch weitere Betriebsarten, wie ein Freecooling-Betrieb bei zusätzlichem Einsatz von Erdsonden ermöglicht werden. Allerdings hängt die Nutzung dieser Freecooling-Möglichkeiten auch von Flächenübergabesystemen im Gebäude ab, was die Anwendung klassischerweise auf den Neubau beschränkt.

Im Rahmen des Projekts wurden reine Wärmepumpenlösungen untersucht. Darüber hinaus können aber die erarbeiteten Konzepte auch für eine Kombination mit anderen Wärmeträgern bzw. Wärmeerzeugern sinnvoll sein. In Kombination mit Fernwärme oder Niedertemperaturabwärme können dank der Abdeckung der Spitzenlast mit Erdwärmesonden mehr Gebäude ans Netz angeschlossen werden. Das Lastprofil für die vom Netz bezogene Energie verschiebt sich durch die Erhöhung des Warmwasseranteils zu mehr Grundlast, d. h. die Abwärme als ARA- oder Fernwärmekopplung kann besser genutzt werden und bestehende Netze können ohne Vergrößerung der Leitungsdurchmesser/Erzeugerleistung mehr Gebäude versorgen bzw. es steht mehr Wärme für Hochtemperaturanwendungen wie Bestandsgebäude zur Verfügung.

Die Ergebnisse legen nahe, dass Einzelquellen teils wirtschaftlich ineffizient sind und über Mehrquellsysteme bessere Systemlösungen mit Effizienz- und Kostenvorteilen erschlossen werden können, die zusätzlich einen monovalenten Wärmepumpenbetrieb durch Umgehen von Einschränkungen der Einzelquellen ermöglichen.

Um Mehrquellsysteme stärker in die Anwendung zu bringen, sollten daher Planungsrichtlinien weiterentwickelt werden und die gängige Qualitätssicherung wie das Wärmepumpensystemmoduls auf höhere Leistungen und Mehrquellsysteme erweitert werden. Dazu können in einen Leitfaden Auslegungsregeln und Anwendungsfälle im Sinne von Standardsystemlösungen ausgearbeitet werden, die mit Planungstools ergänzt und unterstützt werden können, wobei auch bestehende Planungstools integriert werden können. Eine Zusammenarbeit mit Stakeholdern würde sich dafür anbieten.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Der anthropogene Treibhauseffekt ist inzwischen auch in der Schweiz deutlich spürbar. Um ambitionierte Klimaziele, die für die Qualität des menschlichen Lebens bzw. Überlebens entscheidend sind, ist eine möglichst schnelle Reduktion der CO₂-Emissionen notwendig. Der Gebäudebestand trägt mit über 40% zum Energieverbrauch auf End- und Primärenergieebene bei, verursacht ca. 25% der CO₂-Emissionen und wird immer noch zu über 60% mit fossilen Energieträgern versorgt, davon ca. 40% Ölheizungen mit noch höherem CO₂-Ausstoss als die restlichen ca. 20% Gasheizungen. Neben einer Gebäudehüllensanierung bietet daher ein Wärmeerzeugerersatz von fossilen Kesseln auf Wärmepumpen aufgrund der geringen CO₂-Fracht des Schweizer Elektrizitätsmixes eine einfache Möglichkeit, schnelle CO₂-Reduktionen zu erreichen. Eine Studie der Uni Genf bestätigt CO₂-Reduktionspotenziale bis über 90%. Das BFE geht von einem Bedarf für Wärmeerzeugerersatz von 30'000 Anlagen/Jahr [1] in diesem Jahrzehnt aus. Diese Chance muss für eine Umstellung auf nachhaltige Heizsysteme genutzt werden, da jeder neu installiert fossile Kessel die Gefahr birgt, noch Jahrzehnte betrieben zu werden. Auch die Energieperspektiven 2050+ [2] und die daraus entwickelte Wärmestrategie [3] gehen von einer Verfünffachung der Wärmepumpen für eine Defossilisierung des Gebäudesektors aus. Für die notwendige massive Integration von Wärmepumpen müssen aber auch qualitativ gute Wärmequellen erschlossen werden bzw. zur Verfügung stehen. Wärmepumpensysteme mit einer Wärmequelle (Luft, Erdreich, Wasser, ...) haben sich in der Schweiz am Markt für kleinere Leistungen bis 20 kW bereits gut etabliert [4]. Für grössere Gebäude können sich jedoch, insbesondere bei hohen Leistungen und dichter Bebauung wie im städtischen Gebiet bei Bestandsgebäuden Einschränkungen ergeben, unter anderem auch hinsichtlich der Erschliessung der Wärmequellen, welche ein Wärmepumpensystem mit nur einer Quelle massiv verteuern oder sogar verunmöglichen.

1.2 Motivation des Projektes

Es werden folgende Zielsetzungen einer Integration mehrerer Wärmequellen untersucht:

1. Ermöglichung einer Wärmepumpenanlage, wenn dies aus technischen oder finanziellen Gründen mit einer Wärmequelle nicht möglich ist
2. Reduktion der Investitionskosten durch Substitution der Erschliessungskosten der einen Wärmequelle durch die Nutzung einer zweiten günstigeren Quelle
3. Steigerung der Effizienz durch Erhöhung der Quellentemperatur mithilfe einer zweiten Quelle und damit Reduktion der Betriebskosten

Der Schwerpunkt dieser Studie liegt auf der ersten Zielsetzung. Für die Defossilisierung des Gebäudeparks ist es zwingend notwendig, Lösungen für grössere Bestandsgebäude zu entwickeln. In diesen Gebäuden werden oft aufgrund der Schwierigkeiten in der Erschliessung der Wärmequelle fossile Wärmeerzeuger nicht durch Wärmepumpen ersetzt. In dieser Studie werden die technischen Integrationsmöglichkeiten unterschiedlicher Wärmequellen betrachtet, mit denen die Einschränkungen einzelner Wärmequellen überwunden werden können. Dabei sollen insbesondere Wärmequellen untersucht werden, welche sich durch geschickte Kombination gegenseitig ergänzen oder über Synergien ein besseres Betriebsverhalten erzielt wird. Neben den technischen Untersuchungen wird auch eine wirtschaftliche Bewertung der Kombinationen vorgenommen.

1.3 Projektziele

Folgende Ziele werden mit dem Projekt verfolgt:

- Identifikation von vielversprechenden Kombinationen von Wärmequellen für den höheren Leistungsbereich über 50 kW.



- Erarbeitung von günstigen hydraulischen/regelungstechnischen Integrationsmöglichkeiten
- Bewertung der energetischen Performance und Wirtschaftlichkeit von kombinierten Wärmequellen
- Empfehlungen hinsichtlich der Integration von Wärmequellen für den grösseren Leistungsbereich

Dazu werden folgende Forschungsfragen untersucht:

- Welche Eigenschaften (Vorteile/Einschränkungen) weisen die unterschiedlichen Wärmequellen hinsichtlich einer Kombination zur Versorgung von Gebäuden mit höherem Leistungsbedarf auf?
- Welche Kombinationen von Wärmequellen ergeben Vorteile für die Versorgung von Gebäuden mit höherem Leistungsbedarf?
- Lassen sich durch Wärmequellenkombination Einschränkungen beim Wärmeerzeugersatz überwinden?
- Wie wirken sich Mehrquellensysteme auf die Auslegung von bivalenten Systemen aus?
- Wie lassen sich unterschiedliche Wärmequellen am besten hydraulisch integrieren?
- Welche Effizienz und welche wirtschaftliche Bewertung ergibt sich für die Integration von Wärmequellen?
- Ergeben sich Synergien bei der Kombination von Wärmequellen, die zu einer Kostenreduktion beitragen können bzw. wirtschaftliche Vorteile einer Kombination aufweisen

1.4 Abgrenzung

Der Schwerpunkt des Projekts liegt in der Untersuchung von Mehrquellenlösungen für den Wärmeerzeugersatz in Mehrfamilienhäusern in dicht besiedelten Gebieten, insbesondere Städten. In der Schweiz befinden sich diese mehrheitlich im Mittelland. Folgende Situationen werden daher nicht betrachtet:

- Bergregionen und erhöhte Lagen (erhöhter Heizleistungsbedarf, höhere solare Erträge im Winter)
- EFH und kleine MFH
- Ländliche Standorte, Gebäude mit viel Umschwung
- Rein gewerbliche Bauten

Neubauten und Gebäude in Mischnutzung werden begrenzt untersucht.

Der Regelfall ist gegenwärtig die Nutzung von einer Wärmequelle. Es wird davon ausgegangen, dass im Normalfall, sofern es keine Einschränkungen gibt, die Nutzung nur einer Wärmequelle stets einfacher und ökonomischer ist als die Einbindung einer zweiten Wärmequelle. Ausnahmen von dieser Regel sind, wenn die zweite Wärmequelle einen anderen Hauptnutzen hat und die Erschliessung dieser Wärmequelle nicht in einer Einschränkung der primären Quelle begründet liegt (z.B. Free-Cooling).

Als Mehrquellensysteme im Sinne dieses Projekts werden Systeme bezeichnet, welche mehrere Wärmequellen auf einem Temperaturniveau unterhalb der Nutztemperatur aufweisen und damit für alle Quellen eine Wärmepumpe benötigen. Ein Grenzfall sind Systeme mit einem Quellspeicher (z.B. Eisspeicher) mit einer Regenerationsquelle. Wenn zusätzlich zum Quellspeicher auch die Regenerationsquelle direkt auf die Wärmepumpe geschaltet werden kann, wird es als Mehrquellensystem betrachtet. Ein fliessender Übergang besteht bei Systemen mit selbst regenerierendem Quellspeicher. So stammt bei einem Eisspeicher je nach Ausführung bis zur Hälfte der Regenerationswärme aus dem umgebenden Erdreich und nur die fehlende Menge aus einer technischen Regeneration [5], [6]. Die gleiche Abgrenzungsproblematik besteht bei Energiepahlsystemen oder Erdwärmesonden mit vollständiger Regeneration.

2 Literaturüberblick

2.1 Wissenschaftliche Forschungsarbeiten

In der Forschung wurden bereits verschiedenste Mehrquellen-Systeme behandelt. Meist steht dabei die Effizienz bzw. deren Steigerung im Vordergrund. Dazu gehören zum Beispiel Systeme mit Vorwärmung oder Erdsondenfelder, bei denen mehr Regenerationswärme zugeführt wird als von der Wärmepumpe entzogen wird, was eine Aufladung bzw. saisonale Speicherung im Erdreich bewirkt [7].

Zu den Möglichkeiten, wie mit der Kombination von zwei oder mehr Quellen technische Hindernisse überwunden oder Kosten eingespart werden können, sind weniger Arbeiten zu finden. Insbesondere wurden bei der Literaturrecherche keine systematische Übersicht über grundsätzlich sinnvolle Kombinationen von Quellen gefunden.

In der internationalen Forschung wird oftmals der für schweizerische Verhältnisse wenig relevante Fall von stark kühldominierten Gebäuden mit entsprechend hohen Aussentemperaturen behandelt. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen werden daher teilweise Komponenten verwendet, die im Heizbetrieb nicht eingesetzt werden können.

- In [8] wird die Kombination von Erdsonden mit Kollektoren bei Einfamilienhäusern behandelt. Da bei Einzelsonden die Regeneration nur einen sehr kleinen Einfluss hat, konnten außer dem Effizienzgewinn keine weiteren Vorteile gefunden werden.
- In [9] wird der Einfluss auf die Effizienz der Vorwärmung in Kombination mit verschiedenen Primärquellen, welche das Gebäude auch alleine versorgen könnten, untersucht.
- In [10] werden verschiedene Möglichkeiten verglichen, um die Abkühlung durch Nachbarssonden auszugleichen.
- In [11] werden die Quellen Aussenluft sowie die Quellen Grund- und Meerwasser kombiniert für die Wärmeversorgung eines ganzen Quartiers. Auch hier wurde nur die Effizienz ausgewertet.

2.2 Marktüberblick

Mehrquellsysteme bestehen aus verschiedenen Komponenten (Wärmepumpe, Hydraulikgruppe, Solarabsorber, Steuerung etc.), welche in passender Weise verschaltet werden und miteinander interagieren. Eine wichtige Rolle spielt dabei auch die fachgerechte Planung und Ausführung. Im Marktüberblick wird deshalb unterschieden zwischen

- Einzelkomponenten / Teilsysteme: Einzelne Anlageteile (z.B. Wärmepumpe, Hydraulikgruppe), welche spezifisch für die Anwendung in Mehrquellsystemen angeboten werden.
- Anbieter von Gesamtsystemen: Der Fokus liegt hier auf der Planung und Zusammenstellung von Einzelkomponenten zu einer Anlage.

2.2.1 Einzelkomponenten/Teilsysteme

Auf dem Markt sind nur wenige Produkte erhältlich, welche spezifisch für mehrere Quellen angeboten werden.

- Consolar Solink [12]: Hybridkollektor mit integrierten Luftlamellen auf der Rückseite. Der Kollektor dient insbesondere in Eisspeichersystemen als Regenerationsquelle. Durch die Luftlamellen kann auch noch Wärme geliefert werden, wenn die Sonne nicht scheint. Die Kollektoren können auch für die Wärmeabgabe (Kühlung) genutzt werden, z.B. zur Nachtauskühlung im Sommer



- Energiezäune nutzen ebenfalls Sonne und Luft als Quelle. Der Energiezaun kann zu einem Teil im Boden eingegraben werden, damit auch die oberflächennahe Erdwärme genutzt werden kann. Es sind verschiedene Produkte auf dem Markt erhältlich, welche je nach Ausführung und Aufstellungsplatz die eine oder andere Quelle stärker nutzen. Üblicherweise dient als Wärmeträgermedium ein Wasser-Glykol-Gemisch.
- Das System Terrabooster bietet Außenluftwärmetauscher als Zusatzmodul für den Einsatz mit erdgekoppelten Wärmepumpen mittels eines Sole-Zwischenkreises im Leistungsbereich um 10 kW. [13]
- Wärmepumpen
 - Glen Dimplex System Zero mit 2 Verdampfern (Luft, Sole), 60 kW Heizleistung [14]
 - Therm Select Hybridwärmepumpe (Luft mit Solezwischenkreis, Sole, auf einen Verdampfer) mit 40 kW Heizleistung [15]
 - Stiebel Eltron LWZ 8 CS Premium, Luft-Wärmepumpe (8 kW) mit integriertem Lüftungsgerät. Nutzung der Abluft zur Vorwärmung der Außenluft als Quelle [16]
 - Viele Serien-Sole/Wasser-Wärmepumpen im Leistungsbereich bis 100 kW haben eine Kühlfunktion integriert. Die aus dem Gebäude entzogene Wärme wird in die Erdwärmesonde eingeleitet und trägt zur Regeneration bei.
 - Kleinere Geräte bis ca. 20 kW teils mit integriertem Wärmetauscher für Free-Cooling
 - Größere Geräte: Free-Cooling in der Regelung integriert (Ansteuerung der Ventile)
 - Vereinzelt mit Vierwege-Ventil im Kältekreis für eine aktive Kühlung
- Dynamischer Energiemanager: Regelt die Nutzung verschiedener Quellen wie Luft, Solar und eTank [17]



Abbildung 6: Consolar Solink Hybridkollektor (links). Glen-Dimplex Zero (Mitte links), Stiebel-Eltron LWZ 8 CS premium (Mitte rechts) und Terrabooster Wärmetauscher (rechts)

2.2.2 Komplettsysteme und Planersysteme

Komplettsysteme bestehen aus aufeinander abgestimmten Komponenten und werden von einem Hersteller "aus einer Hand" angeboten. Ein fließender Übergang besteht zu den Planersystemen, welche projektspezifisch mit Komponenten unterschiedlicher Hersteller geplant werden. Nachfolgende Auflistung zeigt einige Beispiele:

- Energie Solaire SA hat mit EARTHSOL und ICESOL zwei Gesamtsysteme im Angebot, welche die Solarenergie im Erdreich bzw. in einem Eisspeicher einlagert. Dabei kann auch eine Wärmerückgewinnung aus z.B. Abwärme eingebunden werden.
- Allianz 2SOL: Allianz aus Planern, Herstellern und Installateuren, um Systeme mit regenerierter Erdwärmesonde im Markt zu verbreiten.
- Naef Energietechnik plant Systeme mit Erdwärmesonden, kombiniert mit einem Kältespeicher, welcher mit einer Solarthermieanlage beladen wird. Dadurch kann die Erdwärmesonde entlastet werden.
- Verschiedenste Planungsbüros planen Systeme mit kombinierten Wärmequellen, wobei dies immer noch eine Nischenanwendung ist.

2.2.3 Fazit aus der Marktrecherche

Das Angebot an spezifisch für Mehrquellsysteme hergestellten Produkten ist sehr dünn. Mögliche Gründe:

- Mehrquellsysteme sind wenig verbreitet
- Mehrquellsysteme werden meist aus Standardkomponenten zusammengestellt
- Mehrquellsysteme sind sehr individuell in Ausführung und Dimensionierung, die Herstellung spezifischer Produkte lohnt sich daher kaum.
- Allfällige Vorteile sind wenig bekannt, daher existiert auf dem Markt wenig Nachfrage

2.3 Realisierte Projekte

Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt eine Auswahl von realisierten Mehrquellenanlagen in verschiedensten Ausführungen.

Tabelle 1: Auswahl an realisierten Bauprojekten mit Mehrquellsystemen

Gebäude	Quellen	Details
MFH Feldmeilen Sanierung	Erdreich (EWS) Solar	System 2SOL (Regeneration) [18]
MFH Dettenbühl Wettswil Sanierung	Erdreich (EWS) Abluft	Nachgerüstete Abluftanlage (Zuluft über Fensterschlitzte) mit Abluftwärmepumpe (Energie WW + 40% Heizen). Erdsonden für Spitzenlast (Energie 60% Heizen) [19]
Schulhaus Fully Neubau	Erdreich (Energiepfähle) Gebäudekühlung	Heizleistung 56 kW, 41 Pfähle mit durchschnittlich 23.2 m Tiefe [20]
Schule Neumarkt i. d. Opf., DE Neubau	Erdreich (Erdkollektoren, Energiepfähle), Abwärme Kühlung	[21]
MFH Kulmbach, DE Neubau	Luft Solar	Luftwärmetauscher in bestehendem Felsenkeller im Berg. Solarregister unter Dachziegeln. [22]
Restaurant Lägern Hochwacht Regensberg Sanierung	Solar Abwärme Eisspeicher	Solar für Regeneration und Direktnutzung. Abwärme aus der Gastronomie. Nutzung eines bestehenden Bunkers für den Eisspeicher [23]
MFH Ettenbergstrasse Wettswil a. Albis Sanierung	Erdreich (EWS) Luft	Luftwärmetauscher in Solekreis eingebunden. Nutzung der Luft direkt ($T_a > 5^\circ\text{C}$) und für Regeneration, Entlastung der 15-jährigen, zu knapp dimensionierten EWS-Anlage [24]
MFH Durlachstrasse Karlsruhe, DE Sanierung	Erdreich (EWS) Luft PV/T Kollektoren	Demonstrationsobjekt des Fraunhofer ISE mit neuer Mehrquellenhydraulik [25]



3 Charakterisierung von Wärmequellen

Im folgenden Abschnitt wird auf die spezifischen Eigenschaften verschiedener Wärmequellen, welche in der Schweiz eine Relevanz haben, eingegangen.

3.1 Luft

Luft als Wärmequelle ist überall verfügbar und die Investitionskosten sind relativ niedrig. So wurden z.B. gemäss FWS-Statistik [4] im 2022 73.8% der Wärmepumpen mit Quelle Luft verkauft, wobei das Schwerpunkt auf dem kleinen Leistungsbereich bis 20 kW liegt. Die Quellentemperatur ist stark saisonal abhängig und gerade dann am tiefsten, wenn der Heizwärmebedarf am grössten ist. Dies führt zu einer schlechten Effizienz an kalten Wintertagen aufgrund des grossen Temperaturhubs und der Abtauung. Der Luftwärmetauscher muss für diese Bedingungen ausgelegt sein, was zu einer "Überdimensionierung" führt, da bei maximaler Verdichterleistung und wärmeren Temperaturen die Heizleistung der Wärmepumpe über dem Wärmebedarf liegt und damit zu vermehrtem Takten und ineffizientem Betrieb führt. Dieser Nachteil kann mit einer Leistungsregelung oder Kaskadierung zwar deutlich entschärft werden, die Auslegung des Luftwärmetauschers und dem dafür benötigten Ventilator auf die Maximalleistung bleibt jedoch bestehen und führt zu Schwierigkeiten mit dem Lärmschutz, Anlagengewicht (Dachlasten) etc. Es ergeben sich daher diverse Einschränkungen, aber auch Vorteile bei Verwendung einer Luftquelle:

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Hohe Leistungsdichte• Bewährte Technologie• Als Rückkühler einsetzbar• Hohe Verfügbarkeit der Quelle• Kostengünstige Erschliessung• Gute Quellentemperaturen im Sommer	<ul style="list-style-type: none">• Starke Saisonalität, Temperaturniveau tief im Winter• Grosse Kältemittelmenge bei Direktverdampfer• Abtauverluste• Akustische Emissionen<ul style="list-style-type: none">→ Lärmschutz→ Platzierung Wärmetauscher kritisch• Verfügbarkeit grösserer Leistungen (Luftwärmepumpen > 50 kW)• Regulatorische Einschränkungen und Bewilligungspflicht

Neben Luftwärmepumpen, bei welchen das Kältemittel direkt im Luftwärmetauscher verdampft, wurden in den letzten Jahren vermehrt Sole-Split-Systeme auf den Markt gebracht. Dabei wird die Wärme der Luft über einen Sole-Zwischenkreis in den Verdampfer transportiert. Durch den zusätzlichen Zwischenkreis gehen zwar einige Kelvin an Quellentemperatur verloren, jedoch bietet dieses System insbesondere für den Einsatz in Mehrquellsystemen Vorteile. So lassen sich in den Solekreis auch weitere Wärmequellen wie Abwärme oder Erdwärme einbinden. Im Weiteren stehen mit z.B. industriellen Rückkühlern eine breite Palette von Luftwärmetauschern zur Verfügung, welche je nach Anforderungen (z.B. Akustik) ausgelegt werden können.

3.2 Erdwärme

Als untiefe Geothermie wird im Allgemeinen die geothermische Nutzung bis 500 m Tiefe bezeichnet. In dieser Studie wird noch eine zusätzliche Unterscheidung gemacht zur oberflächennahen Erdwärme bis ca. 10 m Tiefe, welche durch die saisonalen Vorgänge an der Erdoberfläche beeinflusst wird.

3.2.1 Untiefe Geothermie: Erdwärmesonden

Die Ausführung ist im Neubau normalerweise unproblematisch. Bei dichter Bebauung muss jedoch eine technische Regeneration geprüft werden, wie dies in bestimmten Gebieten in Zürich gegenwärtig schon der Fall ist. Das Bohren von Erdwärmesonden unter der Bodenplatte ist nicht in allen Kantonen erlaubt [26]. Beim Heizungsersatz in einem bestehenden Gebäude müssen verschiedene Einschränkungen geprüft werden.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturen kaum abhängig von Außentemperatur • Bewährte Technologie • Für Kühlung nutzbar ohne Mehrkosten • Unsichtbar, Geräuschlos • Hohe Verfügbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Investitionskosten • Zugang für Bohrgerät nötig (Sanierung!) • Beeinflussung der Sonden in der Nachbarschaft muss berücksichtigt werden gemäß SIA 384/6:2021 • Übernutzung möglich → kann zu dauerhafter Beschädigung führen • Regulatorische Einschränkungen (z.B. wegen Grundwasserschutz, Tunnels etc.) und Bewilligungspflicht

3.2.2 Energiepfähle

Als eine Sonderform der Erdwärmesonde können Energiepfähle betrachtet werden. Die energetische Aktivierung der für die Statik des Gebäudes sowieso benötigten Gründungspfähle ermöglicht eine relativ günstige Erschließung des Erdreichs. Eine natürliche Regeneration durch Sonneneinstrahlung, Niederschläge oder Erdwärme aus der Tiefe ist jedoch allenfalls im Randbereich des Feldes wirksam. Damit muss ein Energiepfahlfeld eher als Speicher denn als Quelle betrachtet werden. Die Wärme, welche im Winter entzogen wird, muss im Sommer wieder eingebracht werden. Die Bodenplatte des Gebäudes dient dabei als Isolationsschicht.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Synergie zu konstruktiv benötigter Pfählung • Unsichtbar, geräuschlos • Als Kältequelle nutzbar • Kaum regulatorische Einschränkungen • Auch in Grundwasserschutzgebieten einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaum geeignet für Sanierung • Regenerationsquelle wird benötigt

3.2.3 Erdregister

Erdregister werden oberflächennah in Tiefen von 2-5 m eingesetzt. Das oberflächennahe Erdreich wird stark durch die saisonalen Temperaturschwankungen und Niederschläge beeinflusst. Im Sommer wird das Erdreich durch die Sonne erwärmt, kühlt aber im Winter wieder aus. Durch Niederschläge wird das Erdreich jedoch auch im Winter teils wieder regeneriert. Die Wärme aus dem Erdinneren spielt eine untergeordnete Rolle. Die Erdreichtemperatur beträgt so in der Tiefe der Erdregister ganzjährig ca. 7-13°C (Q7). Es gibt verschiedene Bauformen von Erdregister wie

- Horizontale Erdkollektoren (Flächenkollektor, Agrothermie, Ringgrabenkollektor, aktivierte Bodenplatte)
- Kompaktkollektoren (vertikale Grabenkollektoren, Erdwärmekörbe, Energiespundwand)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • unsichtbar, geräuschlos • Als Kältequelle nutzbar • Kaum regulatorische Einschränkungen • Teils auch in Gewässerschutzzonen einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> • viel unversiegelte Fläche nötig • geringer flächenspezifischer Ertrag • viele Grabarbeiten nötig

Einschränkungen und Chancen

Da das Erdreich nicht versiegelt werden darf, sind Erdkollektoren vor allem für wenig dicht bebaute Grundstücke wie Einfamilienhäuser und kleine Mehrfamilienhäuser mit viel Umschwung geeignet. Sie bieten sich als Lösung an, wenn keine Erdwärmesonden gebohrt werden dürfen. Mit einer technischen Regeneration (Solar oder Luftwärmetauscher) oder der gezielten Einleitung von Regenwasser kann die



Entzugsleistung erhöht werden. Im städtischen Umfeld, insbesondere in der Sanierung, haben Erdregister wegen des grossen Platzbedarfs kaum Relevanz. Im Hinblick auf schneearme, wärmere Winter mit mehr Regen, welcher zur Regeneration beiträgt, könnten Erdregister als ergänzende Quelle ein Potential haben, um z.B. Luftwärmemtauscher zu entlasten (Schallproblematik)

3.3 Solarwärme

Die Nutzung von Solarwärme ist etabliert. Neben der direkten Nutzung mit abgedeckten Flachkollektoren und Röhrenkollektoren zur Bereitstellung von Nutzwärme (Heizung, Warmwasser) werden zunehmend Systeme für die Regeneration von Erdwärmesonden installiert. Dabei kommen meist unabgedeckte Kollektoren (selektiv beschichtete Absorber oder Hybridmodule) zum Einsatz.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">Integration in Gebäudehülle möglichBewährte TechnologieGeräuschlosZusätzliche Stromproduktion bei HybridkollektorenNiedrige Betriebskosten	<ul style="list-style-type: none">Hohe InvestitionskostenAbhängigkeit von Wetter und Saison → Speicher notwendigLeistung abhängig von der SenkentemperaturEinschränkungen bei schutzwürdigen Bauten oder komplizierten Dachgeometrien

3.4 Wasser

Grund- und Oberflächenwasser (Fluss, See) bieten ein gutes ganzjähriges Temperaturniveau. Die Nutzung ist stark reglementiert.

In dieser Quelle sind Grundwasser und Oberflächenwasser (See, Fluss) zusammengefasst, da sie sehr ähnliche Charakteristik haben. Die Nutzung ist zwar stark reglementiert, bei erlaubter Nutzung sind die Quellen jedoch meist ausreichend, so dass keine zweite Quelle nötig ist.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">Ganzjährig gute QuellentemperaturGeräuschlosAls Kältequelle nutzbar (ev. reglementarisch eingeschränkt)Niedrige BetriebskostenZunehmender Ausbau als Anergiesysteme	<ul style="list-style-type: none">Hohe InvestitionskostenStark reglementiertEingeschränkt verfügbarTeils leistungsbeschränkt

3.5 Abluft

Verbrauchte Luft fällt in allen Wohn- und Zweckbauten an. Im Bestand geschieht der hygienisch notwendige Luftwechsel jedoch meist über Fensterlüftung, was eine energetische Nutzung erschwert. Beim Einsatz einer Komfortlüftungsanlage kann die Wärme aus der Luft zu etwa 80% direkt zur Erwärmung der Frischluft zurückgewonnen werden, womit der Wärmebedarf über die Heizung vermindert wird. Bei einer Nutzung der Abluft als Quelle nach einer Lüftungs-WRG (Wärmerückgewinnung aus der Abluft mittels direkter Erwärmung der Zuluft) ist die Leistung begrenzt, und fällt aufgrund des guten Wärmerückgewinnungsgrades auf sehr niedrigem Temperaturniveau an.

In [27] wurden verschiedene Methoden der Wärmerückgewinnung aus der Abluft mittels Abluftwärmepumpen mit dem Fazit untersucht, dass diese in den meisten Fällen energetisch kontraproduktiv sind. Als einzige Variante mit positivem Nutzen wird die Nutzung der Wärme aus der Abluft zur Regeneration von Erdwärmesonden angesehen, weil damit die Sonde kleiner dimensioniert werden kann.

In [19] (siehe Tabelle 1, MFH Dettenbühl) wird das Warmwasser und rund 40% des Heizbedarfs von dezentralen Abluftwärmepumpen geliefert. Die Spitzenlast, 60% des Heizbedarfs, wird mit einer Erdsonden-Wärmepumpe bereitgestellt. Das Projekt kommt zum Fazit, dass Abluft-Wärmepumpen nicht nur platzsparend und preisgünstig sind, sondern, sofern richtig dimensioniert, auch energieeffizienter als gemeinhin angenommen. Pro m³/h Abluftmenge können rund 11 W Wärmeleistung bei einer Abkühlung der Außenluft auf 0°C und Auskondensieren der darin enthaltenen Feuchtigkeit erzeugt werden.

In diesem Projekt wurde ein Bestandsgebäude mit einer Lüftungsanlage nachgerüstet. Dank einer dezentralen Zuluftlösung über Fensterschlitzte konnten die Investitionskosten tief gehalten werden. Jedoch ist es so nicht möglich, die aus der Abluft zurückgewonnene Wärme direkt der Zuluft zuführen. Die Abluftwärmepumpe ist daher eine elegante Lösung, um die Energieeffizienz zu erhöhen. Zugleich konnte damit die Anzahl EWS-Bohrungen und damit die Investitionskosten gesenkt werden.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Quellentemperatur • Hohe Verfügbarkeit • Niedrige Betriebskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Konkurrenzierung durch Lüftungs-WRG • Nicht in allen Fällen sinnvoll • Erschliessung nur für Abwärmenutzung kaum rentabel
Kennzahlen	
Spezifische Leistung	ca. 11 W/m ³ (Abkühlung der Abluft von Raumtemperatur auf 0°C) [19]
Temperaturniveau	ca. 23°C (Wohn- und Bürogebäude), 5-15°C (Tiefgaragenabluft)

3.6 Abwasser

Abwasser ist eine über das ganze Jahr verfügbare Quelle mit einem guten Temperaturniveau von 10-20 °C. Sie lässt sich auch zur Kühlung nutzen. Dabei kann zwischen drei Möglichkeiten der Erschliessung unterschieden werden:

- Hausabwasser (auf dem Grundstück): Keine Bewilligung erforderlich
- Rohabwasser (aus dem öffentlichen Kanal): Bewilligungspflichtig, wird je nach Anlagengröße auch als Kälteverbund realisiert
- Gereinigtes Abwasser (nach der ARA): Bewilligungspflichtig, wird üblicherweise als Kälte- bzw. Anergieverbund realisiert und im Folgenden nicht detaillierter ausgeführt

3.6.1 Hausabwasser

Für die energetische Nutzung des auf dem Grundstück anfallenden Abwassers ist keine Bewilligung notwendig. Das Abwasser sollte jedoch nicht tiefer als auf 5 °C abgekühlt werden, um eine Vereisung zu verhindern [28]. Da das Frischwasser auch im Winter mit einer Temperatur von ca. 10 °C ins Haus gelangt, und der Warmwasserbedarf lediglich ca. 1/3 des Gesamtwasserbedarfs ausmacht, kann mit Ausnutzung der maximalen Temperatur dem Abwasser mehr Wärme entzogen werden als im reinen Warmwasser steckt. Die Wärmemenge im Abwasser reicht, um damit das Trinkwarmwasser und die Verluste in der Trinkwarmwasserversorgung bereitzustellen. Darüber hinaus ist das Potential jedoch gering [29].

Im Neubau kann über die Hälfte der Wärmeenergie für die Trinkwarmwasseraufbereitung benötigt werden. Die Abwasser-Wärmerückgewinnung kann damit einen signifikanten Beitrag leisten, um die zweite Quelle energetisch zu entlasten.



Die Abbildung 7 zeigt das Verhältnis von Heizwärmebedarf zu Warmwasserbedarf. Im Altbau ist der Anteil deutlich tiefer, in Kombination mit einer Sanierung der Gebäudehülle kann die Abwasser-WRG jedoch auch einen guten Anteil des Energiebedarfs übernehmen.

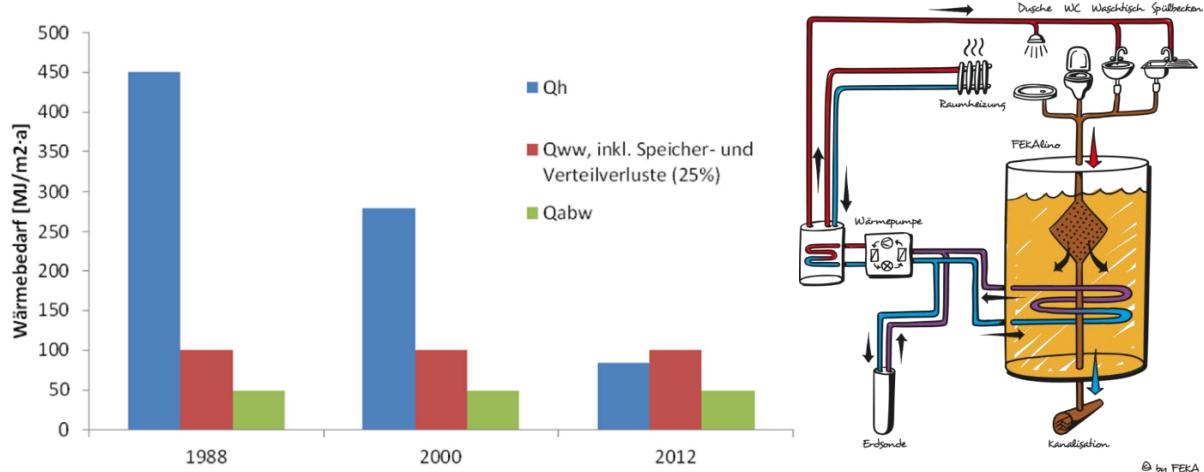


Abbildung 7: Wärmebedarf Heizung, Warmwasser und Abwärmegehalt im Abwasser (links, Quelle: [28]) und Mehrquellsystem mit Erdwärmesonde und "Fekalino" für die Wärmertückgewinnung aus Abwasser für MFH von ca. 10 bis 30 Wohneinheiten (rechts, Quelle: FEKA)

Das Abwasser fällt diskontinuierlich an, daher ist ein Speicher nötig. Die Herausforderung bei den verschiedenen auf dem Markt erhältlichen Systemen ist jedoch die Verschmutzung. Bei Systemen mit Speicherung des Abwassers ist eine regelmässige Reinigung nötig, welche sich in den Betriebskosten niederschlägt. Bei Fallrohr-Filmstrom-Wärmetauschern oder ähnlichen Systemen mit einem Filmstrom, welche weniger zu Verschmutzung neigen, fehlt dafür die Wärmespeicherung. Das zu erwärmende Fluid muss bewegt werden, idealerweise jedoch nur dann, wenn auch Abwasser anfällt.

Wird die aus dem Abwasser gewonnene Wärme jedoch nur für die Warmwasseraufbereitung verwendet, kann dies mit einer separaten Wärmepumpe, welche für diesen Zweck ausgelegt ist, umgesetzt werden.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Hohe Quellentemperatur• Hohe Verfügbarkeit bei Wohngebäuden• geräuschlos	<ul style="list-style-type: none">• Hohe Investitionskosten• Regelmässige Reinigung notwendig• Platzbedarf• Speicher notwendig wegen tageszeitlich starken Schwankungen
Kennzahlen	
Leistung	Ca. 2.5 W/m ² Wohnfläche
Spreizung	Bis 15 K
Temperaturniveau	16-23 °C
Wirtschaftlichkeit	Ab 10 Wohneinheiten, 2.5 kW
Regulierung	Keine Bewilligung notwendig

3.6.2 Rohabwasser aus dem (öffentlichen) Kanal

Aus dem Rohabwasser wird die Wärme mittels Wärmetauscher direkt in der Kanalisation oder über einen Bypass gewonnen. Bestehende Kanäle von mind. 800 mm Durchmesser können mit Rinnenwärmetauschern einfach nachgerüstet werden. Die Abwassertemperatur liegt zwischen 10 und 20 °C. Ökonomisch lohnt sich ein solches System bei der Entnahme von mind. 100 kW Kälteleistung [30] wobei jedoch auch schon kleinere Anlagen um 50 kW mit einem guten Kosten/Nutzen-Verhältnis realisiert wurden [31]. Als Erfahrungswert für die ökonomische und technische Realisierbarkeit kann von einer minimalen Tagesabflussmenge von 10 l/s ausgegangen werden, was etwa der Abwassermenge von 3000 Einwohnerwerten entspricht. [30]. Begrenzt wird die Entnahme durch die Vorgaben der ARA. Übliche Werte sind max. 1 K Temperaturabnahme, wobei dies vor allem für den Winterfall entscheidend ist um die biologischen Prozesse zu betreiben [32].

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> hohe Quellentemperatur, nur geringe jahreszeitliche Schwankung hohe Verfügbarkeit bei Wohngebäuden geräuschlos Nachrüstung bei bestehenden Kanälen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Vorschriften ARA (wenn im öffentlichen Kanal) begrenzte Entzugsleistung lange Lebensdauer
Kennzahlen	
Leistung	Ca. 4 kW/m Kanal Minimalabfluss 10 l/s (3000 Einwohnerwerte, DN400)
Spreizung	Max. 1 K
Temperaturniveau	Winter: 10-12 °C, Sommer: 17-20 °C
Wirtschaftlichkeit/ Gestehungskosten	Ab 100 kW 8-16 Rp/kWh
Regulierung	Bewilligung des ARA-Betreibers bzw. der Gemeinde notwendig.

3.7 Gebäudekühlung

Abwärme aus der Gebäudekühlung ist hauptsächlich im Sommer, bei gewerblicher Nutzung (Büro) auch in der Übergangszeit verfügbar. Im Wohnungs-Neubau mit Erdwärmesonde kann die Kühlung kostengünstig mittels Free-Cooling über die Bodenheizung realisiert werden. Der Ertrag liegt im Wohnbau bei ca. 10-20% des Wärmeentzugs aus der Sonde, mit zunehmend heißeren Sommern und milderden Wintern steigt der Anteil.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Hohe Quellentemperatur Geräuschlos Hohe Verfügbarkeit bei Zweckbauten 	<ul style="list-style-type: none"> Einfache Erschließung bei vorhandenem Flächenheizsystem Ertrag jahreszeitlich stark schwankend
Kennzahlen	
Entzug Fußbodenheizung	<ul style="list-style-type: none"> 20 W/m² belegte Fläche FBH
Einspeisung EWS	<ul style="list-style-type: none"> 30 W/m Eintragsleistung in EWS [33]



3.8 Gewerbliche Abwärme

Gewerbliche Abwärme ist oft ziemlich konstant über das ganze Jahr vorhanden (z.B. Supermarktkühlgeräte, Prozessabwärme etc). Aus diesem Aspekt ist eine Mischnutzung (z.B. Ladenzeile im Erdgeschoss, Wohnen im Obergeschoss) sehr interessant. Je nach Einbindung der Abwärmequelle können dabei beide Seiten profitieren: der Wärme produzent kann auf Rückkühler auf dem Dach verzichten oder diese zumindest reduzieren und bekommt eine ganzjährig stabile Wärmesenken tem peratur, der Wärme abnehmer hat eine günstige, ganzjährige Quelle, welche als Grundlast oder sogar zur kompletten Wärmebedarfsdeckung reicht. Es besteht das Risiko, dass bei einem Mieterwechsel keine oder nicht mehr genügend Abwärme zur Verfügung steht. Dies sollte in der Planung berücksichtigt werden, indem z.B. beim Neubau Sonden unter der Bodenplatte gebohrt werden, so dass später beim Ausfall des Gewerbemieters weitere Sonden neben dem Gebäude gebohrt werden können. Wegen der Einbindung der technischen Anlagen des Gewerbemieters in das Gesamtsystem erhöht sich der Koordinationsaufwand und die Komplexität.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">Hohe QuellentemperaturKaum saisonale AbhängigkeitGeräuschlosTeilweise Einsparung Investitionen in Rückkühlung	<ul style="list-style-type: none">Risiko durch Wegfall bei NutzungsänderungErhöhter Koordinationsaufwand

3.9 Kategorisierung der Wärmequellen

Die Abbildung 8 ordnet die verschiedenen Wärmequellen gemäss ihrer für Mehrquellsysteme relevanten Eigenschaften ein.

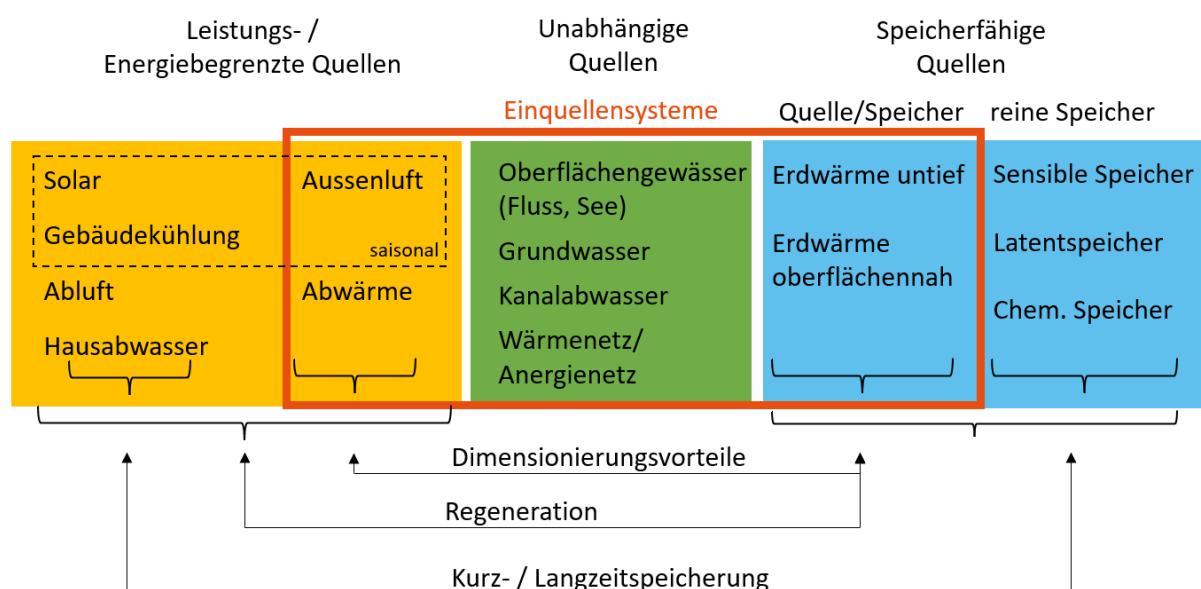


Abbildung 8: Systematik der Wärmequellen

3.9.1 Potential für Mehrquellsysteme

Luft: Mehrquellsysteme mit Luft, welche auf direkter Verdampfung im Luftwärmetauscher basieren, benötigen Spezialgeräte mit mehreren Verdampfern, wie z.B. die Geräte von Glen Dimplex und Therm Select. Ausgenommen sind Systeme, bei denen die beiden Quellen schon vor dem Verdampfer kombiniert werden (z.B. das Kombigerät von Stiebel Eltron).

Durch die Nutzung eines Sole-Zwischenkreises gibt es jedoch eine flexible Möglichkeit zur Integration weiterer Quellen. Die saisonale Abhängigkeit der Luft als Wärmequelle und der gleichzeitig hohe Heizleistungsbedarf führt dazu, dass die Faktoren, welche zu den Einschränkungen führen, im Winter am stärksten sind. Wird Luft als primäre Quelle verwendet, kann eine Entlastung des Luftwärmetauschers an den kältesten Tagen eine deutlich kleinere Dimensionierung ermöglichen (Spitzenlastdeckung). Wird Luft als sekundäre Quelle verwendet, eignet sie sich für die (teilweise) Regeneration.

Erdreich: Wegen der ganzjährigen Verfügbarkeit eignet sich Erdwärme gut als primäre Quelle. Unregelmäßige Quellen können als Regeneration eingebunden werden, im einfachsten Fall mittels eines Plattenwärmetauschers, welcher vor dem Eintritt in die Erdwärmesonde oder vor der Wärmepumpe dazwischengeschaltet wird. Der Einsatz als sekundäre Quelle ist denkbar als Spitzenlastabdeckung in einer Anlage, welche primär mit Luft oder einer anderen Quelle mit hoher Verfügbarkeit beheizt wird. Diese Konstellation wird im Projekt mittels Simulationen detaillierter untersucht.

Wasser: Mittelgrosse Anlagen, wie sie für diese Studie untersucht werden, können mit einer Grundwasserbohrung üblicherweise vollständig beheizt werden. In einzelnen Kantonen gibt es sogar eine minimale Entzugsleistung pro Grundwasserbohrung (z.B. ZH: 150 kW Kälteleistung im Bestand, 100 kW bei Minergie-Hülle [34]). Für grössere Areale oder im städtischen Umfeld mit vielen Anlagen kann die Ergiebigkeit des Grundwassers jedoch an die Grenzen kommen und es besteht Potential für Mehrquellsysteme. Dabei ist zu beachten, dass in Gebieten mit hoher Grundwasser-Ergiebigkeit das Bohren von Erdwärmesonden meist stark beschränkt ist. Ausserhalb der ausgewiesenen Grundwassergebiete besteht jedoch auch ein Potential für die Kombination.

Solarwärme: Wegen der begrenzten Verfügbarkeit wird ein Speicher benötigt. Erdreich und Eisspeicher sind dazu sehr gut geeignet, da sie auf niedrigem Temperaturniveau liegen und dadurch ein hoher Ertrag aus den Kollektoren möglich ist. Bei der Montage an der Fassade oder Steildach kann der Ertrag auf den Winter optimiert und damit ein gezielter Beitrag zur Wärmeversorgung im Winter geleistet werden kann.

Abluft: Im Neubau wird die Quelle üblicherweise durch die WRG in der Lüftungsanlage genutzt. Die Nutzung nach einer Lüftungs-WRG hat weniger Potential. Allenfalls kann die Abluft aus der WRG noch zur Abtauung des Verdampfers genutzt werden. Potential besteht in der Wärmerückgewinnung bei Abluftsystemen, welche insbesondere in der Bestandsnachrüstung zur Anwendung kommen.

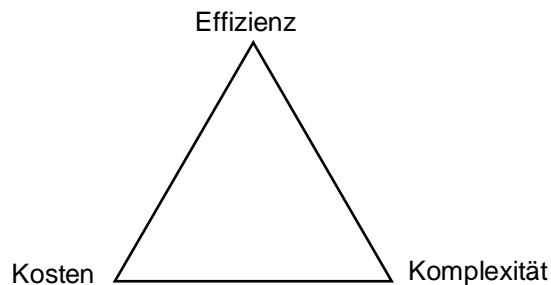
Abwasser: Die aus dem Hausabwasser gewonnenen Energiemengen reichen kaum über die für die Warmwasseraufbereitung benötigte Menge hinaus. Da diese im Neubau jedoch energetisch einen grossen Anteil am Jahresbedarf ausmacht, kann damit die zweite Wärmequelle deutlich entlastet werden. Mit dem Kanalabwasser können höhere Deckungsgrade erreicht werden, wenn das Abwasser aus mehr Gebäuden genutzt wird als die damit produzierte Wärme versorgt.



4 Hydraulische Integration

4.1 Herausforderungen bei der Kombination von Quellen

Die Herausforderung besteht darin, alle Quellen möglichst optimal einzubinden, dabei jedoch die Komplexität möglichst gering zu halten. Bei hydraulisch komplexen Anlagen besteht eine grössere Gefahr von Planungs- und Ausführungsfehlern, welche den theoretisch erreichbaren Gewinn an Effizienz wieder zunichtemachen können. Entscheidend ist auch eine gut durchdachte und programmierte Steuerung. Diese skaliert mit der Komplexität, ist aber unabhängig von der Anlagengrösse.



Auf folgende Punkte muss in der Auslegung der Hydraulik und der Steuerung besonderes Augenmerk gelegt werden:

- Unterschiedliche Temperaturniveaus bei verschiedenen Quellen
 - Gefahr zu hoher bzw. tiefer Sondentemperaturen (Beschädigung Sonde/ Hinterfüllung)
 - Kondensation
 - Nutzungspotential wird bei zu warmen Eintrittstemperaturen reduziert
- Unterschiedliche Massenströme nötig für verschiedene Quellen und Verbraucher (WP)
 - Regelung der Massenströme: bei zu hohen oder zu tiefen Massenströmen wird Ertragspotential verschenkt (Spreizung, laminare/turbulente Strömung, Druckverlust)
 - Leistungsregelung der WP (variable Quellenpumpenleistung) stört die Massenstrombilanz
- Auslegung Wärmetauscher: Zu kleine Wärmetauscher, z.B. für die Einbindung der solaren Regeneration/Luftregeneration, führen zu hoher Grädigkeit, womit Ertragspotential verschenkt wird.
- Systemregelung
 - Definition der Kriterien, wann welche Quelle in welchem Ausmass genutzt wird
 - Ein- und Ausschaltkriterien sowie deren Beeinflussung
 - Aufwand für die Sensorik:
 - Temperaturmessung ist kostengünstig
 - Volumenstrommessung kostenintensiver, kann sich aber bei grösseren Anlagen lohnen
 - Massenstromregelung
 - Sicherheitsfunktionen
 - Ein Monitoring der wichtigsten Temperaturen und Energiemengen sollte eingeplant werden. Durch Integration in die Systemregelung kann die gleiche Sensorik genutzt werden, was die Kosten verringert.

4.2 Typologien

Die Integration unterschiedlicher Quellen wurde in folgende Typologien unterteilt (beispielhaft mit Luft und EWS als Quelle):

Tabelle 2: Typologie der Integration unterschiedlicher Wärmequellen

Unabhängige Wärmepumpen Die Kaskadierung sekundärseitig ist Stand der Technik und wird bei grösseren Anlagen oft ausgeführt, jedoch üblicherweise mit einer Wärmequelle. Der Betrieb mit unabhängigen Wärmepumpen ist einfach umzusetzen und birgt die geringsten Risiken. Diese Integration bietet sich an, wenn eine Verschaltung der Quellen untereinander keine Vorteile bringt, z.B. in Spitzenlastsonden-Systemen ohne Regeneration des Erdreichs.	
Wärmepumpe mit mehreren Verdampfern Die Integration der Quellen erfolgt im Kältekreis der Wärmepumpe. Die Steuerung der einzelnen Quellen sollte durch die Wärmepumpensteuerung erfolgen, was eine sorgfältige Abstimmung mit dem Wärmepumpenhersteller erfordert. Da es kaum Seriengeräte dieser Art gibt, erfordert diese Variante meist eine Einzelanfertigung.	
Hydraulische Verschaltung im Quellenkreis Durch die Integration im Quellenkreis können die beiden Quellen sich gegenseitig beeinflussen. <ul style="list-style-type: none">• positiv: z.B. Regeneration der einen Quelle durch die andere• negativ: z.B. durch Auskühlen wegen suboptimaler Regelung Diese Typologie bietet die grössten Chancen, beinhaltet aber auch die meisten Risiken. Typische Anwendungen: Regeneration	

4.3 Hydraulische Verschaltung im Quellenkreis

Nachfolgend wird auf einige hydraulische Varianten, welche in verschiedenen Projekten untersucht oder umgesetzt wurden, eingegangen.

Tabelle 3: Hydraulische Integration von Wärmequellen im Quellenkreis

Serielle Verschaltung für die Regeneration Im Forschungsbericht "Empfehlungen zur Regeneration von Erdwärmesonden" [35] wurden diverse Varianten untersucht, daher wird hier nicht im Detail darauf eingegangen. Die rechts gezeigte Einbindung wird z.B. in den 2SOL-Anlagen Ländisch [18] und Sentmatt [36] verwendet.	
---	--

Tabelle 3: Hydraulische Integration von Wärmequellen im Quellenkreis (fortgesetzt)

Kombinierte parallele und serielle Verschaltung

Feldanlage MFH Ettenbergstrasse, Wettswil

Der Luftwärmetauscher ist wie auch die Wärmepumpe mit einer eigenen Umwälzpumpe ausgestattet. Damit kann die Wärmepumpe die vom Luftwärmetauscher zur Verfügung gestellte Wärme direkt nutzen. Die Erdwärmesonde dient als hydraulische Weiche, welche die Massenstromdifferenz zwischen Luftwärmetauscher und Wärmepumpe ausgleicht. Die Durchströmungsrichtung durch die Erdwärmesonde ändert sich, je nachdem, ob die Massenstrombilanz positiv oder negativ ist.

Vorteil dieser Verschaltung ist, dass im Sommer die höhere Temperatur aus dem Luftwärmetauscher direkt in der Wärmepumpe genutzt werden kann. Der Massenstrom durch den Luftwärmetauscher wird jedoch beeinflusst durch die Wärmepumpe, was den Wärmeertrag vermindert. Für einen kontrollierten Massenstrom ist eine Regelung nötig.

Der Luftwärmetauscher wird in dieser Anlage nur bei positiven Lufttemperaturen betrieben, so dass er nicht vereisen kann. Da die Erdwärmesonden unterkühlt sind (Grund für die Nachrüstung der Anlage mit dem Luftwärmetauscher) liegt die EWS-Temperatur konstant unter der Lufttemperatur, d.h. es besteht kaum Gefahr, dass die Erdwärmesonden wegen Fehlfunktion durch den Luftwärmetauscher ausgekühlt werden.

Quellspeicher

Eine oder mehrere Quellen laden einen gemeinsamen Speicher, aus welchem die Wärmepumpe die Quellenwärme entzieht. Dank dem Speicher kann jede Quelle mit dem optimalen Massenstrom betrieben und damit der Ertrag optimiert werden. Bedingung ist jedoch, dass die unterschiedlichen Fluidtemperaturen auch sauber eingeschichtet werden.

Systeme dieser Art werden von z.B. Energie Solaire (System Earthsol, Icesol) oder Naef Energietechnik geplant.

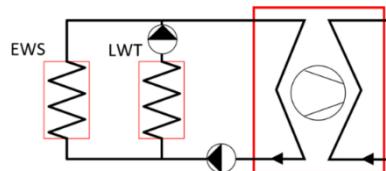


Abbildung 9: Anlagenschema (vereinfacht) MFH Ettenbergstrasse. In Realität sind in den vier Häusern jeweils zwei WP kaskadiert. Vor der Nachrüstung waren die 4 EWS-Felder mit je 3 Sonden separat und wurden durch Regeneration zusammengeschaltet.

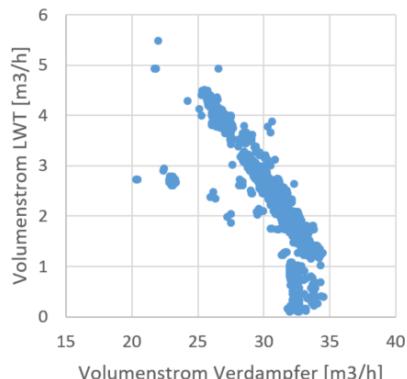


Abbildung 10: Beeinflussung des Volumenstroms im Luftwärmetauscher durch die Verdampferumwälzpumpen. Die Umwälzpumpe des Luftwärmetauschers wird in diesem Zeitraum mit einer konstanten Drehzahl betrieben (Messdaten von Jan. bis März 2022)

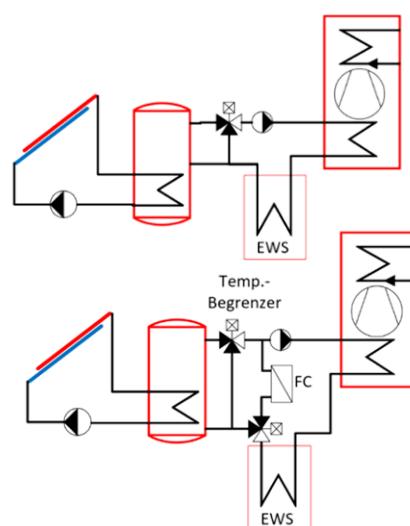


Abbildung 11: Quellspeicher mit direkt eingebundener Erdwärmesonde

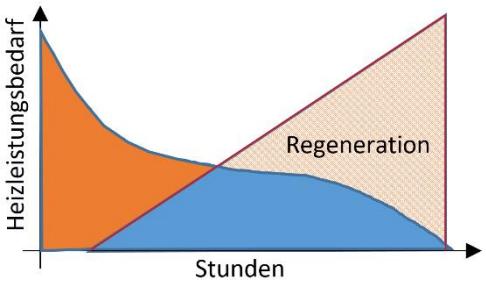
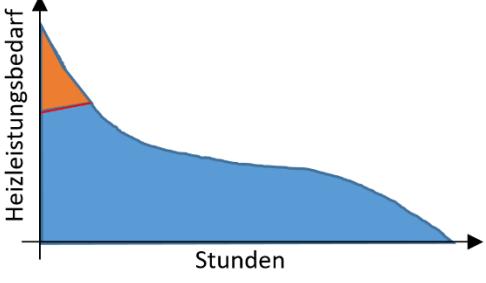
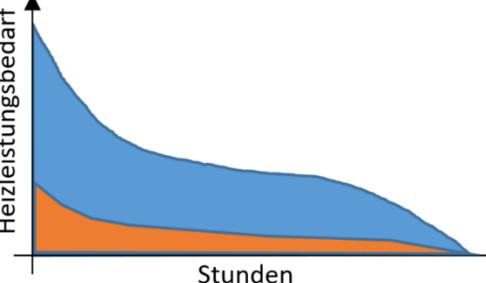
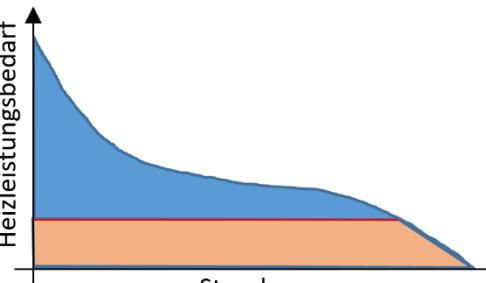
Oben: System Earthsol (Energie Solaire)

Unten: Quellspeichersystem mit Speicherbypass für Free-Cooling von Naef Energietechnik

5 Kombination von Wärmequellen

5.1 Typologien und Zielerreichung

Im Weiteren werden folgende Typologien zur Kombination von Wärmequellen untersucht:

	<p>Regeneration</p> <p>Die primäre Quelle wird durch die sekundäre Quelle regeneriert.</p> <p>Beispiele: Erdwärmesondenfeld mit Regeneration durch thermische Solarmodule oder Luftwärmetauscher.</p> <p>Regenerationsquellen: Sonne, Luft, Abwärme, Abluft, Abwasser, Gebäudekühlung</p> <p>Wirkung: Senkung des Netto-Energieentzugs aus der primären Quelle, Dimensionierungsvorteile des EWS-Feldes</p>
	<p>Spitzenlastdeckung</p> <p>Die Spitzenlast wird von einer zweiten Quelle übernommen. Damit kann der Leistungsbedarf aus der primären Quelle deutlich reduziert werden.</p> <p>Beispiel: Luftwärmepumpe mit Spitzenlastquelle (z.B. Erdwärme, Eisspeicher)</p> <p>Wirkung: Senkung des Leistungsbedarfs aus der primären Quelle.</p>
	<p>Vorwärmung</p> <p>Die primäre Quelle wird durch die sekundäre Quelle vorgewärmt.</p> <p>Beispiel: Luftwärmepumpe mit Beimischung von Abluft für die Vorwärmung.</p> <p>Wirkung: Der Leistungsbedarf aus der primären Quelle wird verringert. Die Quellentemperatur kann erhöht werden.</p>
	<p>Grundlast</p> <p>Eine Grundlastquelle liefert konstant über das ganze Jahr. Je nach Ergiebigkeit der Quelle kann damit die teilweise oder komplett die Warmwasseraufbereitung, allenfalls auch ein Teil des Heizwärmebedarfs abgedeckt werden.</p> <p>Beispiel: Wärmerückgewinnung aus dem haus-eigenen Abwasser.</p> <p>Grundlastquellen: Abluft, Abwasser, Gebäudekühlung, Abwärme</p> <p>Wirkung: Senkung des Energiebedarfs aus der primären Quelle, in geringem Masse Senkung des Leistungsbedarfs</p>



Diese Typologien leisten unterschiedliche Beiträge zur Erreichung der für dieses Forschungsprojekt gesetzten Ziele:

Zielsetzung 1: Ermöglichung einer Wärmepumpenanlage, wenn dies aus technischen oder finanziellen Gründen mit einer Wärmequelle nicht möglich ist.

Der Gesamt-Wärmeleistungsbedarf über das Jahr ergibt sich aus seiner Grundlast für die Warmwasseraufbereitung und einer von der Witterung abhängigen variablen Last für die Heizung. Im Neubau liegt die für die Warmwasseraufbereitung verwendete Energie bei ca. ½ bis 2/3 des Gesamtwärmebedarfs, im Bestand bei deutlich tieferen Werten.

Sofern es keine grösseren Speicherkapazitäten auf der warmen Seite des Systems gibt, wird die maximale Leistung der Wärmepumpe durch den Spitzenlastbedarf definiert, welcher auch, abzüglich des Elektrizitätsbedarfs der Wärmepumpe, von der Quelle erbracht werden muss.

Die Auslegung der Wärmequelle erfolgt also auf die Leistung als dominierenden Faktor. Eine Ausnahme sind Erdsondenfelder. Bei geringem Abstand zwischen den Bohrungen wird die verfügbare Energie zum begrenzenden Kriterium.

Damit ergeben sich folgende Strategien, um die primäre Quelle kleiner zu dimensionieren.

- **Regeneration** (Erdsondenfelder): Das Erdreich wird aus einer zweiten Quelle wieder regeneriert.
- **Spitzenlastdeckung:** die primäre Quelle ist leistungsbegrenzt und kann dadurch kleiner dimensioniert werden. Die fehlende Leistung wird aus der sekundären Quelle bezogen.
- **Vorwärmung:** Die Quellentemperatur wird angehoben. Damit kann die Wärmepumpe eine höhere Leistung erbringen. Alternativ kann dank Vorwärmung der Volumenstrom der primären Quelle reduziert werden, was bei Luft einen direkten positiven Einfluss auf die Schallemissionen und damit eine Einschränkung reduziert.
- **Grundlast:** Die Warmwasseraufbereitung, evt. noch ein Teil des Heizbedarfs, wird aus einer Grundlastquelle gedeckt. Damit lässt sich der Energiebedarf aus der primären Quelle (Erdwärme) verringern.

Zielsetzung 2: Reduktion der Investitionskosten durch Substitution der Erschliessungskosten der einen Wärmequelle durch die Nutzung einer zweiten günstigeren Quelle.

Die Ausgangslage ist ähnlich wie bei Zielsetzung 1, der begrenzende Faktor ist jedoch nicht physikalischer bzw. regulatorischer, sondern finanzieller Natur.

Die Kosten für die Erschliessung einer Wärmequelle werden primär durch den Spitzenleistungsbedarf dominiert, eine Ausnahme ist wiederum das Erdsondenfeld.

- **Regeneration:** Durch Regeneration können Sondenmeter eingespart werden. Dies gilt jedoch nur unter der Annahme einer begrenzt zur Verfügung stehenden Fläche, so dass sich die Sonden gegenseitig beeinflussen und dadurch mehr Sondenmeter gebohrt werden müssen als bei unbeeinflussten Sonden [37].
- **Spitzenlastdeckung:** die primäre Quelle kann kleiner dimensioniert werden, da ein Teil der Leistung aus der sekundären Quelle gedeckt wird. Bedingung ist jedoch, dass die Erschliessung der zweiten Quelle günstiger ist als eine grössere Dimensionierung der primären Quelle. Aufgrund von Skaleneffekten ist dies meist nur der Fall, wenn Einschränkungen der primären Quelle zu steigenden Grenzkosten führen (z.B. besondere Lärmschutzmassnahmen).
- **Alternative Quelle:** Um den Energiebezug aus Erdwärmesonden zu senken kann eine alternative Quelle erschlossen werden, z.B. Luft
- **Grundlast:** Die Warmwasseraufbereitung, evt. noch ein Teil des Heizbedarfs, wird aus einer Grundlastquelle gedeckt. Damit lässt sich der Energiebedarf aus der primären Quelle verringern.

Zielsetzung 3: Steigerung der Effizienz durch Erhöhung der Quellentemperatur mithilfe einer zweiten Quelle und damit Reduktion der Betriebskosten.

Durch die Erhöhung der Quellentemperatur verbessert sich die Jahresarbeitszahl, womit die Energiekosten gesenkt werden können. Die dafür benötigten Investitionskosten müssen jedoch in einer Vollkostenrechnung mitberücksichtigt werden.

- **Regeneration:** Die Erdreichtemperatur wird auf einem hohen Niveau stabilisiert.
- **Spitzenlastdeckung:** Zuschalten einer Quelle mit höherer Temperatur in Zeiten von hohem Wärmebedarf.
- **Vorwärmung:** Erhöhung der Quellentemperatur durch Nutzung einer Vorwärmquelle
- **Grundlast:** Nutzung einer Grundlastquelle von hoher Temperatur

5.2 Vorgehen und Methode

Die Kombination der unterschiedlichen Wärmequellen wurde hauptsächlich mittels dynamischer Simulationen untersucht. Dazu wurde ein parametrisiertes Simulationsmodell in Matlab-Simulink entwickelt, welches die Integration verschiedener Wärmequellen erlaubt. Für die Senkenseite (Heizung, Warmwasser) wurde mittels dynamischer Gebäudesimulation ein Lastprofil in Stundenauflösung generiert (Lastganggenerators).

Zur Untersuchung der Auswirkung verschiedener Parametervariationen wurden hunderte Simulationen parallel durchgeführt.

5.2.1 Simulationsumgebung

Die Simulationen wurden mit Matlab- Simulink und der Carnot-Toolbox [38] durchgeführt. Die Modellierung der Sonde erfolgte dabei mit einem selbst entwickelten Block, mehrheitlich basierend auf dem Modell von Huber [39] mit einem Widerstandsmodell für den Nahbereich und der g-Funktion im Fernbereich. Über einen separaten Lastprofilgenerator wurde der Wärmeleistungsbedarf für ein Bestands- und ein Neubaugebäude gemäss SIA 2024:2015 [40] sowie ein saniertes Gebäude mit einem jeweiligen Heizleistungsbedarf von ca. 60 kW und Normwetterdaten (normal, kalt) nach SIA 2028:2010 [41] definiert. Zur Untersuchung des Einflusses einer Änderung des Wärmebedarfs im Gebäudelebenszyklus wurde zusätzlich für den Bestandsbau ein Lastprofil "warm" mit Einfluss des Klimawandels (SMA 2035 RCP8.5 [42]) und zwei Lastprofile für eine leichte und eine starke Sanierung der Gebäudehülle generiert (siehe Anhang 9.2). Für grössere Gebäude wurde das Lastprofil entsprechend skaliert. Die Wärme pumpen wurden mittels Performance Map, basierend auf Kennfelddaten jeweils einer Luft-Wasser [43] und Sole-Wasser-Wärmepumpe [44], simuliert. Dabei wird eine Leistungsregelung von 0-100% mit konstantem Gütegrad über den gesamten Leistungsbereich angenommen. In realen Anlagen liegt die minimale Leistung für Inverter-Wärmepumpen bei ca. 25%, diese kann jedoch durch Kaskadierung mehrerer Geräte ebenfalls gesenkt werden.

Beginnend mit einer definierten Startlänge der Erdwärmesonde wurde mehrmals 50 Jahre simuliert, wobei vor jedem Durchgang die Sondenlänge automatisch angepasst wurde um auf eine minimale mittlere Fluidtemperatur in der Sonde von -1.5 °C nach 50 Jahren gemäss SIA 384/6 [45] zu optimieren. Mit einer angesetzten Temperaturspreizung über die Sonde von 3 K ergibt sich eine minimale Eintrittstemperatur in die Sonde von -3 °C. Jede Parametervariation wurde mit 8 verschiedenen Sondenfeldgrössen und drei verschiedenen Heizleistungen (60, 120, 240 kW) durchgeführt. Je nach Strategie wurden die Spitzenlastanteile in 20% Schritten oder die Kollektorfläche bzw. Luftwärmetauscherleistung variiert. Basierend auf dem Hauptmodell wurde mit drei Modellvarianten gearbeitet, welche sich im Wesentlichen in der Anzahl Wärmepumpen und der Art der Leistungsaufteilung zwischen den Wärmepumpen unterscheiden:

- **Modell 1:** Eine Wärmepumpe mit EWS, zusätzlich Luftwärmetauscher oder Solarkollektoren zur Regeneration. Dieses Modell wurde für die Simulationen der Strategie "Regeneration" verwendet.
- **Modell 2:** Zwei Wärmepumpen. WP1 mit Luft als Quelle (Direktverdampfung), WP2 mit EWS als Quelle. Mit diesem Modell wurden die Untersuchungen zur Strategie "Spitzenlastdeckung" mit verschiedenen Leistungsanteilen untersucht. Dabei wird die WP2 jeweils erst eingeschaltet, wenn die definierte maximale Leistung der WP1 ausgeschöpft ist.
- **Modell 3:** Zwei Wärmepumpen. WP1 als Sole-WP mit einem Luftwärmetauscher (Rückkühler) als Quelle. WP2 mit EWS als Quelle. Möglichkeit der Regeneration des Erdreichs mit dem Luftwärmetauscher. Mit diesem Modell wurde die Strategie "Spitzenlastdeckung mit und ohne Regeneration" untersucht. Die Leistungsregelung der beiden Wärmepumpen erfolgt dabei dynamisch in Abhängigkeit der Quellentemperaturen. Im Abschnitt 5.5.3 wird die Regelung detaillierter beschrieben.

Die detaillierten Simulationsparameter befinden sich in Anhang 9.1, die verwendeten Lastprofile im Anhang 9.2

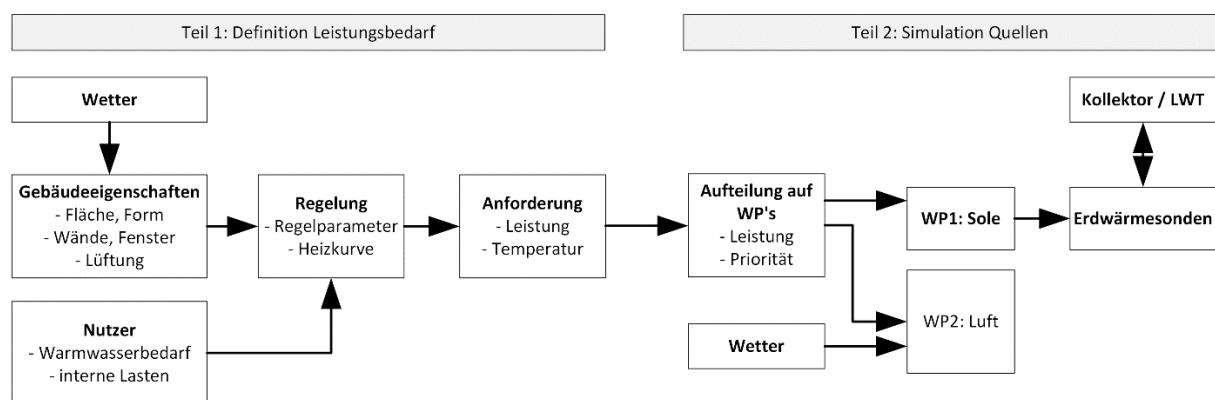


Abbildung 12: Aufbau der Simulation

Tabelle 3: Definition der beiden Gebäude

	Bestandsbau	Neubau
Heizleistung	60 kW	60 kW
Energiebezugsfläche (EBF)	1040 m ²	3640 m ²
Normheizlast	54.6 W/m ²	13.5 W/m ²
Anzahl Stockwerke	3	6
Grundfläche (automatisch ermittelt aus EBF und Stockwerken mit Seitenverhältnis 1:2)	13.2 m*26.4 m	17.4 m*34.8 m
Anzahl Bewohner (30 m ² /Person)	35 Pers.	121.3 Pers.

5.2.2 Modellierung Solarkollektoren

Der Kollektor wurde als PV/T nach Stegmann [46] modelliert. Sie basiert im thermischen Teil auf einer instationären Energiebilanz. Der elektrische Ertrag wurde nicht im Modell ermittelt, sondern nachträglich für die Wirtschaftlichkeitsrechnung mit 200 kWh/m² Kollektorfläche für die PVT vereinfacht angenommen. Für die PV/T wurden die Kennliniendaten des Typs Meyer Burger Hybrid 270/900 [47], für den unabgedeckten, selektiven Absorber der Typ Energie Solaire AS [48] verwendet.

Die Modellvalidierung erfolgte mittels Messdaten aus dem EnergieSchweiz-Projekt Ländisch [18] (siehe Anhang 9.5).

5.2.3 Modellierung Luftwärmetauscher

Der Luftwärmetauscher wurde als Mehrknotenmodell mit der Wärmeübertragungsfläche und einer Wärmedurchgangszahl als bestimmende Grösse implementiert. Damit kann für jede Fluidseite die folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(T_{in} - T_{out}) \cdot \dot{m}_f \cdot c_{p,f} + (T_x - T) \cdot k \cdot A}{m \cdot c_p}$$

sowie für die Wärmeübertragung zwischen den beiden Fluidseiten

$$\frac{dQ}{dt} = k \cdot A \cdot (T_p - T_s)$$

Mit

T_{in}, T_{out}	Ein- und Austrittstemperatur des Fluids
$\dot{m}_f, c_{p,f}$	Massenstrom / spez. Wärmekapazität Fluid
m, c_p	Masse / spez. Wärmekapazität Wärmetauscher (Fluid + Material)
T, T_p, T_s	Temperatur Fluid / primär / sekundär
k, A	Wärmedurchgangszahl, Wärmeübertragungsfläche

Das Modell wurde auf Basis des Datenblatts des in der Wohnüberbauung Ettenbergstrasse in Wettswil verwendeten Rückkühlers auf den Nennbetriebspunkt parametrisiert. Die Validierung des Modells erfolgte mit Messdaten aus dieser Anlage (Anhang 9.4)

Da das Mehrknotenmodell sehr rechenintensiv ist, wurden über ein Skript diverse Betriebspunkte (Varianz der Eintrittstemperaturen und Massenströme beider Fluide) gerechnet und in ein Lookup-Table-Modell übertragen. Die Leistung lässt sich beliebig skalieren.

Die elektrische Leistung für die Ventilatoren wurde im Postprocessing aus dem Luftmassenstrom und einer kubischen Abhängigkeit auf Basis des Nennbetriebspunkts aus dem Datenblatt berechnet.

Die Leistung des Luftwärmetauschers ist von den Fluidtemperaturen abhängig. Somit lassen sich verschiedene Wärmetauscher nicht direkt miteinander vergleichen, wenn die Leistung auf verschiedenen Betriebspunkten definiert wird. Daher wird im Weiteren eine normierte Leistung verwendet, welche sich aus der logarithmischen Temperaturdifferenz ergibt:

$$\dot{Q}_{spez,norm} = \frac{\dot{Q}_{nenn}}{\Delta T_{m,log}} \quad \text{mit} \quad \Delta T_{m,log} = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}}$$

Mit ΔT_{max} und ΔT_{min} : Temperaturdifferenz am Austritt bzw. Eintritt bei den verschiedenen Betriebsbedingungen.

Für den in diesem Modell verwendeten Rückkühler beträgt die normierte Leistung 12.9 kW/K. Weitere Angaben sind im Anhang 9.4 aufgelistet. Da im Projekt Gebäude mit unterschiedlicher Heizleistung untersucht wurden, wird die normierte Wärmetauscherleistung $\dot{Q}_{spez,norm}$ in Relation zur Heizleistung \dot{Q}_h angegeben:

$$\dot{Q}_{LWT,spez} = \frac{\dot{Q}_{spez,norm}}{\dot{Q}_h} \quad [\text{kW}/\text{kW}]$$

5.2.4 Normierung und Auswertung

Die im Optimierungsprozess in der Simulation ermittelte Sondenlänge ist je nach Parameter verschiedenen. Da die Erdreichtemperatur mit zunehmender Sondenlänge zunimmt, erhöht sich damit auch das Leistungspotential der EWS, welcher den Vergleich verschiedener Varianten verfälschen kann.



Um diese Verfälschung auszugleichen, wurde für die Auswertung ein Korrekturfaktor für den Tiefeneinfluss eingeführt

$$k = \frac{T_o + 0.5 * L_{norm} * \Gamma - T_{min,mittel}}{T_o + 0.5 * L * \Gamma - T_{min,mittel}}$$

mit

k	Korrekturfaktor
T_o	mittlere Oberflächentemperatur (9 °C)
L	Länge Sonde
L_{norm}	Länge Normsonde
Γ	Geothermischer Gradient (0.03 K/m)
$T_{min,mittel}$	minimale mittlere Sondentemperatur (-1.5 °C)

Entsprechend ergibt sich damit beispielsweise für $L = 430$ m und $L_{norm} = 215$ m ein Korrekturfaktor $k = 0.81$. Dieser Faktor ist so zu interpretieren, dass mit zwei Sonden von jeweils 215 m, also einer Gesamtlänge von 430 m, lediglich 81% der Energie bzw. Leistung einer Einzelsonde mit einer Länge von 430 m entzogen werden kann unter Berücksichtigung, dass die gleiche Sondenein- und Austrittstemperaturen erreicht werden. Die Normsondenlänge wird innerhalb eines für die Auswertung bestimmten Datensatzes festgelegt. Diese Normierung erlaubt es somit, Systeme mit unterschiedlicher Anzahl Sonden miteinander zu vergleichen.

5.2.5 Wirtschaftlichkeit

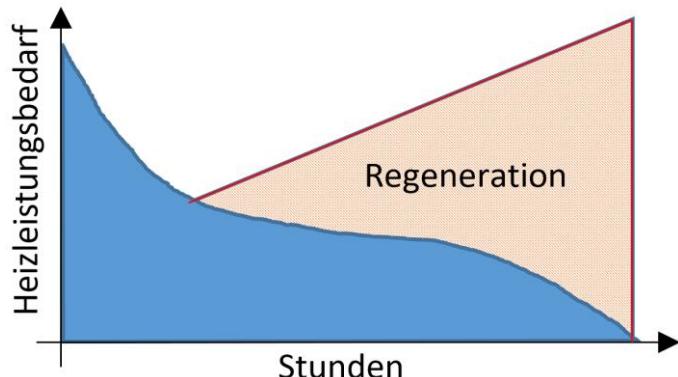
Für die Wirtschaftlichkeit wurden die annualisierten Investitionskosten und die Betriebskosten (Energiebedarf, Unterhalt) berücksichtigt. Es wurden nur die Kosten miteingerechnet, welche sich in den verschiedenen Varianten unterscheiden. Eine Übersicht über die berücksichtigten Kosten sowie weitere Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Quellen befindet sich im Anhang 9.3. Die Amortisationszeit beträgt 50 Jahre für die Erdwärmesonden und 20 Jahre für alle anderen Anlagen. Die spezifischen Bohrkosten wurden als konstant, unabhängig von der Bohrtiefe, angenommen. In Realität nehmen diese mit zunehmender Sondentiefe zu. Somit werden in den Vergleichsrechnungen die Systeme mit tiefen Sonden bevorzugt.

Für Systeme mit PV oder Hybridkollektoren wurde ein Eigenverbrauch in Abhängigkeit des Strombedarf des Gebäudes (Haushaltsstrom und Wärmepumpenanlage) gemäss [49] berechnet. Der Haushaltsstromverbrauch wurde mit 14.75 kWh/(m²a) angenommen [40].

Die globale geopolitische Lage hat seit dem Frühjahr 2022 zu massiv höheren und sehr stark schwankenden Energiepreisen geführt. Dies löste einen Boom beim Heizungsersatz und PV-Installationen aus, was wiederum die Kosten für die Installationen erhöhte. Vor diesem Hintergrund müssen die für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen getroffenen Annahmen als Basis für den Vergleich der einzelnen untersuchten Varianten verstanden werden und nicht als eine generell übertragbare Aussage. Die Annahme von 20 Rp/kWh für Elektrizität widerspiegelt damit nicht direkt die aktuelle Situation (Kosten von über 30 Rp/kWh für 2023 je nach Stromversorger) sondern eher eine langfristige Erwartung.

5.3 Strategie Regeneration

In der Strategie "Regeneration" wird eine primäre Quelle wieder regeneriert durch eine sekundäre Quelle. Primäre Quellen haben die Eigenschaft, dass Wärme als innere Energie gespeichert werden kann. Dies können natürliche Speicher wie das Erdreich, aber auch technische Speicher wie Eisspeicher, Wasserspeicher oder die Fundamentplatte sein. Als Regenerationsquellen können Solarwärme, Luft oder Abwärme dienen.



Nachfolgend wird auf das Erdreich als Speicher fokussiert, da hier das grösste Umsetzungspotential, insbesondere für Sanierungen, liegt. Technische Speicher sind aufgrund des benötigten Platzes und der baulichen Massnahmen oft kostenintensiver und darum erst eine Option, wenn keine natürlichen Speicher vorhanden sind. In der Sanierung fehlt zudem oft der benötigte Platz.

Als Regenerationsquellen werden Solarkollektoren und Luftwärmetauscher untersucht. Die Regeneration mit Luftwärmetauschern ist eine noch wenig verbreitete Lösung. Durch die Nutzung von industriellen Lamellenwärmatauschern (z.B. Rückkühlern) steht jedoch eine breite Palette an Geräten für jede Leistungsgrösse zur Verfügung.

5.3.1 Ziele der Simulationsstudie

In den meisten bisherigen Forschungsprojekten zur solaren Regeneration lag der Schwerpunkt auf der Fragestellung, wann eine Regeneration notwendig ist und ob damit die Effizienz verbessert werden kann. Insbesondere die Erdreichregeneration mittels Solarkollektoren wurde in den letzten Jahren intensiv untersucht und schon in diversen Anlagen umgesetzt. Einige davon wurden auch wissenschaftlich begleitet [18], [50].

In den nachfolgenden Untersuchungen wurde der Fokus auf die Überwindung von Einschränkungen und auf die wirtschaftlichen Vorteile der Regeneration gelegt:

- Können mit Regeneration Einschränkungen überwunden werden und damit Systeme realisiert werden, welche ohne Regeneration nicht möglich wären?
- Unter welchen Bedingungen lohnt sich Regeneration wirtschaftlich, auch wenn keine technische Notwendigkeit besteht?
- Lohnt es sich wirtschaftlich mehr zu regenerieren als technisch notwendig ist?

5.3.2 Modellierung

Diese Simulationen wurden mit dem Modell 1 gemäss Abschnitt 5.2.1 durchgeführt. Als Regenerationsquelle wurden PV/T-Hybridkollektoren, unabgedeckte selektiv beschichtete Kollektoren und Luftwärmetauscher untersucht, wobei die Kollektorfeldgrösse und die Wärmetauschergrösse variiert wurden. Die Sondentiefe wurde optimiert auf den Grenzfall nach SIA 384/6 (-3 °C Sondeneintrittstemperatur nach 50 Jahren) sowie für einzelne Fälle für den Betrieb ohne Frostschutzmittel (4 °C Sondeneintrittstemperatur nach 50 Jahren).

Die Simulationen wurden mit den Regenerationseinrichtungen gemäss Tabelle 4 durchgeführt.



Tabelle 4: Dimensionierung der Regenerationseinrichtungen für die Simulationen

Heizleistung	PVT [m ²]	USK [m ²]	LWT [kW/K]
60 kW	0, 25, 50 75 100, 200, 300, 400	Nicht simuliert	0, 2.4, 4.8, 7.2, 9.6
120 kW	0, 50, 100, 150 200, 400, 600, 800	Nicht simuliert	0, 4.8, 9.6, 14.4, 19.2
240 kW	0, 100, 200, 300, 400, 800, 1200, 1600	0, 100, 200, 300, 400, 800, 1200, 1600	0, 9.6, 19.2, 28.8, 38.4

5.3.3 Resultate und Diskussion: Regeneration mit Solarkollektoren

Wie verhält sich der unabgedeckte selektive Kollektor (USK) gegenüber dem Hybridkollektor (PV/T)? Die Abbildung 13 zeigt den spezifischen Mehrertrag an kWh/m²Kollektor/m_{Sonde} des USK im Vergleich zum PV/T für die Simulationen mit dem 240 kW Neubau-Gebäude, jeweils geplottet auf das Verhältnis von Kollektorfläche zu Sondenmetern und zum Regenerationsgrad. Verglichen werden jeweils Simulationen mit gleichem Sondenfeld und Kollektorfläche, lediglich die Sondentiefe ist unterschiedlich. Für den Vergleich mit der Sondenlänge wird der Mittelwert zwischen der USK und der PV/T-Simulation verwendet. Im linken Plot sind drei Häufungen erkennbar. Es wird zusätzlich noch zwischen 5 m und 10 m Sondenabstand unterschieden.

A: Kollektorfeldgrösse 100-400 m². Der Mehrertrag steigt linear mit dem Verhältnis von Kollektorfläche zu Sondenmetern. Im rechten Plot zeigt sich, dass dieses Feld die Regenerationsgrade bis 80% abdeckt. In diesem Bereich wird zwischen 0 und 4% Sondenmeter eingespart (Abbildung 14 links).

B: Kollektorfeldgrösse 800 m². Der Mehrertrag ist auf der Fortsetzung der Linie des A-Bereichs. Der Regenerationsgrad liegt zwischen 80 und 100%, die Einsparung an Sondenmetern von 5 und 9 %.

C: Kollektorfeldgrösse 1200 und 1600 m². Der Mehrertrag und die Einsparung an Sondenmetern sind stark gestreut. Dieser Bereich liegt bei Regenerationsgraden >100%.

Die Resultate zeigen, dass der Vorteil des USK gegenüber dem PVT mit steigendem Regenerationsgrad zunimmt und zu Sondenmetereinsparungen bis 9% führen kann. Ab einem Regenerationsgrad >100% nimmt dieser Vorteil jedoch wieder ab. Wie sich in der Wirtschaftlichkeitsberechnung (Abschnitt 5.3.6) zeigt, ist eine Regeneration >80% jedoch kaum mehr wirtschaftlich. Der Mehrertrag nimmt mit zunehmender Sondentiefe und zunehmendem Regenerationsgrad (Häufungen A-B-C) zu (Abbildung 14 rechts).

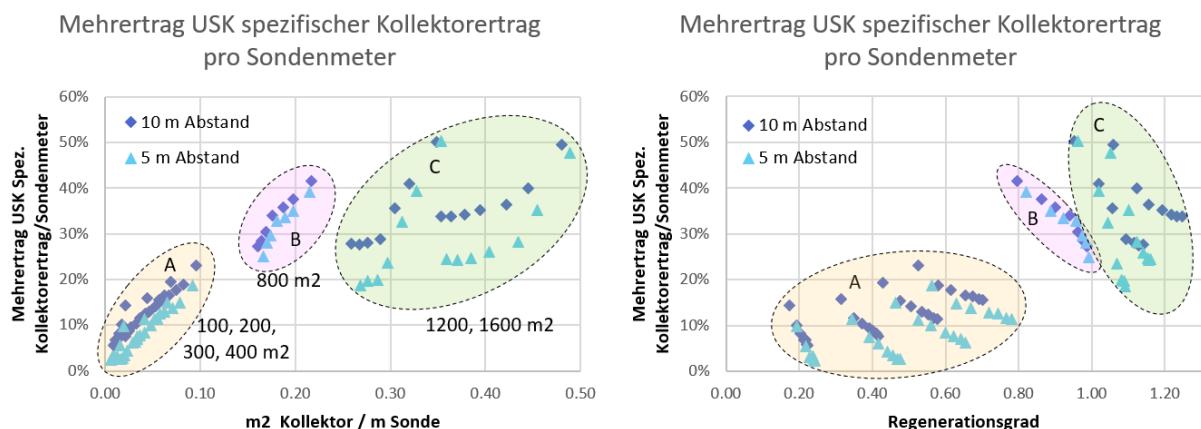


Abbildung 13: Vergleich des spezifischen Ertrags von USK und PVT

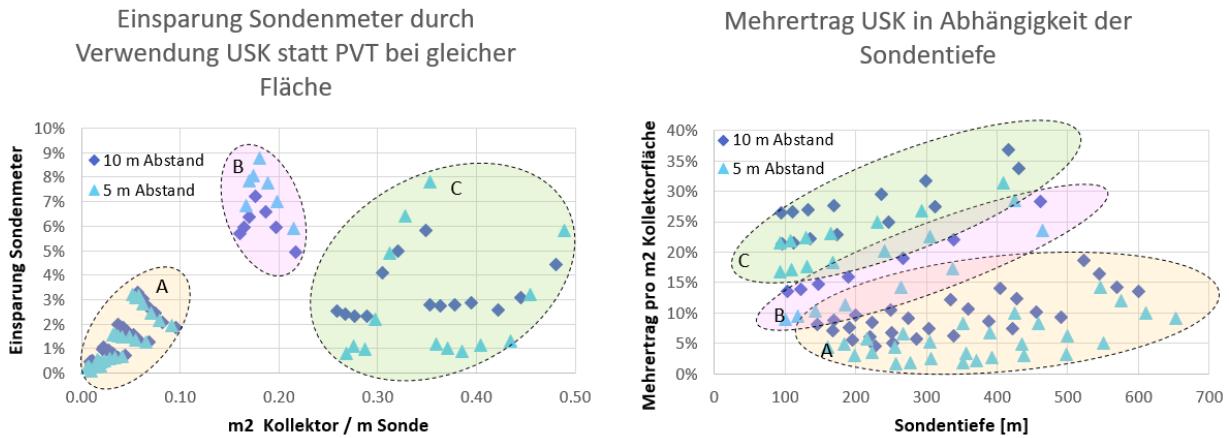


Abbildung 14: Einsparung an Sondenmetern durch die Verwendung von USK statt PV/T und Mehrertrag in Abhängigkeit der Sonden tiefe.

5.3.4 Resultate und Diskussion: Regeneration mit Luftwärmetauscher

Einfluss der Regelstrategie

In den Simulationen wurden vier unterschiedliche Regelstrategien untersucht:

Regelstrategie	Sole-Volumenstrom	Luft-Volumenstrom
RS1	Stark abhängig von Ta	Immer 100%
RS2	Stark abhängig von Ta	Proportional zu Sole
RS3	Schwach abhängig von Ta	Immer 100%
RS4	Schwach abhängig von Ta	Tagsüber 100%, nachts aus

Allen Regelstrategien ist gemeinsam, dass der Luftwärmetauscher nur betrieben wird, wenn die Temperaturdifferenz über der Sole > 0.5 K ist. Da sich diese Temperaturdifferenz erst im Betrieb eingestellt, wird der LWT periodisch eingeschaltet (alle 2 h) und wieder ausgeschaltet, wenn sich die Temperaturdifferenz nicht innerhalb von 10 min einstellt (Polling). Der LWT in der Anlage Wetzwil wird ebenfalls mit Polling betrieben. Der Sole-Volumenstrom wurde in Abhängigkeit der Außentemperatur geregelt gemäss Abbildung 15 links. Die Regelstrategie RS1 entspricht dabei der Umsetzung in der Anlage in Wetzwil.

Es zeigte sich, dass mit der Strategie RS1 und RS3 bessere Ergebnisse erreicht werden als mit der Strategie RS2 (Abbildung 15 rechts). Der elektrische Aufwand für die Lüfter ist zwar höher, wird aber überkompensiert durch einen 50-100% höheren Ertrag. Mit einer Elektro-Thermischen Verstärkung (ETV¹) von 83 liegt der Strombedarf für die Lüfter bei weniger als 5% desjenigen für die Wärmepumpe. Mit guter Auslegung des Wärmetauschers und etwas höheren Investitionskosten kann die ETV auch verdoppelt werden.

Mit der Regelstrategie RS3 kann insbesondere in den kalten Jahreszeiten mehr Leistung mit dem Luftwärmetauscher entzogen werden wie dies die Abbildung 15 veranschaulicht. Die Auslegungsleistung des Luftwärmetauschers wird dabei in Relation zur Leistung der Wärmepumpe angegeben (Leistungsanteil LWT). Wird der Wärmetauscher in der Nacht ausgeschaltet (RS4) sinkt der Jahresertrag um ca. 1/3.

¹ Elektrothermische Verstärkung, entspricht dem Verhältnis von produzierter Wärmeleistung zum elektrischen Leistungsaufwand bei passiven Systemen (z.B. Pumpen oder Ventilatoren)

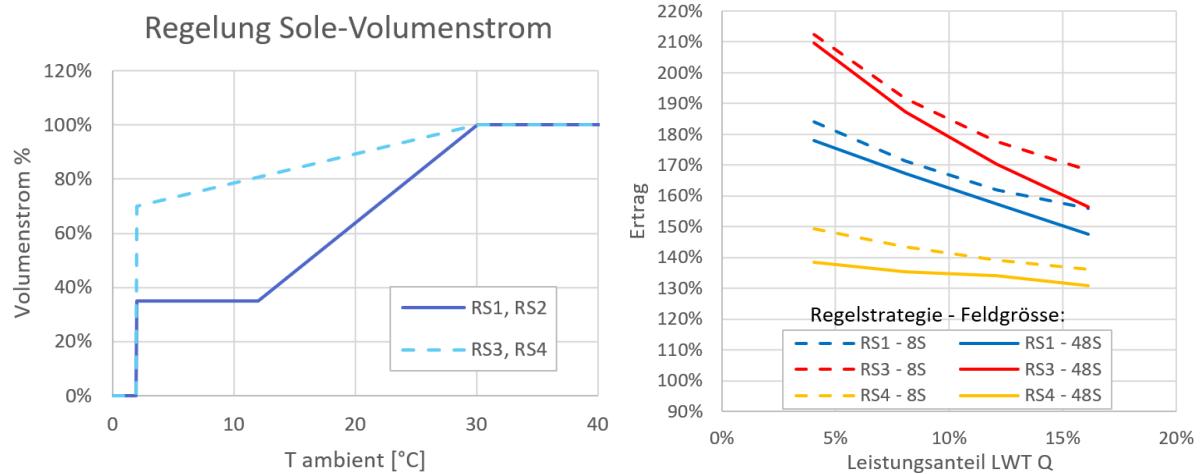


Abbildung 15: Vergleich der Regelstrategien RS1, RS3 und RS4 gegenüber RS2 bei Feldgrößen von 8 bzw. 48 Sonden für 240 kW Heizleistung.

Nutzen des Luftwärmetauschers

Die Abbildung 16 zeigt die in den Simulationen erzielten Einsparungen an Sondenmetern durch den Einsatz eines Luftwärmetauschers. Der Nutzen des Luftwärmetauschers erhöht sich mit zunehmender Feldgröße und abnehmender Bohrtiefe.

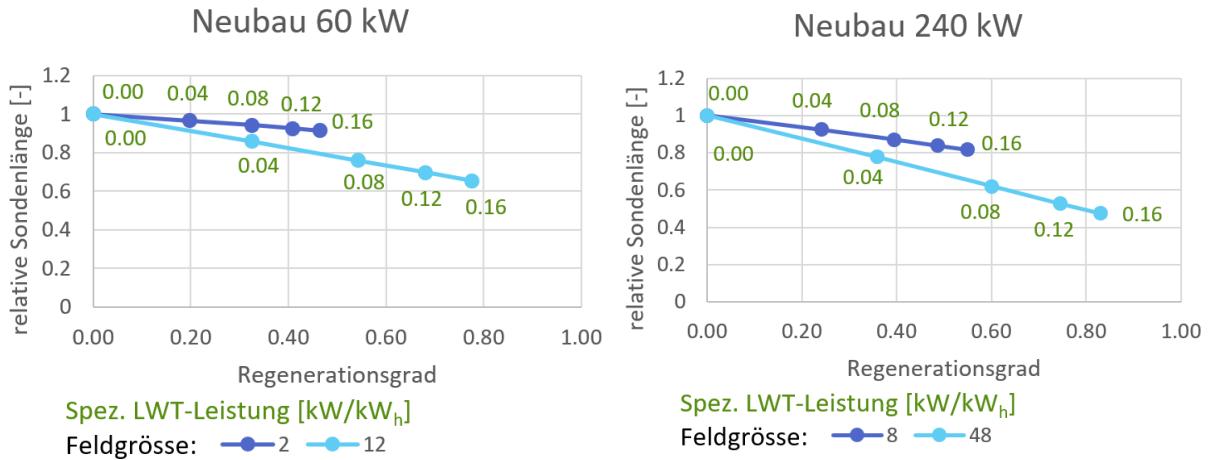


Abbildung 16: Einsparung an Sondenmetern durch den LWT für unterschiedliche Heizlast des Gebäudes.

Kostenermittlung

Aufgrund der relativ wenigen realisierten Projekte gibt es noch nicht viel Erfahrung mit den Systemkosten. Die Tend AG ermittelte die Systemkosten auf der Basis von Bauabrechnungen aus drei realisierten Projekten. Dabei zeigte sich, dass die projektspezifischen Erschliessungskosten (Rohrleitungen) einen erheblichen Einfluss auf die Kosten haben können. Lediglich 30-40% der Kosten entfallen demnach auf die Beschaffung und Installation des Wärmetauschers. Für die in der Kostenkalkulation verwendete Kostenfunktion (Abbildung 17) wurden Ausreisser in den Erschliessungskosten korrigiert.

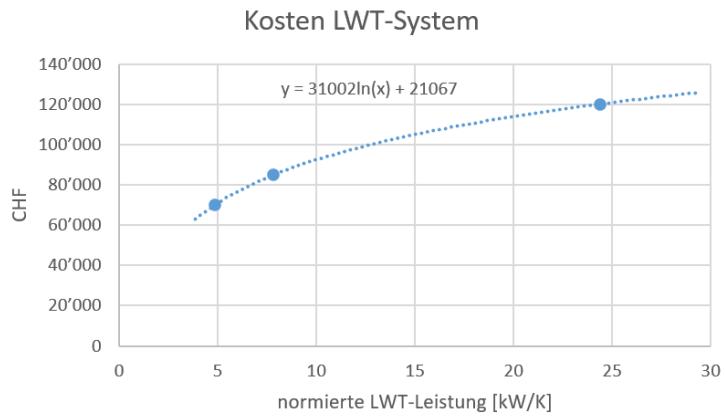


Abbildung 17: Kostenermittlung für den Luftwärmetauscher

5.3.5 Notwendigkeit und Wirtschaftlichkeit der solaren Regeneration

Mehr Abstand statt Regeneration

Die Abbildung 18 zeigt, wie sich die benötigte Sondentiefe verringert mit zunehmendem Abstand zueinander. Eine Verdopplung des Sondenabstands ermöglicht eine Einsparung von ca. 40% der Sondenmeter oder erzielt damit den gleichen Effekt wie eine Regeneration von 50-60%.

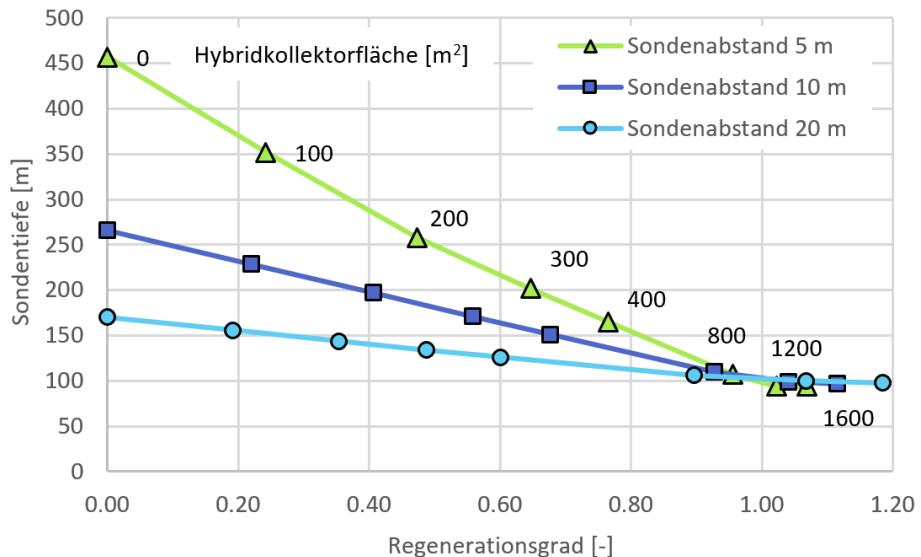


Abbildung 18: Abstandsvergrösserung als Alternative zur Regeneration (240 kW Neubau, 48 Sonden)

Notwendigkeit und Wirtschaftlichkeit der Regeneration

Aus den Simulationsergebnissen wurden die spezifischen Jahreskosten in [CHF/kW] berechnet und daraus eine neue Darstellung, nachfolgend Kostenfeld genannt, entwickelt, welche für eine gegebene Situation aus Heizleistungsbedarf und Platzverhältnissen für Erdwärmesonden (Grundstücksfläche, Bohrtiefe) und vorgegebenen Kostenparametern die Notwendigkeit und Wirtschaftlichkeit einer Regeneration zeigt (Abbildung 19).

Grundlage für das Kostenfeld sind die Ergebnisse aus 56 einzelnen Simulationen (repräsentiert durch die kleinen Kreise in der Darstellung) mit Varianz des Sondenfeldes (rote Linien) und unterschiedlich grossen Anlagen für die Regeneration (im Beispiel PVT mit unterschiedlicher Fläche).



Die aus den Simulationen ermittelte minimale Bohrtiefe, um das Auslegungskriterium nach SIA 384/6 einzuhalten ist durch die farbigen Flächen repräsentiert. Dargestellt ist ein Beispiel für ein Neubaugebäude mit einer Heizleistung von 240 kW und einer Energiebezugsfläche von 14'600 m². Einschränkende Parameter sind (Annahmen für dieses Beispiel):

- Flächenbegrenzung: Grundstücksfläche von 3216 m², entsprechend 13.4 m²/kW Heizleistung. Mit einem Abstand von 10 m können 32 Sonden (Anordnung 4x8) auf der Fläche gebohrt werden.
- Bohrtiefenbegrenzung von 300 m
- Dachfläche für Solarnutzung. Bei einem 10-stöckigen Gebäude ergibt das eine Dach-Grundfläche von 1460 m². Mit der Annahme einer 60% Ausnutzung steht damit eine Fläche von 876 m² Netto-Solarfläche zur Verfügung.

Aus obigen Einschränkenden Parametern ergibt sich der Lösungsraum oberhalb der Bohrtiefenbeschränkung und unterhalb der Flächenbegrenzung. Damit zeigt sich:

- Eine Regeneration von mindestens 20% ist zwingend notwendig. Ohne Regeneration müsste entweder tiefer gebohrt oder mehr Sonden versetzt werden,
- Die wirtschaftlichste Lösung wird bei einem Regenerationsgrad von 60-80% erreicht.

Die gewählte Lösung (Markierung in der Abbildung) hat 24 Sonden (4x6) mit einer Bohrtiefe von 256 m und 400 m² PVT-Kollektoren zur Regeneration (Simulationsparameter).

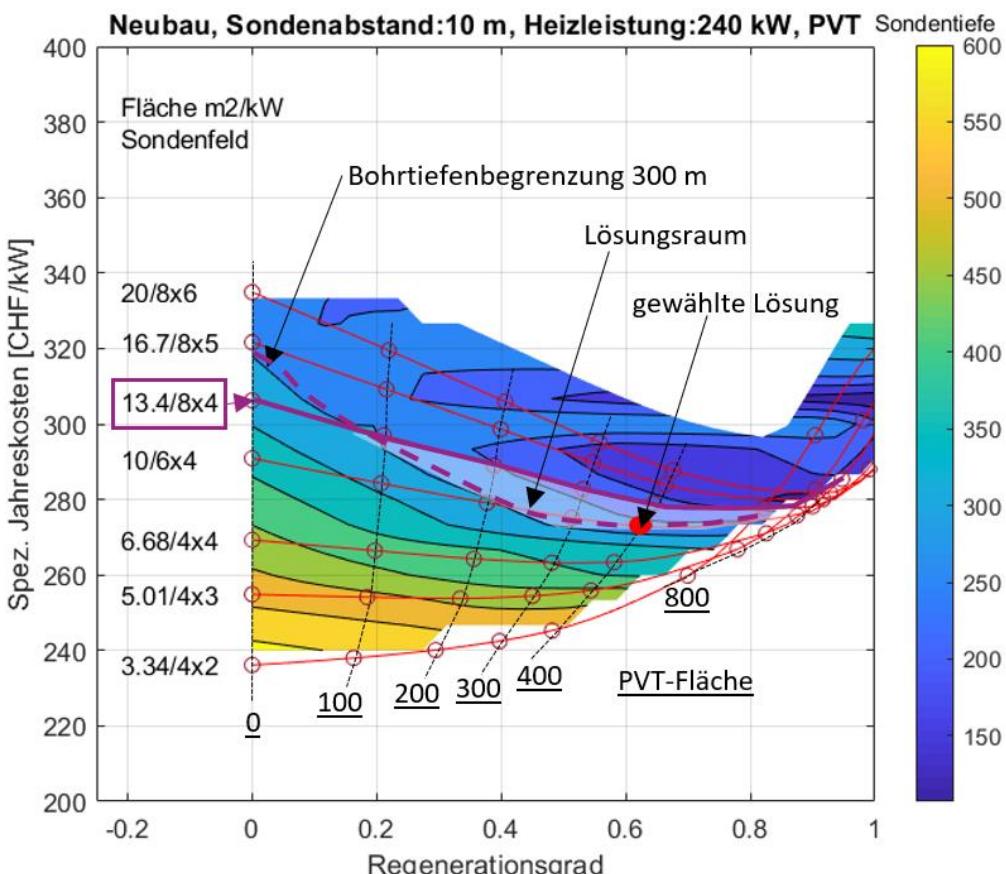


Abbildung 19: Kostenfeld als Darstellung der spezifischen Jahrestkosten in Abhängigkeit des Regenerationsgrads für einen Neubau mit 240 kW Heizlast. Im diesem Beispiel liegt das Kosten-Optimum bei maximal 60-80% Regeneration.

Der Regenerationsgrad auf der x-Achse kann auch als Verteilung zwischen zwei Quellen interpretiert werden, wodurch sich diese Darstellung auch für andere Systeme wie die Spitzenlastsonde nutzen lässt. Es ist ersichtlich, dass mit Bohrtiefenbeschränkung und Platzbeschränkung eine Regeneration eher erforderlich und wirtschaftlich ist. Die wirtschaftliche Überlegenheit einzelner Lösungen gegenüber anderen ist stark von der jeweiligen Situation und von den Kostenparametern (Verzinsung, Bohrkosten etc.) abhängig.

Im Anhang 9.6 wird ein Fallbeispiel des Kostenfeldes anhand Einschränkungen und Regenerations-technologien vertiefter ausgeführt.

Die Abbildung 20 zeigt das Verhältnis der eingesparten Sondenmeter pro m² PV/T für verschiedene Heizleistungen und Betrieb der Sonde mit Glykol oder Wasser in Anlehnung an die in [50] publizierte Darstellung. Die ermittelten Werte für die eingesparten Sondenmeter pro m² PV/T decken sich auch gut mit den in [50] publizierten Werten, soweit ähnliche Bedingungen (Leistung, Sondentiefe) herrschen. Zu beachten ist, dass mit zunehmender Sondentiefe die Einsparung pro m² PV/T zunimmt, was den stärkeren Effekt bei zunehmender minimaler Sondentemperatur und zunehmender Heizleistung bewirkt. Die Darstellung zeigt nur die Investitionseinsparung bezüglich einer nicht regenerierten Sonde (Basissystem) für die gleiche minimale Eintrittstemperatur. Wird beim Basissystem die gleiche Bohrtiefe zugrunde gelegt, ist die Einsparung signifikant höher, als wenn die gleiche Feldgrösse (verminderte Bohrtiefe bei Regeneration gegenüber dem Basissystem) als Vergleichsgrundlage verwendet wird, da durch die tiefere Bohrung im Vergleichssystem eine höhere spezifische Sondenbelastung möglich ist.

Die blauen Kreuze zeigen die Kosten für Sonden und Regeneration im Verhältnis zu einem unregenrierten System (100%). Das Kostenoptimum liegt im Bereich von 50 bis 80% Regeneration, darüber gibt es einen steilen Anstieg. Die Grafik lässt keine Aussage zu über den Kostenvergleich zwischen Glykol- und wassergeführten Systemen, da sich die relativen Kosten jeweils auf das System mit gleichem Fluid beziehen. Für die wassergeführten Systeme sind jeweils deutlich mehr Sondenmeter notwendig.

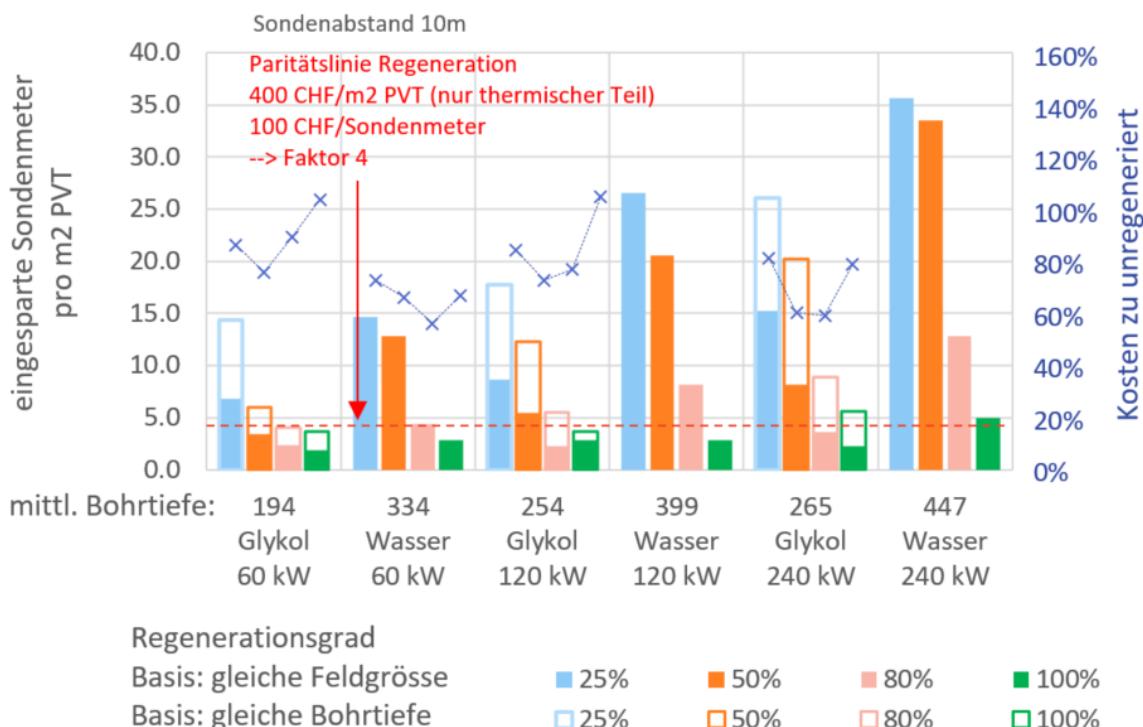


Abbildung 20: Refinanzierung der Regenerationsquelle: Die Anzahl eingesparter Sondenmeter pro m² PV/T ist abhängig vom Regenerationsgrad.



5.3.6 Wirtschaftlichkeit der Regeneration

Die Abbildung 21 zeigt die spezifischen jährlichen Kosten pro kW installierter Heizleistung für die verschiedenen untersuchten Systemvarianten mit Regeneration und einer Sondenlänge zwischen 225 und 270 m. Die niedrigsten Kosten werden mit dem unabgedeckten Solarkollektor (USK) kombiniert mit PV erreicht (400 m² USK, 800 m² PV, ca. 1 m² Solar pro 12 m² EBF). Für den selbst produzierten Strom wurde jeweils ein Eigenverbrauchsanteil, abhängig vom gesamten Strombedarf des Gebäudes, berechnet.

Die teuersten Systeme sind diejenigen mit gegen 100% Regeneration, wobei selbst diese durch die PV-Erträge in den Jahreskosten fast ein Drittel günstiger werden. Die Investitionskosten sind jedoch nach wie vor hoch.

Die Auslegung auf Wasser als Sondenfluid erfordert trotz Regeneration die gleiche Anzahl Sonden (48) wie das unregenerierte, kälter betriebene System², d.h. die Regeneration ermöglicht den Betrieb mit Wasser, aber führt nicht zu Einsparungen in der Anzahl der benötigten Erdsonden. Die Regeneration mit PVT wird nicht refinanziert durch die Verbesserung der Effizienz.

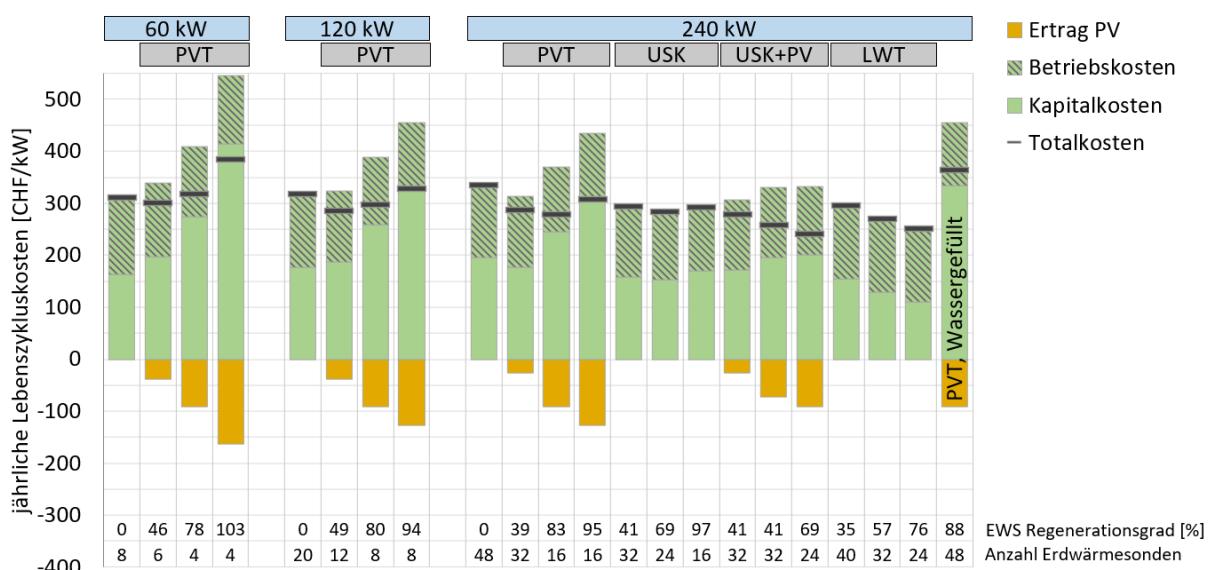


Abbildung 21: Wirtschaftlichkeit der Regeneration beim Neubau. Bei der Variante USK + PV wurde jeweils die gleiche Dachfläche genutzt wie bei der Variante PVT, jedoch die Dachfläche, welche nicht für die USK genutzt wird, mit PV belegt.

Die Abbildung 22 zeigt die Wirtschaftlichkeit für verschiedene Regenerationslösungen beim Bestandsbau, Abbildung 23 zeigt die Verortung im Kostenfeld einiger dieser Lösung. Zu beachten ist, dass im Bestandsbau das Verhältnis von Heizleistung zu Energiebezugsfläche grösser ist. Beim 240 kW Bestandsgebäude beträgt die Energiebezugsfläche 4160 m². Für ein 4-geschossiges Gebäude ergibt sich damit eine Dachfläche von 1040 m². Mit einer Netto-Solarfläche von 60% der Dachfläche kann die Solaranlage maximal 624 m² gross sein, welche von den Lösungen M3, L2, L3, L6 und L9 überschritten wird. Bei der Lösung L8 beträgt die USK-Fläche nur 400 m², die PV-Fläche ist für die Wärmeerzeugung jedoch nicht mehr direkt relevant.

² Die Simulationen wurden wie alle anderen Simulationen mit einem Wasser-Glykol-Gemisch als Wärmeträger durchgeführt. Die minimale Eintrittstemperatur in die Sonde wurde jedoch auf 4 °C festgelegt, womit auch Wasser als Wärmeträgermedium verwendet werden könnte.

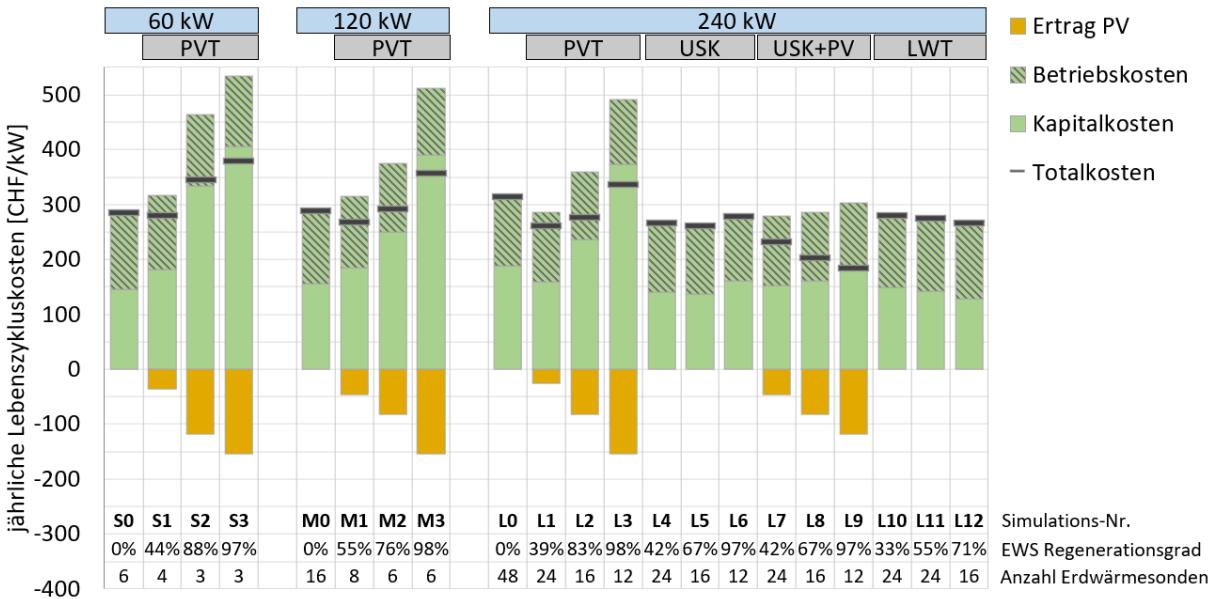


Abbildung 22: Wirtschaftlichkeit der Regeneration beim Bestandsbau. Bei der Variante USK + PV wurde jeweils die gleiche Dachfläche genutzt wie bei der Variante PVT, jedoch die Dachfläche, welche nicht für die USK genutzt wird, mit PV belegt.

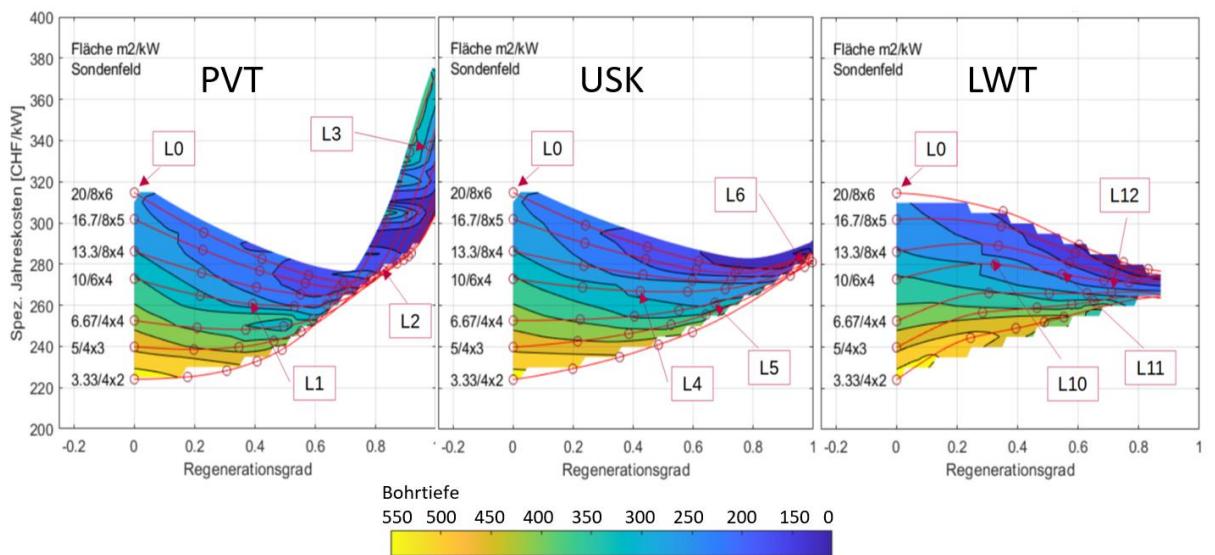
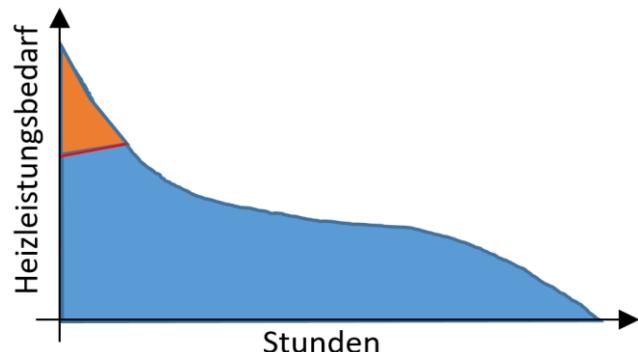


Abbildung 23: Kostenfeld für verschiedene Regenerationsvarianten im Bestandsbau mit 240 kW Heizleistung und 10 m Sondenabstand mit den entsprechenden Simulationsnummern gemäss Abbildung 22.



5.4 Strategie Spitzenlastdeckung

In der Strategie Spitzenlastsonde wird eine aufgrund der Randbedingungen leistungsbeschränkte Grundlastquelle mit Erdwärmesonden (EWS) als Spitzenlastquelle kombiniert. Für die weiteren Untersuchungen wird als Grundlastquelle eine Luftwärmepumpe angenommen und als Spitzenlastquelle Erdwärmesonden betrachtet. Die Spitzenlastquelle wird zugeschaltet, wenn die Leistung der Luftwärmepumpe ausgeschöpft ist.



5.4.1 Ziele der Simulationsstudie

Mit der Simulationsstudie wurde untersucht, wie sich die benötigten Sondenmeter bei Variation des Lastanteils der Solewärmepumpe sowie bei der Variation unterschiedlicher Parameter und Lastprofile verhält. Als Vergleichsbasis dient dabei jeweils ein nur mit EWS betriebenes System ("Volllastsonden-System"). Folgende Fragen sollen geklärt werden:

- Wie viele Sonden können durch Spitzenlastbetrieb im Vergleich zu einem reinen Erdwärmesonden-System eingespart werden?
- Wie verändert sich die Sondentemperatur über die Jahre bei unterschiedlichen Spitzenlastanteilen?
- Wie können die verschiedenen Quellen hydraulisch integriert werden und welchen Einfluss hat der Druckverlust in den Sonden?
- Welche Systemeffizienz kann erreicht werden?
- Unter welchen Randbedingungen lohnt sich der Spitzenlastbetrieb mit Erdwärmesonden aus wirtschaftlicher Perspektive?

5.4.2 Modellierung

Diese Simulationen wurden mit dem Modell 2 gemäss Abschnitt 5.2.1 durchgeführt. Die maximale Leistung der Luftwärmepumpe wird dabei als Parameter eingegeben und variiert. Primär wird die geforderte Leistung durch die Luftwärmepumpe geliefert. Erst wenn diese die maximale Leistung erreicht, wird die Sole-Wärmepumpe zugeschaltet.

5.4.3 Resultate und Diskussion

Reduktion der benötigten Anzahl Erdwärmesonden

Abbildung 24 zeigt die Resultate aus der Parametervariation. Die x-Achse zeigt den Anteil der Spitzenlast (bezogen auf die Heizleistung), die die Erdwärmesonde übernimmt. Die y-Achse zeigt den Anteil der benötigten Sondenmeter gegenüber einem System, welches die Wärme nur aus Erdwärmesonden bezieht (im Weiteren "Volllastsonde" genannt). Der Anteil wurde auf Basis einer Normsondenlänge von 215 m berechnet.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nicht alle Variationen angezeigt, sondern nur jeweils ein exemplarischer Fall der Abweichung vom Standardwert. Im Weiteren wird in der Abbildung der durch die Spitzenlastsonde übernommene Energieanteil für das normale und das kalte Wetter angezeigt.

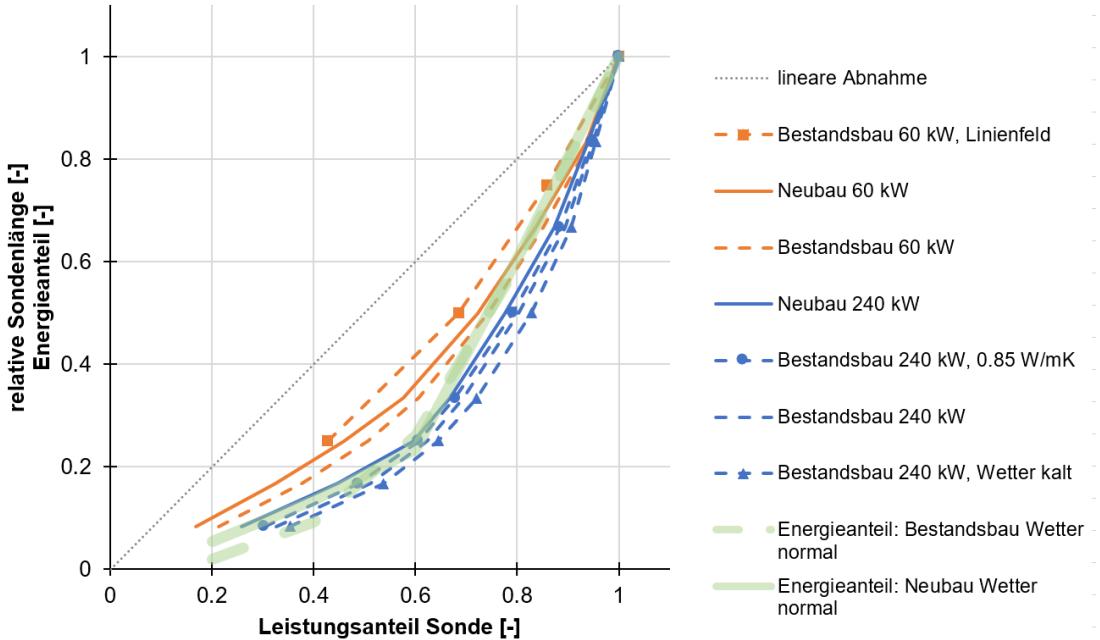


Abbildung 24: Parametervariation der Spitzenlastdeckung mit Energieanteil für die Standardparameter und ausgewählte Parametervariationen. Die grau gepunktete Linie entspricht einer linear mit der Leistung reduzierten relativen Sondenlänge.

Folgende Erkenntnisse ergeben sich aus den Parametervariationen:

- Bei Spitzenlastbetrieb können überproportional Sondenmeter gegenüber einem reinen Erdwärme- sondensystem eingespart werden
- Bei grösseren Anlagen bzw. kompakteren Feldern ist die Einsparung grösser, da dort der Feldeffekt (gegenseitige Beeinflussung der Sonden) bei der Volllastsonde mehr zum Tragen kommt
- Zwischen Bestands- und Neubau gibt es keine grossen Unterschiede
- Die Eigenschaften der Hinterfüllung und das Wetterprofil haben keinen wesentlichen Einfluss
- Die relativen Sondenmeter (im Verhältnis zum Volllastsystem) lassen sich für grössere Anlagen über den Energieanteil gut annähern, wobei diese Näherung vor allem im kleinen bis mittleren Leistungsanteil gut passt. Für kleinere Anlagen wird mit der Näherung über den Energieanteil die benötigte relative Sondenlänge unterschätzt

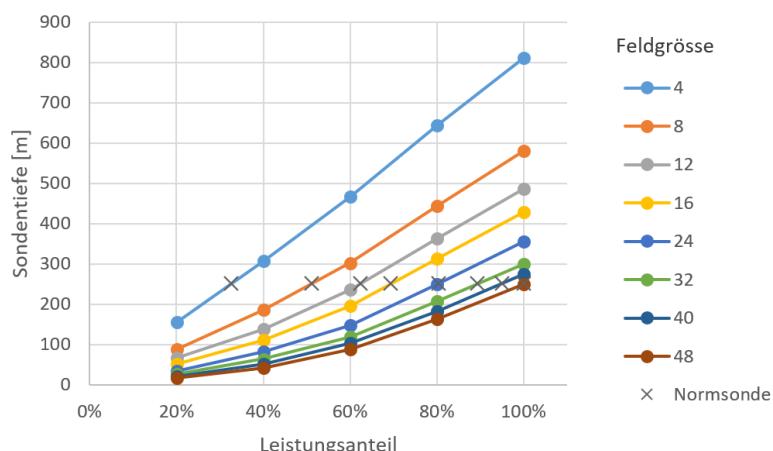


Abbildung 25: Der Leistungsanteil bei fixer Sondenlänge ergibt sich aus der linearen Interpolation zwischen den einzelnen, aus den Simulationen ermittelten Leistungsanteilen



Die Bohrtiefen unterscheiden sich in den unterschiedlichen Simulationen, womit eine tiefere Sonde nicht direkt mit einer untieferen verglichen werden kann. Daher wurde auf eine einheitliche Sondenlänge zwischen den einzelnen Ergebnissen interpoliert gemäss Vorgehen in Abbildung 25 (exemplarisch).

Temperaturverhalten in der Erdwärmesonde

Da sich das Erdreich um die Spitzenlastsonde wesentlich stärker natürlich regeneriert als um die Vollastsonde sinkt die minimale jährliche Sondeneintrittstemperatur über die gesamte Betriebsdauer weniger ab (Abbildung 26).

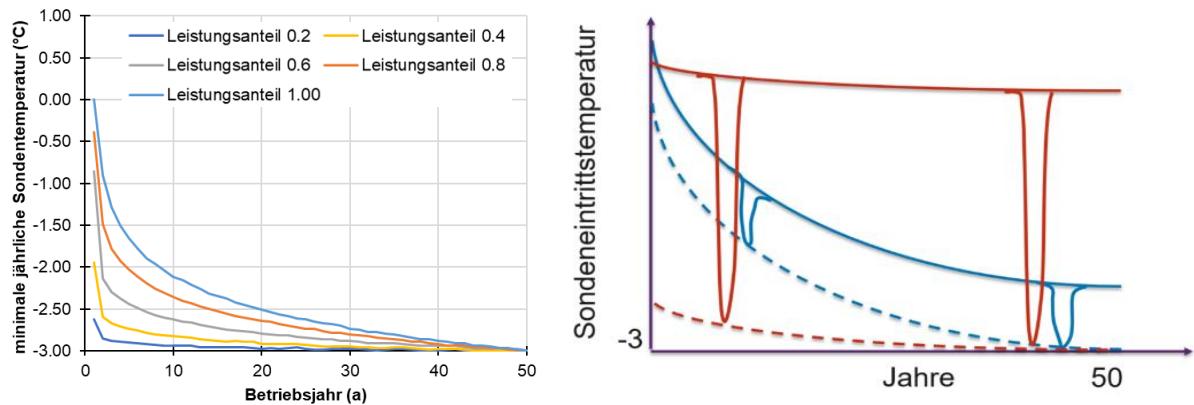


Abbildung 26: Minimale jährliche Sondeneintrittstemperatur für verschiedene Leistungsanteile der Erdwärmesonde. (links) und Differenz zwischen minimaler und maximaler Sondeneintrittstemperatur über 50 Jahre (rechts.) In der Spitzenlastsonde (rot) werden schon in den ersten Jahren sehr tiefe Eintrittstemperaturen erreicht, diese sinken aber kaum mehr weiter ab.

Damit steht ein grösseres nutzbares Temperaturgefälle zwischen Erdreich und Sondenfluid zur Verfügung, siehe Abbildung 26, was zu einer höheren spezifischen Entzugsleistung führt. Die Abbildung 27 zeigt beispielhaft die Werte aus den Simulationen für den 240 kW Bestandsbau. Bei einer Bohrtiefe von 300 m wird für das Vollastsondenystem ein Feld von 32 (Feld 8x4) Erdwärmesonden in einem Abstand von 10 m benötigt. Diese können nur mit 18 W/m belastet werden, da sie sich stark gegenseitig beeinflussen (Feldeffekt). Bei 60% Leistungsanteil reduziert sich das Feld auf 8 Sonden (Feld 4x2), welche mit 45 W/m belastet werden können. In der Simulation sind diese immer noch 10 m auseinander. Durch eine Vergrösserung des Abstands kann die spezifische Leistung nochmals erhöht werden.

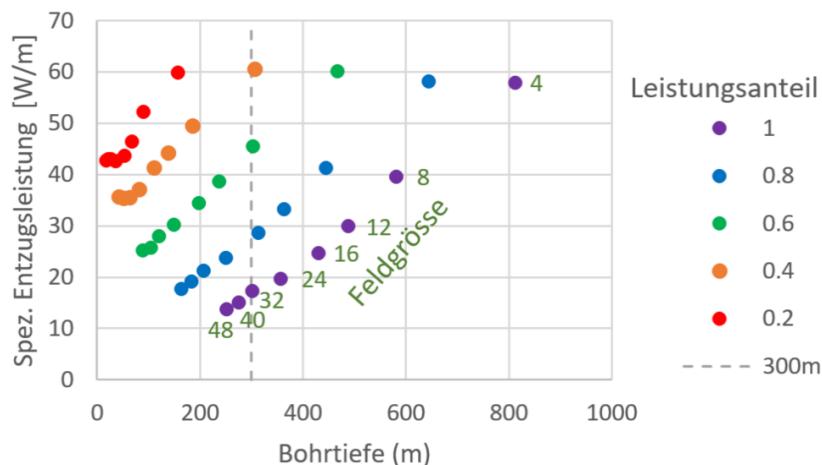


Abbildung 27: Spezifische Entzugsleistung abhängig von Bohrtiefe und Leistungsanteil für 240 kW Heizleistung

Hydraulische Auslegung und Einbindung

Die Simulationen wurden mit einer konstanten Spreizung von 3 K über die Erdwärmesonden durchgeführt. Wegen der höheren Entzugsleistung ist der Druckverlust und damit der elektrische Leistungsbedarf der Umwälzpumpe höher als bei Betrieb als Volllastsondenystem. Durch die verhältnismässig geringe Volllaststundenzahl ergibt sich trotz der hohen Leistung ein geringerer Energieverbrauch. Entscheidend dabei ist jedoch ein leistungsgeregelter Betrieb der Umwälzpumpen, da die elektrische Leistung mit der dritten Potenz des Volumenstroms zunimmt. Im tiefen Teillastbereich (25-30%) wird in realen Anlagen auf Taktbetrieb umgestellt, was den Stromverbrauch im Vergleich zur hier durchgeföhrt Berechnung leicht erhöht.

Um den Einfluss verschiedener EWS-Typen auf den die Pumpenauslegung zu untersuchen, wurden Simulationen mit dem Programm "EWS" [51] durchgeföhrt.

Die Abbildung 28 zeigt verschiedene Sondenvarianten für ein Volllastsystem (100% EWS-Anteil) und ein Spitzenlastsystem (40% EWS-Anteil). Durch den Einsatz anderer Sondentypen (z.B. Jansen Powerwave [52]) kann das System optimiert und auch Bohrtiefe eingespart werden. Ebenfalls besteht ein Optimierungspotential durch die serielle Verschaltung von jeweils 2 Sonden (Bezeichnung "2s") um eine turbulente Strömung zu erzeugen. Der Anteil der elektrischen Energie für die Quellenpumpe am gesamten Strombedarf der Wärmeerpumpen liegt für das Volllastsonden-System bei ca. 3-7%, beim Spitzenlastsonden-System unter 1%. Mit einer höheren Spreizung kann der Druckverlust ebenfalls verringert werden, dieser Effekt wurde jedoch nicht näher untersucht. Bei Einsatz von nicht drehzahlgeregelten Wärmeerpumpen ist jeweils der maximale Volumenstrom nötig, wodurch sich der Strombedarf für die Umwälzpumpen erhöht.

Umwälzpumpe Sondenkreis 240kW Bestandsbau

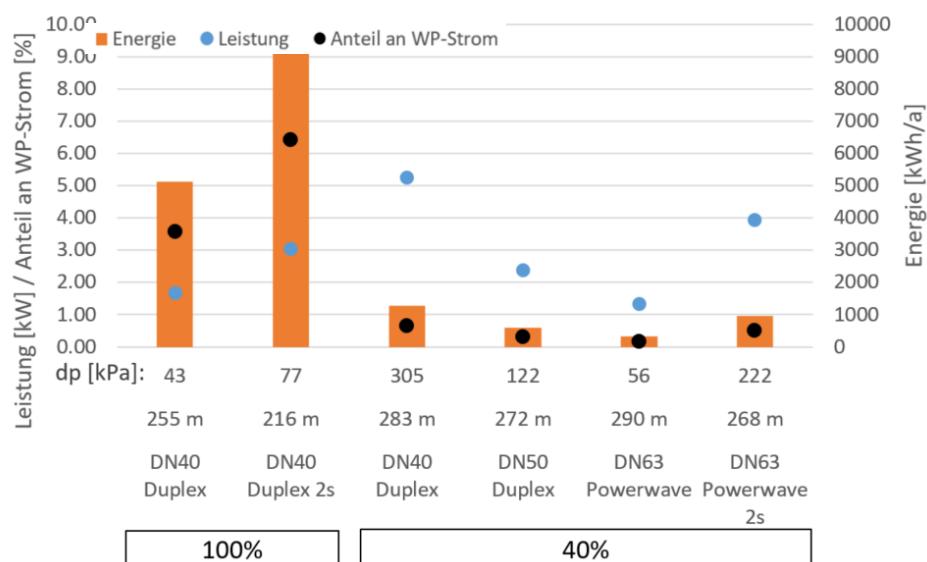


Abbildung 28: Druckverlust, Pumpenleistung und Pumpenstrom für die Spitzenlastdeckung 40% im Vergleich zur Volllastsonde. Für die hydraulischen Verbindungsleitungen und den Verdampfer wurden pauschal 30 kPa Druckverlust eingerechnet

Systemeffizienz

Mit zunehmendem Leistungsanteil der Spitzenlastsonde erhöht sich die Jahresarbeitszahl (JAZ). Die hier ausgewertete Jahresarbeitszahl entspricht der Systemgrenze des COP. Der Strombedarf für die Umwälzpumpen wurde nicht miteingerechnet, da dies, wie in Abbildung 28 gezeigt wurde, von der konkreten hydraulischen Auslegung abhängt und, insbesondere im Spitzenlastsystem, nur einen marginalen Anteil ausmacht.



Die Abbildung 29 zeigt die über 50 Jahre gemittelten JAZ (Total Heizenergie / Total Strombedarf). Im 100% System sinkt die JAZ von 4.9 im ersten Jahr auf 4 im letzten Jahr durch Absinken der Quellentemperatur. Im Spitzenlastsystem bleibt die JAZ über die gesamte Zeit ziemlich konstant, da durch den höheren Leistungsverzug bereits zu Anfang des Betriebs niedrige Erdreichtemperaturen erreicht werden, die sich aber aufgrund des geringen Energieentzugs von Jahr zu Jahr wieder natürlich regenerieren.

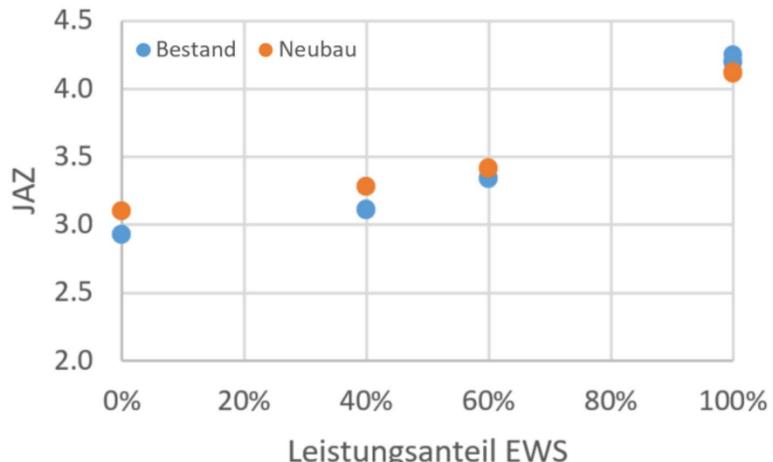


Abbildung 29: Mittlere JAZ über die Betriebszeit von 50 Jahren

5.4.4 Wirtschaftlichkeit

Die Spitzenlastdeckung wurde primär als Strategie zur Überwindung von Einschränkungen der primären Quelle untersucht. Im Kostenvergleich zeigt sich jedoch, dass sich auch ökonomische Vorteile ergeben, so dass ein kombiniertes System aus zwei Wärmequellen günstiger werden kann als ein reines EWS- oder ein reines Luftwärmepumpensystem. Im Neubau ergibt sich damit im Vergleich zu einem Luftwärmepumpensystem auch noch die Möglichkeit einer kostengünstigen Kühlung. Beim Bestandsbau wurde das Potential wegen meist ungeeigneten Wärmeübergabesystemen (Radiatoren) für diesen Zusatznutzen als beschränkt angenommen und daher nicht weiter untersucht.

Für den Kostenvergleich wurden einzelne Varianten aus den Simulationen übernommen. Die Sondenlängen sind nicht normiert, es wurden jedoch jeweils Varianten mit ähnlichen Sondenlängen in den Vergleich aufgenommen. Dieser wurde für 100% (reine EWS-Wärmepumpe), 60%, 40% und 0% (reines L/W-WP-System) Leistungsanteil durchgeführt. Der Vergleich erfolgt über die auf ein Jahr umgerechneten Lebenszykluskosten. Der Stromverbrauch wurde mit der über 50 Jahre gemittelten Arbeitszahl berechnet. Die Resultate sind in Abbildung 30 und Abbildung 31 dargestellt.

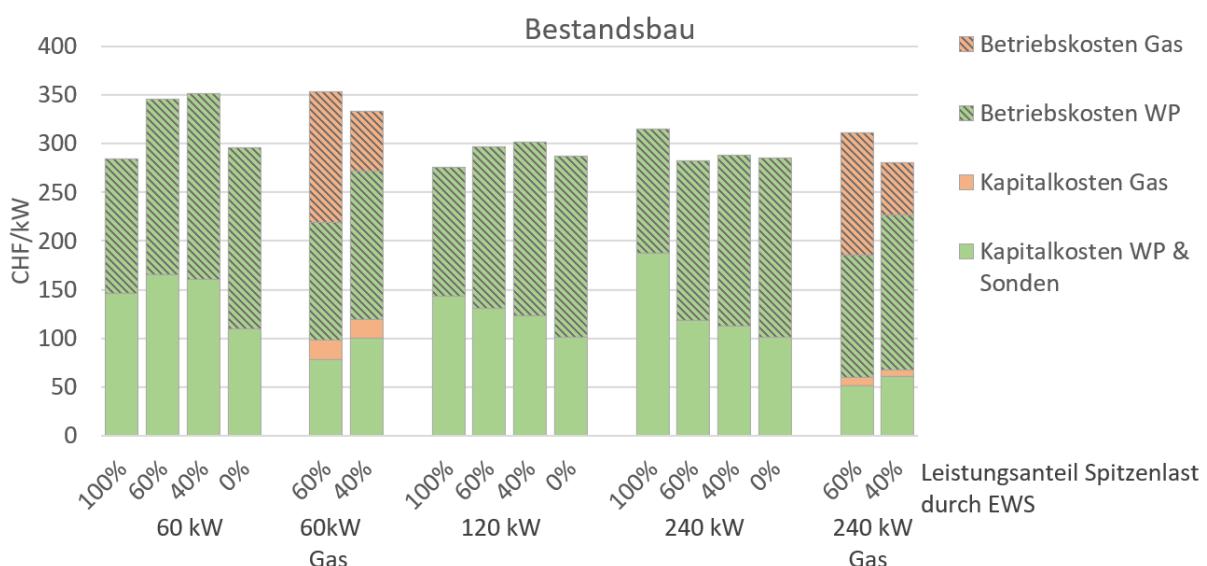


Abbildung 30: Spezifische Jahreskosten von Systemen mit Spitzenlastdeckung mit Luft als Grundlast im Bestand

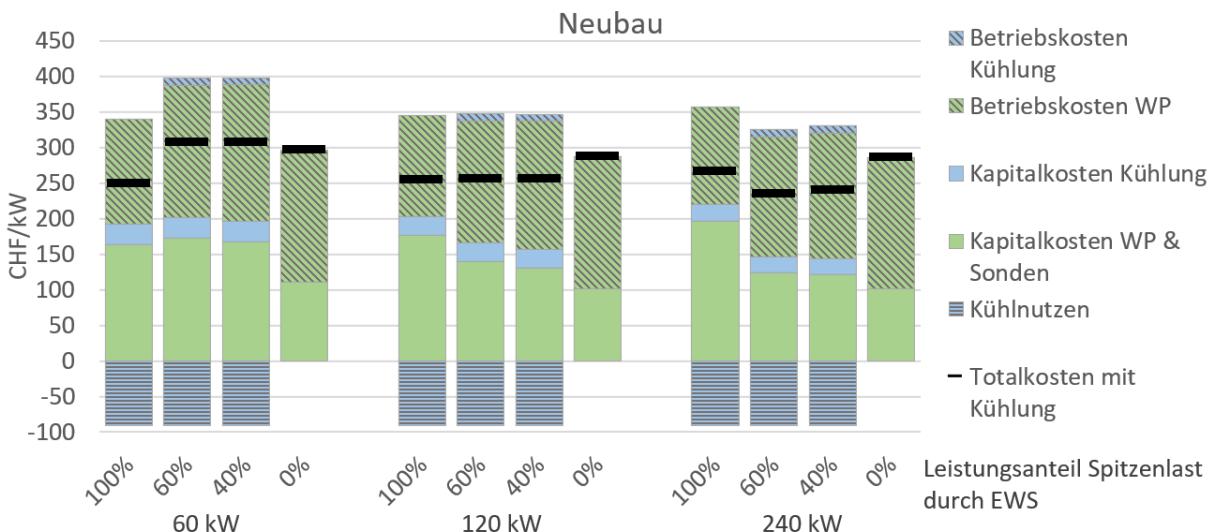


Abbildung 31: Spezifische Jahrestkosten für Systeme mit Spitzenlastdeckung mit Luft als Grundlast im Neubau.

Sensitivitätsanalyse

Die Abbildung 32 zeigt die Sensitivität verschiedener Kostenparameter des Spitzenlastsondensystems und die Vergleichssysteme (nur Luft, nur EWS). Die Sensitivität ist abhängig vom Leistungsanteil der Erdwärmesonden. Bei einem hohen Leistungsanteil (reines EWS-System) dominieren die Bohrkosten (orange gepunktete Linie). Beim reinen Luftsysteem dominieren die Stromkosten (grau gestrichelte Linie). Beim Spitzenlastsonden-System ist die Sensitivität gegenüber den Stromkosten (graue durchgezogene Linie) etwas entschärft im Vergleich zum reinen Luftsysteem, die Sensitivität gegenüber den Sondenkosten (orange durchgezogene Linie) deutlich entschärft gegenüber dem reinen Sondensystem.

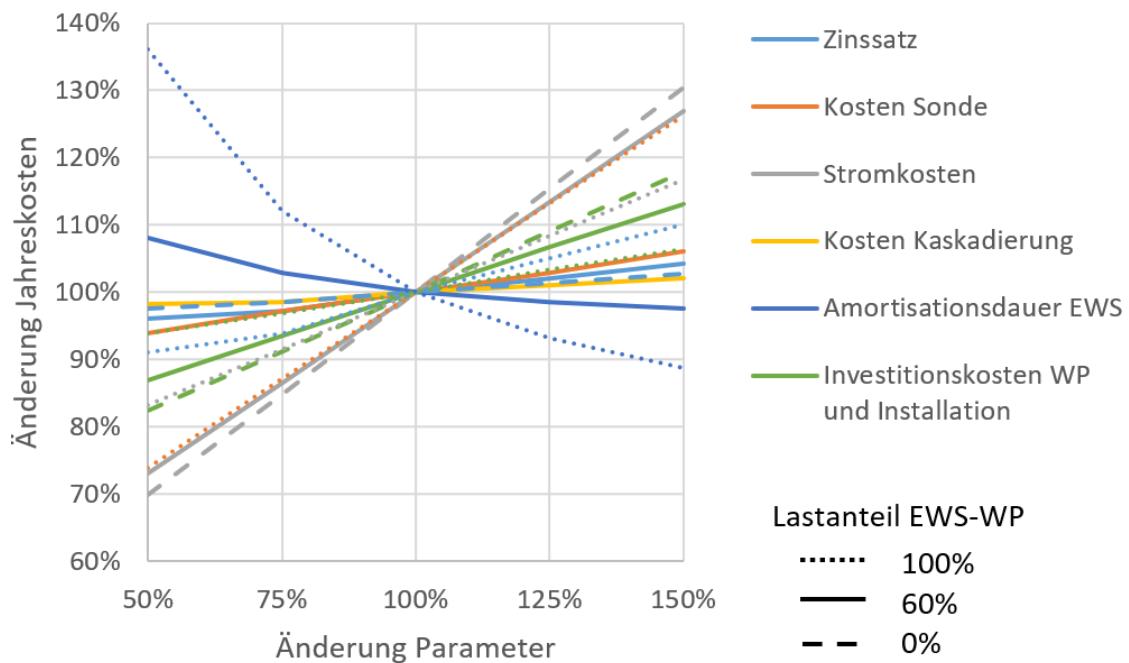


Abbildung 32: Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeit für den Bestandsbau mit 240 kW Heizleistung



Erkenntnisse:

- Bei der kleinen Leistung (60 kW) ergibt sich kein Kostenvorteil, die Mehrkosten gegenüber dem reinen S/W oder reinen L/W System betragen ca. 50 SFr./kW. Jedoch sind die Mehrkosten moderat, wenn damit Einschränkungen überwunden und damit ein Wärmepumpensystem überhaupt ermöglicht wird.
- Bei der mittleren Leistung (120 kW) liegen die Kosten für alle Systeme etwa gleichauf.
- Bei der grössten Leistung (240 kW) ist das reine S/W-System etwa 80 SFr./kW teurer als die Spitzenlast- oder reinen L/W-Systeme. Hier kommt der Feldeffekt deutlich zum Tragen, d.h. es müssen mehr Sondenmeter pro kW Heizleistung gebohrt werden, was sich in den Kapitalkosten niederschlägt.
- Durch die Einpreisung des Kühlnutzens im Neubau wird die Spitzenlastdeckung auch bei der kleinen Leistung schon konkurrenzfähig und überwiegt deutlich bei grösseren Systemen.
- Die Spitzenlastsonde ist konkurrenzfähig zu einer Spitzenlastdeckung mit Erdgas (15 Rp./kWh, 34 SFr./(kWh*a)). Trotz der geringen Energiemenge wird die Gasanlage durch die Energiekosten dominiert. Anmerkung: Die auch bei der Gasanlage notwendigen Kaskadierungskosten wurden den Kapitalkosten WP & Sonden zugeschlagen.

Fazit

- Erdwärmesonden zur Spitzenlastdeckung sind geeignet, um Einschränkungen für einzelne Wärmequellen zu überwinden
- Bei der Nutzung von Erdwärmesonden zur Spitzenlastdeckung können in Bezug zur Leistung überproportional Sondenmeter eingespart werden gegenüber einer Lösung mit Erdwärmesonden als einziger Quelle.
- Spitzenlastdeckung mit EWS ist konkurrenzfähig, auch gegenüber fossilen Lösungen

5.4.5 Ausblick Systemvarianten

Die Spitzenlastsonde kann auch mit anderen Grundlastquellen kombiniert werden, welche sich durch eine Leistungsbeschränkung auszeichnen.

- **Grundwasser:** In Gebieten mit beschränkter Grundwasserergiebigkeit, in denen die Nutzung von Erdwärmesonden erlaubt ist. Dies ist kantonal sehr unterschiedlich geregelt.
- **Fluss- und Seewasser:** Insbesondere bei grösseren Anlagen und zu geringem Leistungspotential aus Oberflächengewässer bietet sich die Spitzenlastsonde an. Im Weiteren besteht die Möglichkeit, das Oberflächengewässer als Regenerationsquelle für die Sonden zu nutzen. Mit zunehmend heißen sommerlichen Temperaturen kann so auch eine positive Wirkung für das Gewässer entstehen.
- **Abwärme:** Industrielle Prozessabwärme fällt oft mit konstanter Leistung über das Jahr an und bietet sich damit als Grundlastquelle (primär oder sekundärseitig, je nach Temperaturniveau) an. Im Weiteren können die Sonden im Sommer als Wärmesenke genutzt werden, womit Investitionen für Rückkühler eingespart werden können.
- **Gebäudekühlung:** In Dienstleistungsgebäuden fällt wegen der internen Lasten ab dem Frühjahr bis zum Herbst viel Wärme ab, welche oft nicht mal mehr vollständig in Erdwärmesonden eingebracht werden kann. So sind dann Rückkühler notwendig, welche im Winter auch als zusätzliche Wärmequelle genutzt werden können. So kann ein Erdwärmesondenfeld deutlich reduziert ausgelegt und auf die Spitzenlastdeckung dimensioniert werden.
- **Abluft:** Im Neubau besteht eine Konkurrenzsituation zur Komfortlüftung. Im unsanierten Altbau ist das Verhältnis von Abluftmenge zu Heizleistungsbedarf zu tief. Ein Potential besteht im sanierten Bestandsbau, wenn eine Abluftanlage zur Einhaltung des Luftwechsels nachgerüstet wird (siehe Abschnitte 5.4.6 und 5.8). Die Wärme aus der Abluft kann als Grundlastquelle für die Wärmepumpe genutzt werden.

- **Abwasser aus dem Kanal:** Die maximale Leistungsentnahme ist limitiert durch die Temperaturanforderungen der Abwasserreinigungsanlage. Das geringste Leistungspotential besteht daher gerade im Winter, womit die Spitzenlastsonde eine ideale Ergänzung darstellt.
- **Fernwärme:** Mit zusätzlicher dezentraler Spitzenlastdeckung über EWS können Leistungsspitzen für die Fernwärme reduziert werden und es entsteht ein gleichmässigeres Lastprofil zwischen Sommer und Winter. Durch den reduzierten Leistungsbedarf könnten weitere Gebäude angeschlossen werden.

5.4.6 Feldanlage "MFH Dettenbühl, Wettswil"

Ein reales Objekt, in dem das Konzept der Spitzenlastdeckung mit Erdwärmesonden umgesetzt wurde, ist die im 2016 energetisch sanierte Mehrfamilienhaussiedlung Dettenbühl.

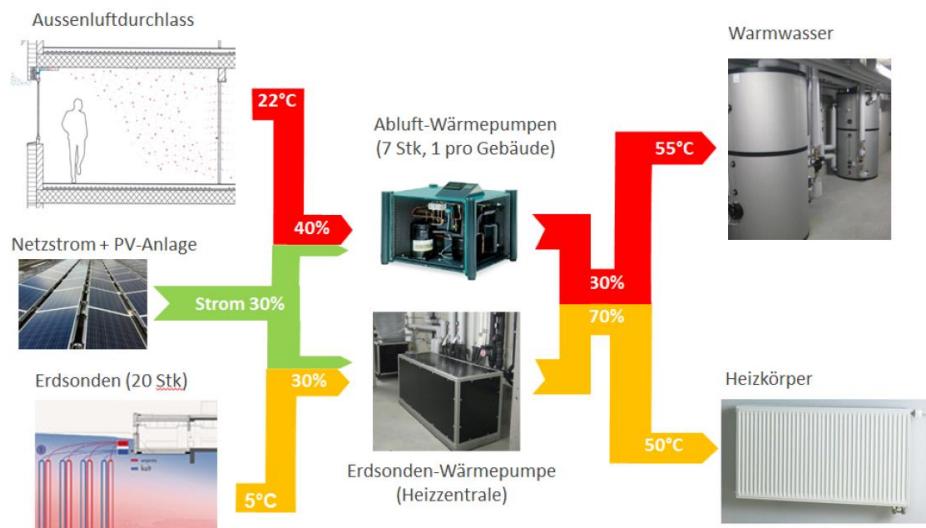


Abbildung 33: Energiesystem MFH Dettenbühl [12]

Die zentrale Ölheizung wurde ersetzt durch sieben dezentrale Abluftwärmepumpen für die Warmwasseraufbereitung und einen Anteil Heizwärme (Grundlastdeckung) sowie eine zentrale Solewärmepumpe für die Spitzenlastdeckung. Die Sanierung wurde durch ein P&D Forschungsprojekt [19] begleitet. Der Schwerpunkt des Forschungsprojekts liegt auf den Abluftwärmepumpen und dem Komfort, zum Erdwärmesondensystem sind nur wenige Daten vorhanden.

Der Leistungsbedarf beträgt total 470 kW, wobei die Sole-Wärmepumpe 68% der Leistung und 40% der Energie übernimmt. Diese Verteilung stimmt mit dem Energieanteil in Abbildung 24 überein. Es sind 20 Erdwärmesonden mit einer Länge von 250 m abgeteuft. Die Anordnung konnte nicht ausfindig gemacht werden, da die der Bauherrschaft vorliegenden Pläne fehlerhaft sind.

5.5 Strategie Spitzenlastdeckung mit Regeneration

Die Kombination der Strategien «Spitzenlastdeckung mit Luft» und «Regeneration» nutzt die Synergie, dass ein vorhandener Luftwärmetauscher auch das Erdreich wieder regenerieren kann, wodurch noch mehr Sondenmeter eingespart oder höhere Jahresarbeitszahlen erreicht werden können. Allerdings ist die Regeneration erst ab einer gewissen Sondenanzahl effektiv, so dass die Kombination nur bei grösseren Anlagen sinnvoll ist.



5.5.1 Ziele der Simulationsstudie

In den bisherigen Untersuchungen wurden in der Strategie «Spitzenlastdeckung» Systeme betrachtet, bei denen eine Luftwärmepumpe (Direktverdampfung im Luftwärmetauscher) und eine Solewärmepumpe kombiniert wurden. Damit mit der Luft das Erdreich wieder regeneriert werden kann, muss die Wärme aus der Luft auf die Sole übertragen werden, was mit Luft/Sole-Wärmetauschern, welche oft als Rückkühler in Kälteanlagen verwendet werden, möglich ist.

Folgende Fragen werden mit der Studie untersucht:

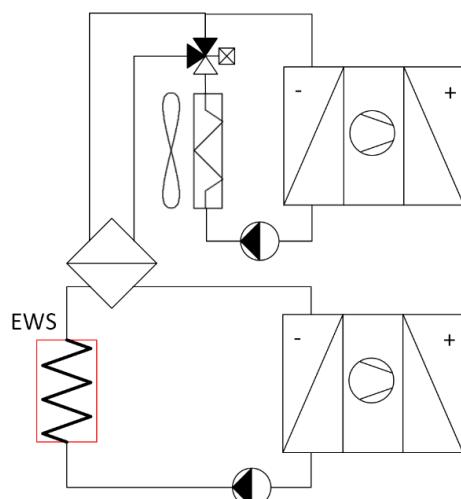
- Wie wird der Quellenkreis dimensioniert, hydraulisch integriert und geregelt?
- Nach welchen Indikatoren können die Erdwärmesonden überwacht werden?
- Welche Vorteile (z.B. Effizienz, Winterstrom, Wirtschaftlichkeit) können gegenüber Referenzsystemen erzielt werden?

5.5.2 Hydraulische Konzepte

Es wurden zwei hydraulische Konzepte untersucht. Diese unterscheiden sich dadurch, dass die beiden Quellen in kombinierten oder in getrennten hydraulischen Kreisen mit der Wärmepumpe verbunden sind. Die nachfolgenden Darstellungen Abbildung 34 und Abbildung 35 der beiden Konzepte sind stark vereinfacht, um die grundlegende Funktionsweise zu zeigen. Situativ können z.B. auch Bypässe für die Wärmepumpe im reinen Regenerationsbetrieb oder separate Pumpen für die beiden Quellen realisiert werden. Ebenfalls wurde in dieser Darstellung auf die Integration der Abtauung für den Luftwärmetauscher verzichtet.

Separate Wärmepumpen und hydraulische Kreise

Die beiden separaten hydraulischen Kreise werden über einen Plattenwärmetauscher gekoppelt. Im Regenerationsbetrieb wird dieser mittels 3-Wege-Umschaltventil eingekoppelt.



Vorteile:

Klare Trennung der beiden Systeme

- keine Gefahr, dass zu kalte EWS-Eintrittstemperaturen bei kalten Außenluft-Temperaturen
- Einfache Regelung

Glykol-Gehalt im EWS-Kreis kann niedriger sein als im Luft-Kreis → Kostenersparnis

Nachteile:

Temperaturverlust über den Plattenwärmetauscher

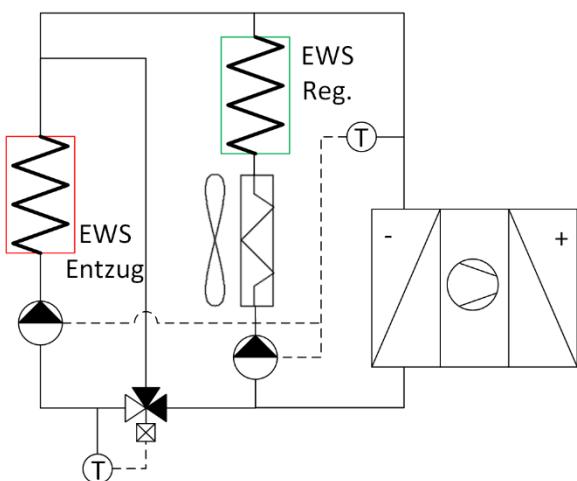
Leistungsanteile der beiden Systeme sind begrenzt durch die Wärmepumpenleistung

Ungleichmässige Laufzeiten

Abbildung 34: Separate Hydraulik für Spitzenlastsonde mit Regeneration

Luft und EWS in einem hydraulischen Kreis integriert

Die beiden Quellen werden im gleichen hydraulischen Kreis auf eine Wärmepumpe (mit mehreren Verdichtern) verbunden. Im Regenerationsbetrieb wird das EWS-Feld mittels Umschaltventilen (nicht eingezeichnet) nach dem Luftwärmetauscher eingekoppelt.



Vorteile:

Leistung einer Quelle ist nicht durch Wärmepumpenleistung begrenzt → mehr Flexibilität

Nur eine Wärmepumpe nötig

Kein Grädigkeitsverlust bei der Regeneration → höherer Regenerationsanteil erreichbar

Nachteile:

Die Sonde muss vor kalten Temperaturen aus dem Luftwärmetauscher geschützt werden.

Regelung, insbesondere der Massenströme, komplexer

Mehr Ventile notwendig (Kosten)

Abbildung 35: Integrierte Hydraulik für Spitzenlastdeckung mit Regeneration. Im Heizbetrieb ist das EWS-Feld in der roten Box eingebunden, im Regenerationsbetrieb in der grünen Box.

5.5.3 Modellierung

Bei der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Strategie der Spitzenlastdeckung ohne Regeneration wird die Grundlast Luft über eine Luftwärmepumpe (Direktverdampfung) bereitgestellt und vereinfacht modelliert, wobei der Bivalenzpunkt nur von der benötigten Heizleistung abhängt.

Die Erweiterung des Systems auf eine Luft/Sole-Wärmetauscher und Sole-Zwischenkreis führt zu einer gegenseitigen Abhängigkeit der Luftleistung und der Soleleistung. Die Leistung des Luftwärmetauschers ist abhängig von den primär- und sekundärseitigen Massenströmen und Temperaturen. Im Extremfall würde dies bedeuten, dass mit einem verhältnismäßig kleinen Luftwärmetauscher die gesamte benötigte Quellenleistung zur Verfügung gestellt werden kann, dabei die Austrittstemperatur aus dem Luftwärmetauscher jedoch weit unter die Lufttemperatur absinkt, um die benötigte Wärmeleistung zu übertragen. Im Extremfall sinkt die Temperatur unter die minimal zulässige Quellentemperatur der Wärmepumpe, was eine Niederdruckstörung bewirkt. Diese Begrenzung ist im Modell nicht implementiert, die niedrigsten erreichten Temperaturen können jedoch aus den Simulationsdaten ermittelt werden.

Die Abtauung des Luftwärmatauschers wurde im Modell vereinfacht implementiert: Wenn die Luftaustrittstemperatur unter 0 °C liegt, wird pauschal 10% des Leistungsertrags des Wärmatauschers wieder abgezogen.

Es wurden beide oben beschriebenen hydraulischen Konzepte modelliert. In der Variante mit integrierter Hydraulik hat sich dabei die Regelung unter Berücksichtigung der minimalen Sondeneintrittstemperatur als schwierig erwiesen. Zahlreiche Simulationen sind nicht durchgelaufen. Die weiteren Untersuchungen wurden deswegen mit dem Modell mit separaten Wärmepumpen für die beiden Kreise durchgeführt, welches sich in der Simulation stabiler regeln liess.

Regelstrategie

Die Systemregelung besteht aus mehreren Komponenten, welche je nach Situation zugeschaltet oder priorisiert werden.



- Leistungsverteilung auf die beiden Wärmepumpen bzw. Wärmequellen: Es wurden drei Strategien untersucht.
 - Strategie RS1:
 - 1. Priorität: R1
 - 2. Priorität: grösserer Luftanteil aus R3 und R5
 - Strategie RS2:
 - 1. Priorität: R1
 - 2. Priorität: grösserer Luftanteil aus R3 und R4
 - Strategie RS3:
 - 1. Priorität: R1
 - 2. Priorität: grösserer Luftanteil aus R4 und R5
- Dabei bezeichnen:
 - R1:** Genereller Zuschalt- und Ausschaltpunkt der Erdsonden in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur. Einschalten: $T_{amb} < 8^{\circ}\text{C}$, Ausschalten: $T_{amb} > 10^{\circ}\text{C}$
 - R3:** Die Lastverteilung wird auf einen definierten Leistungsentzug aus dem Luftwärmetauscher geregelt (120 kW). Bei Überschreiten dieses Leistungsentzugs wird die Sonde zugeschaltet.
 - R4:** Sondenschutz: Der Lastanteil der EWS-Wärmepumpe wird so geregelt, dass die Sonden-eintrittstemperatur mindestens $-1.5^{\circ}\text{C} - \frac{1}{2} \cdot \text{Spreizung}$ entspricht (SIA 384/6-Kriterium). Dieser Regler wird priorisiert gegenüber der Regelung auf die Differenz der Wärmepumpen-Eintrittstemperaturen, um die Sonde vor Unterkühlung zu schützen.
 - R5:** Leistungsverteilung zwischen Sonde und Luftwärmetauscher: Die Lastverteilung wird so geregelt, dass eine Temperaturdifferenz zwischen den Eintrittstemperaturen in die beiden Wärmepumpen besteht (positiv oder negativ).
 - a. $T_{in,WP\ Luft} > T_{in,WP\ EWS} \rightarrow$ Die Sonde wird übermäßig belastet
 - b. $T_{in,WP\ Luft} < T_{in,WP\ EWS} \rightarrow$ Die Arbeitszahl sinkt, da der Luftanteil auch bei sehr kalten Temperaturen hoch ist.
 - c. Als Kompromiss wurde die Temperaturdifferenz = 0 gesetzt, d.h. die Lastverteilung auf die beiden Quellen wird so geregelt, dass die gleiche Quellentemperatur resultiert.
- Regenerationsregler: Dieser funktioniert wie in Abschnitt 5.3.3 (Strategie Regeneration) beschrieben. Der Plattenwärmetauscher zwischen den beiden hydraulischen Kreisen wird vereinfacht mit einer Grädigkeit von 2 K simuliert, welche vom Austritt aus dem Luftwärmetauscher zur Berechnung der Sondeneintrittstemperatur abgezogen wird. Während des Regenerationsbetriebs kann auch geheizt werden.

Parametrierung

Folgende Parameter wurden für alle Simulationen konstant gehalten:

- Gebäudetyp: Bestandsbau
- Heizleistung: 240 kW
- Erdsondenlänge: 160 m
- Spezifische Leistung Luftwärmetauscher:
 - Reines Luftwärmepumpensystem: 62.4 kW/K (Faktor 1)
 - Spitzenlastbetrieb: 31.2 kW/K (Faktor 0.5)
 - Nur Regenerationsbetrieb: 15.6 kW/K (Faktor 0.25)

5.5.4 Resultate und Diskussion

Die Abbildung 36 zeigt die Temperaturentwicklung im unregenerierten und im regenerierten System mit Spitzenlastdeckung mit 16 Sonden (4x4 Anordnung, RS2 und RS3) im Vergleich zu einem monovalenten EWS-System und einem regenerierten EWS-System. Sowohl im monovalenten als auch im regenerierten System nimmt die Temperatur in der Sonde längerfristig ab. Im Spitzenlastbetrieb sind die Temperaturen deutlich von der Regelstrategie abhängig. Entsprechend wird die Sonde mit der Regelstrategie RS3 wesentlich mehr belastet als mit RS2, wie in Abbildung 37 erkennbar. Mit der Regelstrategie RS3 wird dank dem höheren Anteil aus der Sonde eine Jahresarbeitszahl von 3.9 erreicht.

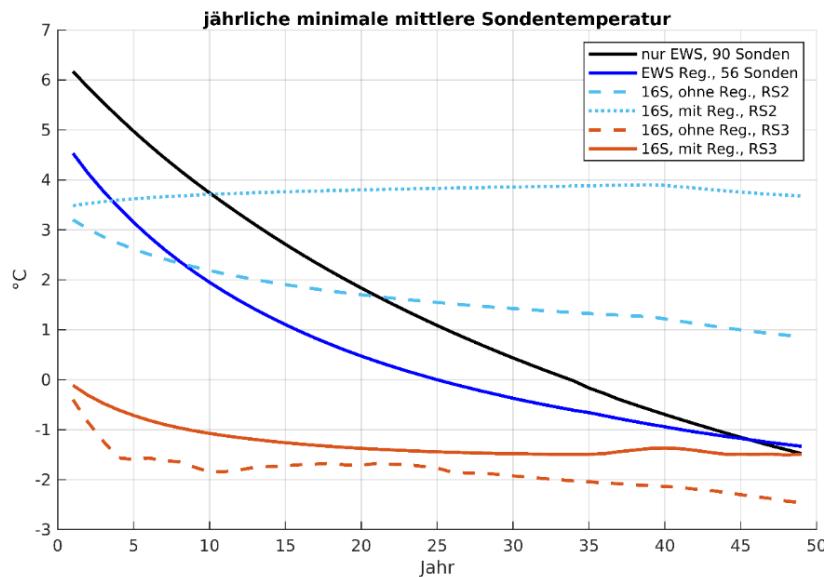


Abbildung 36: EWS-Temperaturentwicklung über 50 Jahre für ein System mit Spitzenlastdeckung im Vergleich zu einem monovalenten und einem regenerierten EWS-System

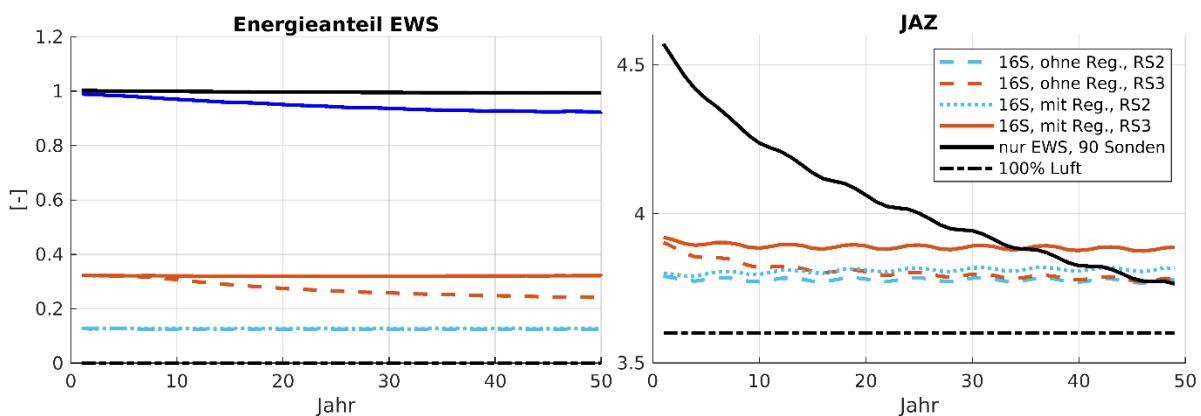


Abbildung 37: Anteil der Quellenenergie aus der EWS und Jahresarbeitszahl

Der Effizienzgewinn durch das System mit Spitzenlastdeckung gegenüber einem reinen Luftsyste scheint hier mit unter 10% eher gering. Der grösste Effizienzzuwachs ist jedoch in den kalten Wintermonaten zu verzeichnen (Abbildung 38). Der "Absacker" der Arbeitszahlen im Sommer ist auf die Dominanz der Warmwasseraufbereitung im Sommer mit den höheren Temperaturanforderungen zurückzuführen (Abbildung 39).

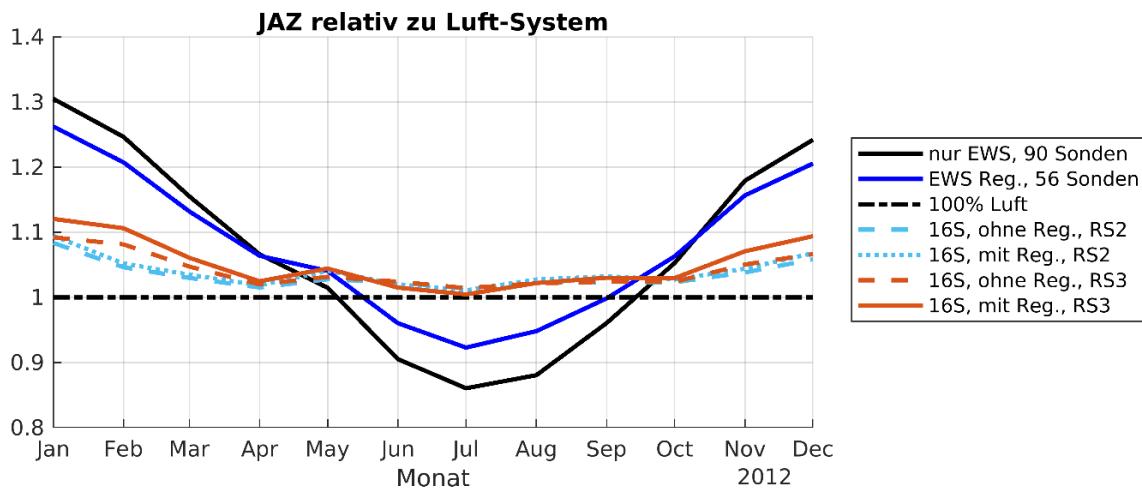


Abbildung 38: Monatliche Arbeitszahl relativ zum reinen Luft-System im 12. Betriebsjahr

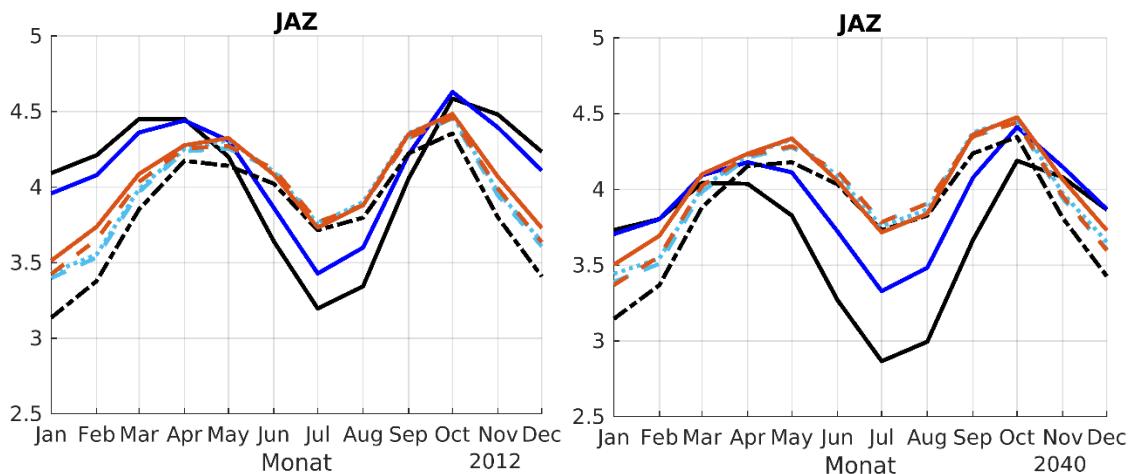


Abbildung 39: Monatliche Arbeitszahl im 12. und im 40. Betriebsjahr

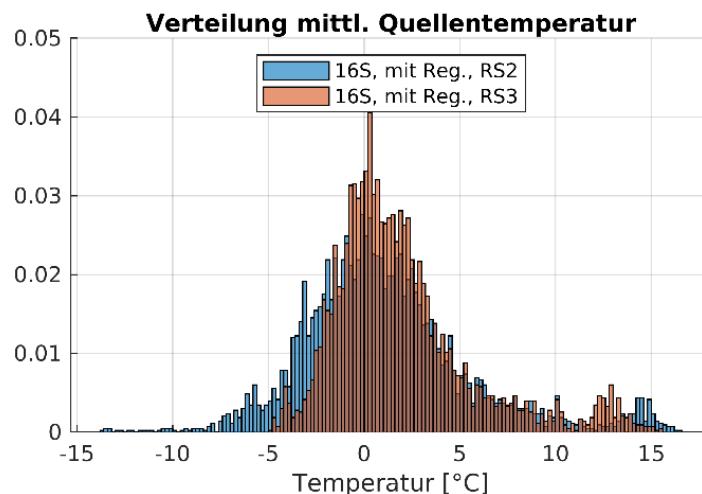


Abbildung 40: Unterschied der jährlichen minimalen mittleren Sondentemperatur zwischen den beiden Regelstrategien für die Spitzenlastsonde, mit und ohne Regeneration (links) und Histogramm der mittleren Quellentemperatur (Eintritt in den Verdampfer) für beide Wärmepumpen mit Gewichtung nach Leistung im Winter des 40. Betriebsjahrs.

Die Regelstrategie RS3 zeigt ihre Stärke bei einer Reduktion des Wärmebedarfs. So verschiebt sich der Bivalenzpunkt mit abnehmendem Jahreswärmebedarf zu wärmeren Temperaturen (Abbildung 41), so dass der Luftwärmetauscher bei negativen Temperaturen gar nicht mehr in Betrieb ist und die komplette Last vom Sondenfeld übernommen wird (siehe auch Abschnitt 5.6.3).

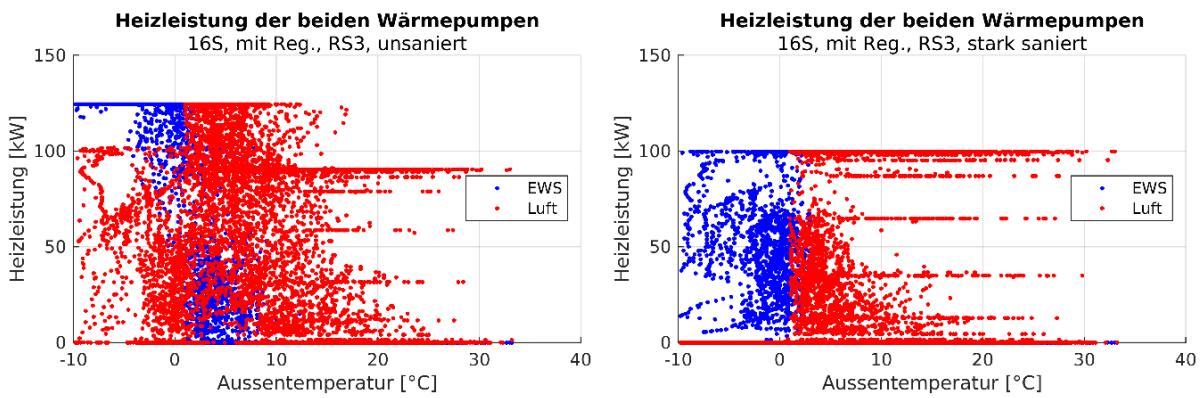


Abbildung 41: Heizleistung (Tagesmittelwert) der beiden Wärmepumpen im Jahre 40 für ein unsaniertes (links) und ein stark saniertes (rechts) Gebäude.

Erkenntnisse und Diskussion

Eine Regeneration kann auch in der Strategie Spitzenlastsonde einen Beitrag leisten, um die Sonden-temperatur zu stabilisieren. Wesentlichen Einfluss hat aber auch die Regelstrategie. Die Regelstrategie RS3 entzieht deutlich mehr Energie aus der Erdwärmesonde, was aber dann im Grenzfall zur Erschöpfung der Sonde führt.

Die beiden Strategien lassen sich somit umschreiben als

- **RS2:** Konservativ: Es wird nur gerade die Energiemenge aus der EWS entzogen, welche benötigt wird, um den Wärmeleistungsbedarf zu decken.
- **RS3:** Progressiv: Mit der Wärme aus der EWS wird die Quellentemperatur optimiert, was zu einem höheren Entzug aus dem Boden führt.

Die Unterschiede in der Arbeitszahl sind für die beiden Strategien trotzdem nicht so gross. Das liegt wohl in der doch noch deutlichen Dominanz der Luft als Quelle beim Energieanteil.

Eine Überwachung der Sondeneintrittstemperatur ist notwendig, um einer Unterkühlung vorzubeugen. Mit einer geregelten Rücklaufbeimischung kann die Sondentemperatur auch bei kalten Austrittstemperaturen aus der Wärmepumpe die Sondeneintrittstemperatur stabilisiert werden.

Mit der konservativen Regelstrategie RS2 ist diese Funktion gewährleistet, führt jedoch im Extremfall dazu, dass mehr Wärme aus der Luft entzogen wird und damit die Quellentemperatur für die Wärmepumpe unter das zulässige Niveau sinkt. Eine Variante, dem entgegenzuwirken, ist die Ventilatoren etwas grösser auszulegen und diese als "Boost-Modus" erst bei Extremtemperaturen auf voller Leistung zu betreiben. Durch die erhöhte Luftmenge sinkt die Grädigkeit bei der Wärmeübertragung von der Luft auf die Sole, was zu einer höheren Austrittstemperatur der Sole aus dem Luftwärmetauscher führt.

Für die Optimierung der Regelung ist denkbar, die aus der Sonde entzogene Energie mit zu berücksichtigen, das heisst gegen Ende eines milden Winters wird die Sonde tendenziell stärker belastet und damit die Arbeitszahl gesteigert.



5.5.5 Fallstudie Sanierungsprojekt "im Kehl", Baden

Im Verlauf des Projekts "HP source" wurden bereits mehrere reale Fälle mit den untersuchten Einschränkungen gefunden. Ein Objekt wird im Rahmen eines vom BFE subventionierten P&D-Projekts mit Amstein+Walthert, Zürich, sowie dem Wärmepumpenhersteller Bion Bauhaus und dem Bauherrn, der Wohnbaugenossenschaft Lägern Wohnen genauer untersucht. Das Projekt beinhaltet einen Wärmeerzeugersatz eines alten Ölbeckens, der zwei bestehende Mehrfamilienhäuser aus dem Jahr 1972 mit je 28 Wohnungen und einer beheizten Fläche von insgesamt 4180 m² versorgt. Die Gebäude wurden nur in den 1990er Jahren leicht saniert und befinden sich größtenteils in ihrem ursprünglichen Zustand. Die Gesamtheizleistung von 200 kW wird über den gemeinsamen Ölbeckens und eine Verteilungsleitung zwischen den beiden Gebäuden bereitgestellt. Der durchschnittliche jährliche Wärmeverbrauch über die letzten 14 Jahre wurde zu 600 MWh/a ermittelt.

Das ursprüngliche Konzept sah vor, den Kessel durch eine Wärmepumpen-Anlage mit Erdsondenquelle zu ersetzen, die sowohl die Energiebilanz erheblich verbessert als auch die CO₂-Emissionen deutlich reduziert. Aufgrund der steilen Umgebung ist der Platz für die Bohrungen jedoch auf den Parkplatz zwischen den beiden Gebäuden beschränkt. Das Konzept wurde mit Erdsonden in einer Tiefe von 295 m und einem zusätzlichen Luftwärmemtauscher zur Regeneration der Erdsonden detailliert. Als Regenerationsquelle wurde ein Luftwärmemtauscher gewählt, da die Sanierung der Dächer der beiden Gebäude in den nächsten Jahren geplant ist, so dass die Dachfläche für eine solare Regeneration nicht zur Verfügung stand. Abbildung 42 zeigt links eine Luftaufnahme, auf der gut die begrenzte Parkplatzfläche sichtbar wird, und die beiden bestehenden Mehrfamilienhäuser.



Abbildung 42: Luftaufnahme und Gebäudeansichten der Mehrfamilienhäuser im P&D Projekt

Bei den ersten Bohrungen wurde jedoch ein Arteser in 130 m Tiefe getroffen, so dass der Kanton eine zusätzliche Begrenzung der Bohrtiefe auf maximal 120 m festgelegt hat. Mit dieser neuen Begrenzung reicht das Konzept mit reiner Erdsondenquelle auch mit Regeneration auf dem beschränkten Platz nicht mehr aus, um die gesamte Quellenleistung für einen Wärmepumpenbetrieb bereitzustellen. Als Ausweg wird nun ein Zweiquellsystem aus Erdreich und einem erweiterten Luftwärmemtauscher verfolgt.

Da diese Randbedingungen genau den untersuchten Einschränkungen entsprechen, sind die Gebäude ein ideales Beispiel, um weitere Erfahrungen mit einer Zweiquellen-Kombination aus Erdwärmesonden und Außenluft-Wärmequelle zu sammeln. Das Demonstrationsprojekt ist im Januar 2023 gestartet und liefert bei vorgesehener Inbetriebnahme ab Winter 2023 Monitoringdaten des Systems, die u.a. dazu dienen, die Simulationsergebnisse des Spitzenlastbetriebs zu verifizieren, die reale Leistung und die Kosten des Zweiquellsystems zu bewerten und Planungs- und Auslegungsempfehlungen anhand eines real überwachten Gebäudes abzuleiten. Da aufgrund der begrenzten Bohrtiefe ein größere Anzahl Erdsonden zum Einsatz kommen, ist dies auch ein ideales Objekt, um die Kombinationen der beiden Strategien "Spitzenlastdeckung" und "Regeneration" zu untersuchen. Da durch die Spitzenlastdeckung normalerweise die Sondenanzahl stark reduziert wird, lohnt sich eine Regeneration weniger als bei kompakten Feldern, wie auch in Abbildung 5 gezeigt ist. Hier sind jedoch 14 Sonden geplant, so dass trotz dem Spitzenlastkonzept Potenzial für eine Regeneration besteht. Daher wurden auch Simulationsuntersuchungen zur Kombination der Strategien durchgeführt. Für eine genauere Ermittlung

der benötigten Heizleistung wurden im Januar 2023 während einer Woche Messungen am zentralen Heizkreisverteiler mittels Ultraschall-Wärmezähler durchgeführt. Die Abbildung 43 zeigt die Messwerte, um mittels Energiesignaturmethode [53] die Leistung zu ermitteln. Damit ergibt sich ein Heizleistungsbedarf von 120 kW bei -8 °C mittlerer Außentemperatur für die Raumwärme. Die Gesamtleistung wurde für die Simulationen auf 175 kW festgelegt.

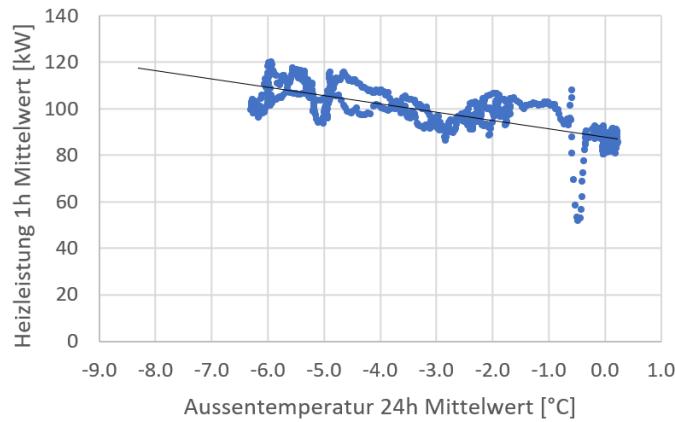


Abbildung 43: Ermittlung der Heizleistung mit der Signaturmethode

Abbildung 44 zeigt die mit dem Modell 3 durchgeföhrten Simulationen für das Objekt "im Kehl". Mit der progressiven Regelstrategie RS3 wird die minimal zulässige Sondentemperatur unterschritten. Die Regeneration mit dem sowieso vorhandenen Luftwärmekreislauf erhöht die minimale mittlere Sondentemperatur langfristig um ca. 4 K. Mit der konservativen Regelstrategie RS2 und Regeneration wird die minimale mittlere Sondentemperatur im zulässigen Bereich gehalten.

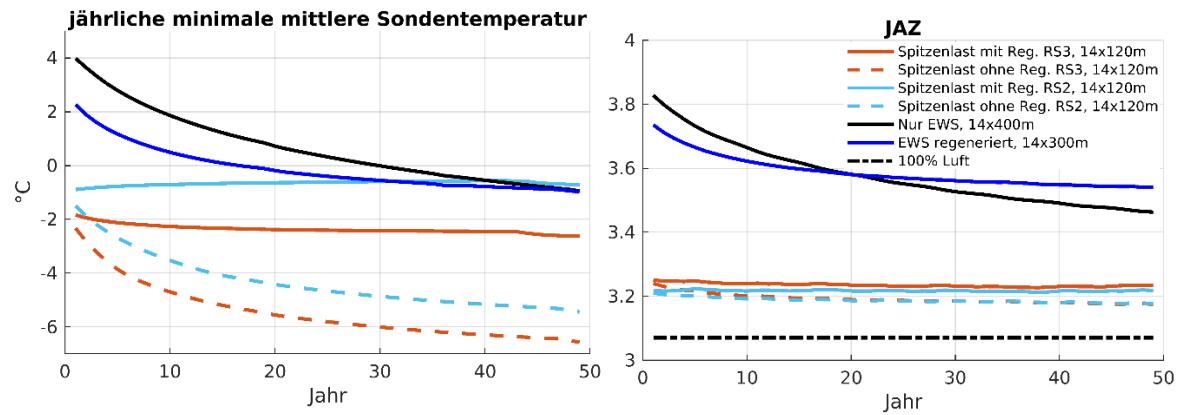


Abbildung 44: Sondentemperaturen und JAZ für das Projekt "im Kehl"

Die JAZ liegt ca. 5% höher als im Referenzsystem mit Luft als einziger Quelle. Dies scheint gegenwärtig kein grosses Potential darzustellen. Mit einer späteren Sanierung ist jedoch durchaus ein Potential vorhanden, den Anteil der Erdwärmesonden deutlich zu steigern (siehe Kapitel 5.6.3).

5.6 Verringerung Wärmebedarf im Lebenszyklus des Gebäudes

Für die Strategien "Regeneration" und "Spitzenlastdeckung" wurde untersucht, wie sich die Erdreichtemperaturen und JAZ bei einer Verringerung des Wärmebedarfs aufgrund wärmerer Temperaturen (Klimawandel) oder bei einer Gebäudehüllensanierung verhalten.



5.6.1 Ziele der Simulationsstudie

Die Auslegung eines Erdwärmesondenfeldes erfolgt in der gängigen Praxis nach dem aktuellen Leistungs- und Wärmebedarf nach der Prämissen, dass die minimal zulässige Temperatur unter den gleichen Bedingungen nach 50 Jahren nicht unterschritten wird. In diesem Zeithorizont kann es jedoch durchaus signifikante Reduktion im Wärmebedarf geben, welche, bei angemessener Berücksichtigung, zu einer Reduktion der benötigten Anzahl Erdwärmesonden führen kann.

- Gebäudehüllensanierung
- Klimawandel
- Umnutzung

In dieser Simulationsstudie wurde untersucht, wie sich der Einfluss von Gebäudehüllensanierungen und des Klimawandels auf Sondentemperatur auswirkt. Dies wurde für die Systeme

- Reines EWS-System
- Regeneriertes EWS-System mit Luftwärmetauscher
- System mit Spitzenlastdeckung und Regeneration

untersucht. Der Fokus liegt dabei auf Bestandsgebäuden.

5.6.2 Modellierung

Es wurde das Modell, welches für die Spitzenlastsonde mit Regeneration (Luftwärmetauscher) verwendet wurde, genutzt. Ab Start bis zum Jahre 15 wurde das "normale" Lastprofil verwendet, also ohne Klimawandel und unsaniert. Im Jahre 15 erfolgte ein Umschalten auf das Lastprofil mit verringertem Bedarf (saniertes Gebäude oder Klimaerwärmung).

5.6.3 Resultate und Diskussion

Einfluss der Gebäudehüllensanierung

Die Abbildung 45 zeigt den Verlauf der EWS-Temperaturen über 50 Jahre für ein monovalentes EWS-Wärmepumpensystem. Ohne Berücksichtigung von Sanierung sind 90 Sonden notwendig. Mit 72 Sonden wird die minimale Temperatur im Jahre 30 unterschritten. Wird das Gebäude saniert, verringert sich der Wärmebedarf soweit, dass die 72 Sonden ausreichen. Der Jahresstrombedarf sinkt je nach Sanierungsgrad um ein Drittel bzw. zwei Drittel. Die Sondentemperatur nach 50 Jahren ist mit einer schwachen Sanierung ca. 2 K, mit einer tiefen Sanierung ca. 4 K höher als ohne Sanierung.

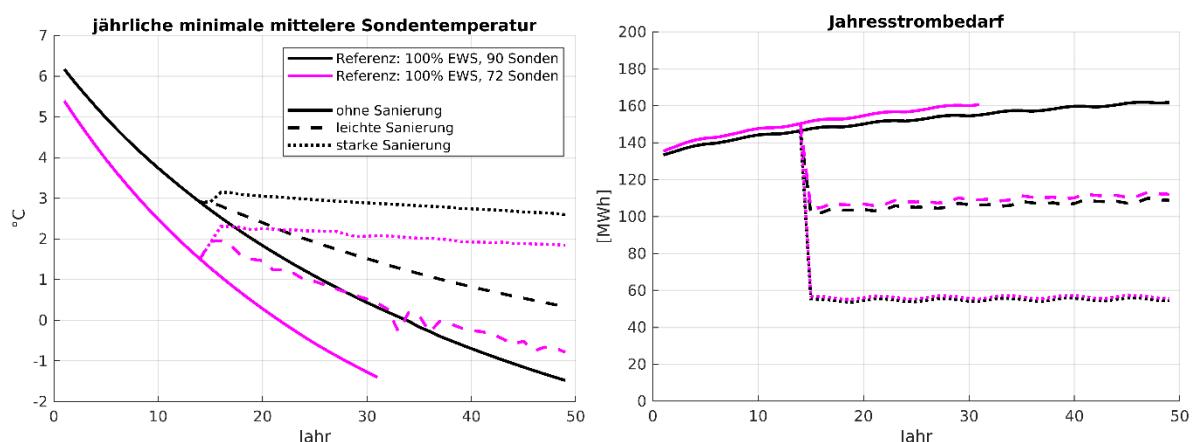


Abbildung 45: Monovalentes EWS-System mit Gebäudehüllensanierung im Jahr 15

Mit Regeneration kann die Sondenanzahl ohne Berücksichtigung einer Gebäudehüllensanierung bereits auf 56 reduziert werden. Mit Berücksichtigung einer leichten Sanierung sogar auf 42. Mit starker Sanierung steigt die Sondentemperatur langfristig, d.h. es wird mehr regeneriert als dem Erdreich entzogen wird.

Zu Beginn liegt die JAZ für beide Systeme bei ca. 4.4 bis 4.5 und verringert sich für das System mit 56 Sonden ohne Sanierung auf 3.9 im Jahre 50. Mit Sanierung pendelt sich die JAZ bei 4.1 bis 4.2 für alle Varianten ein. Zu beachten ist, dass die JAZ bei 56 Sonden mit starker Sanierung niedriger ist als mit schwacher Sanierung. Dies kommt daher, dass der Warmwasserverbrauch bei sinkendem Heizwärmebedarf gleichbleibt und schlussendlich die JAZ dominiert. Mit 42 Erdsonden ist das Sondenfeld zu klein für einen langfristigen Betrieb ohne Gebäudehüllensanierung. Die Sondentemperatur nach 50 Jahren ist mit einer schwachen Sanierung ca. 2.5 K, mit einer starken Sanierung ca. 6 K höher als ohne Sanierung. Die Effizienz ist beim regenerierten System mit 56 Sonden leicht besser als beim unregerierten System mit 90 Sonden. Abbildung 47 zeigt das Verhalten der regenerierten Spitzenlastdeckung mit beiden Regelstrategien. Mit der progressive Strategie RS3 kommt die Sonde an die Temperaturgrenze. Nach einer starken Sanierung kann jedoch von einem deutlich höheren EWS-Anteil profitiert werden, was zu geringerem Strombedarf führt.

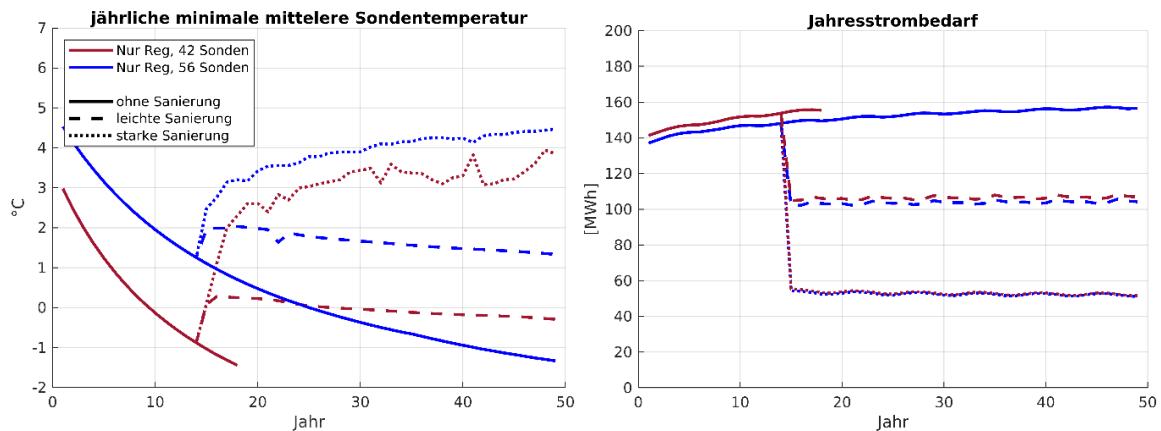


Abbildung 46: Regeneriertes EWS-System mit Gebäudehüllensanierung im Jahr 15. Ohne Sanierung wird bei 42 Sonden die minimal zulässige Temperatur unterschritten.

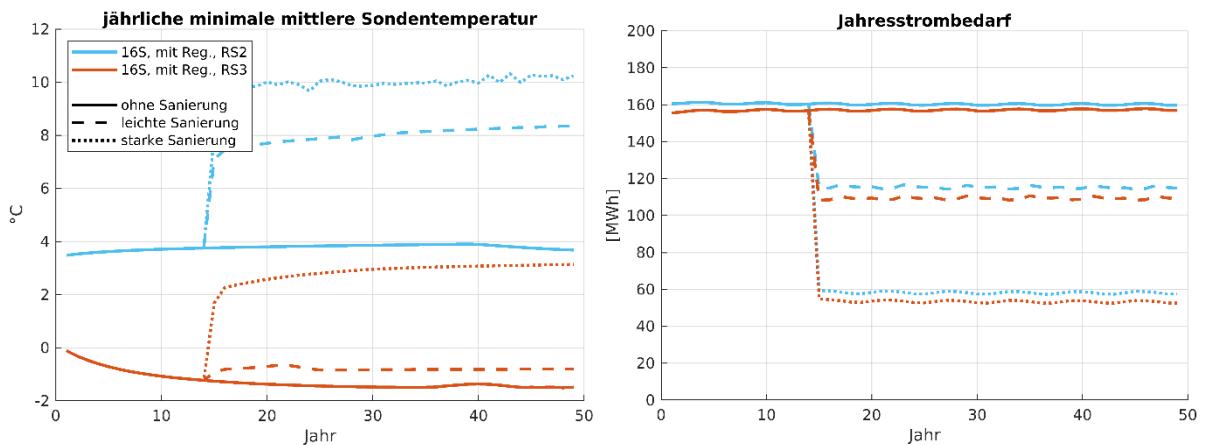


Abbildung 47: System der Spitzenlastdeckung mit Regeneration mit Gebäudehüllensanierung im Jahr 15

Einfluss der Klimaerwärmung

Im monovalenten EWS-System werden nach 50 Jahren ca. 0.7 K höhere Sondentemperaturen erreicht unter dem Einfluss der Klimaerwärmung, wie in Abbildung 48 gezeigt.

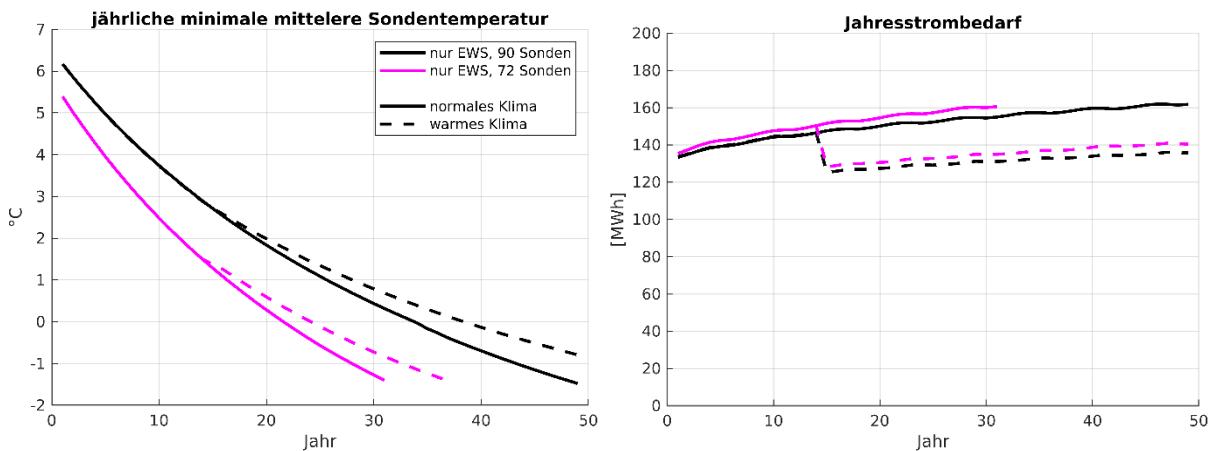


Abbildung 48: Einfluss der Klimaerwärmung auf ein monovalentes EWS-System

Mit Regeneration ist schon ein grösserer Einfluss erkennbar, siehe Abbildung 49. Statt 56 Sonden ohne Berücksichtigung der Klimaerwärmung sind nur noch 42 Sonden notwendig, was einer Einsparung von 25% entspricht.

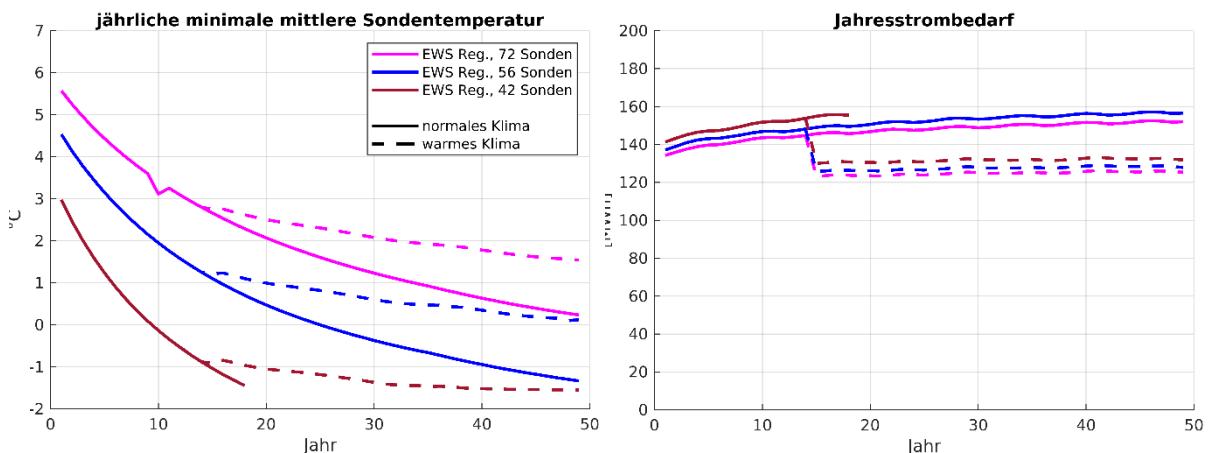


Abbildung 49: Einfluss der Klimaerwärmung auf ein regeneriertes EWS-System

Diskussion

Der Einfluss der Klimaerwärmung auf die Quellenauslegung ist wesentlich kleiner als der Einfluss einer leichten Sanierung. So ergeben sich schon im monovalenten EWS-System durch die Berücksichtigung von Sanierungszyklen Dimensionierungsvorteile. In Mehrquellsystemen steigt das Einsparpotential bei der Anzahl benötigter Erdsonden massiv an. Die Abbildung 50 zeigt die Jahreskosten für das untersuchte System mit 240 kW Heizleistung und 160 m tiefen Sonden. Die Variante "nur EWS" würde in einer realen Variantenstudie vermutlich verworfen werden, da die Kosten sehr hoch sind und nur schon der Platz zum Bohren der 90 Sonden problematisch ist. Von der Variante "EWS regeneriert" zur Variante "Spitzenlast" können die Investitionskosten praktisch halbiert werden. Dieses Kapital kann stattdessen für eine Gebäudehüllensanierung genutzt werden.

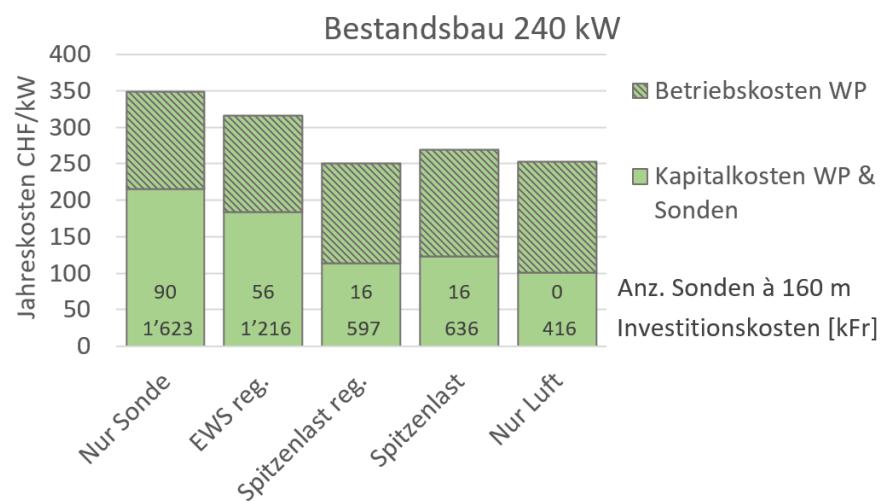


Abbildung 50: Jahreskosten für das System mit 240 kW und 160 m Sondenlänge



5.7 Strategie Vorwärmung

Bei gegebener Verdichterdrehzahl erhöht sich die Heizleistung mit zunehmender Quellentemperatur. Es wurde daher untersucht, ob sich durch Vorwärmung der Luft für eine L/W-Wärmepumpe Vorteile ergeben:

- Kann die Wärmepumpe kleiner ausgelegt werden? (Schallemissionen, Kosten)
- Welche Verbesserung ergibt sich für die JAZ?

Als Vorwärmquelle wurde Abluft (Luftvolumenstrom Mehrfamilienhaus von $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2_{\text{EBF}}$ bzw. $30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Pers.}$ nach SIA 2024:2015) simuliert. Der benötigte Luftbedarf ist im Datenblatt der für die Simulation verwendeten Wärmepumpe von Hoval [43] nicht angegeben. Es wurde daher eine Abschätzung auf Basis von Normdaten (A-7/W35) anderer Wärmepumpenhersteller vorgenommen (Abbildung 51) und daraus ein Volumenstrom von $500 \text{ m}^3/\text{h}/\text{kW}_{\text{Heizleistung}}$ abgeleitet. Der Feuchtegehalt wurde nicht berücksichtigt. Damit ergibt sich eine Spreizung von ca. 3.5 K am Verdampfer.

Im Bestandsbau konnte eine Temperaturerhöhung von 1-2 K an den kältesten Tagen erreicht werden, was zu einer Leistungserhöhung von ca. 10% führt. Der Einfluss auf die JAZ ist mit einer Erhöhung um 3% vernachlässigbar. Es ist jedoch zu beachten, dass wegen der feuchteren Abluft vermehrt Abtauzyklen notwendig sind. Das Potential wird daher gering eingeschätzt.

Im Neubau gibt es aufgrund der grösseren Wohnfläche pro kW Heizleistung eine um Faktor 3.5 höhere Abluftmenge als im Altbau. Daraus resultiert an kalten Tagen eine Temperaturerhöhung von 3.5 K (Heizbetrieb) und bis zu 14 K (WW-Aufbereitung, Leistung in der Simulation niedriger eingestellt als bei Heizbetrieb) und damit eine Leistungserhöhung von 17% in der Heizperiode. Die JAZ verbessert sich um 10%. Jedoch besteht auch hier das Problem der zusätzlichen Abtauzyklen aufgrund der feuchteren Luft. Zusätzlich besteht im Neubau eine Konkurrenzsituation zur Komfortlüftung mit passiver Wärmerückgewinnung über Wärmetauscher. Damit decken sich die Erkenntnisse mit den Aussagen in [27].

Grund für das geringe Potential ist das grosse Verhältnis der Volumenströme. Für das Mehrfamilienhaus mit 60 kW Heizleistung benötigt die Luftwärmepumpe einen Luftvolumenstrom von ca. $25'000 \text{ m}^3/\text{h}$, hingegen stehen nur gut $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ Abluft beim Altbau zur Verfügung.

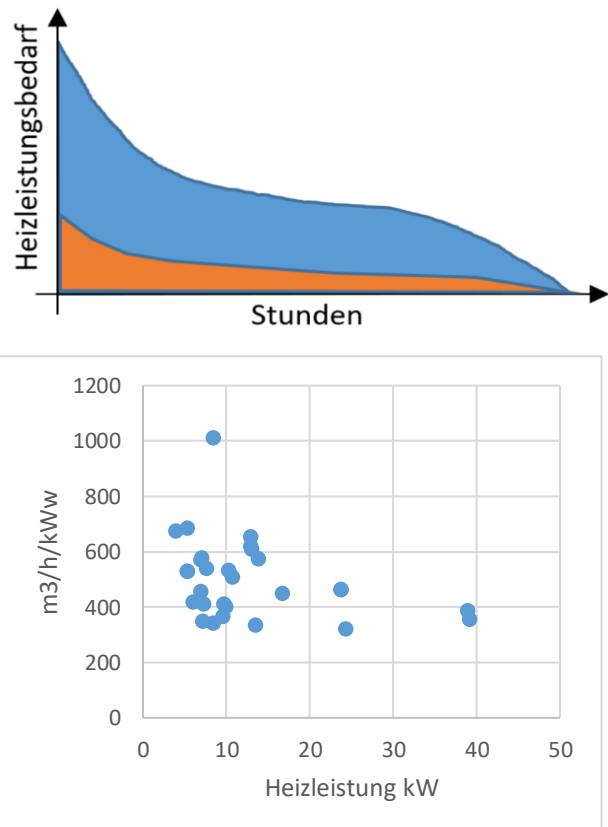


Abbildung 51: Spezifischer Luftbedarf pro kW Heizleistung für Wärmepumpen von Lambda, Dimplex und Alpha Innotec beim Betriebspunkt A-7/W35

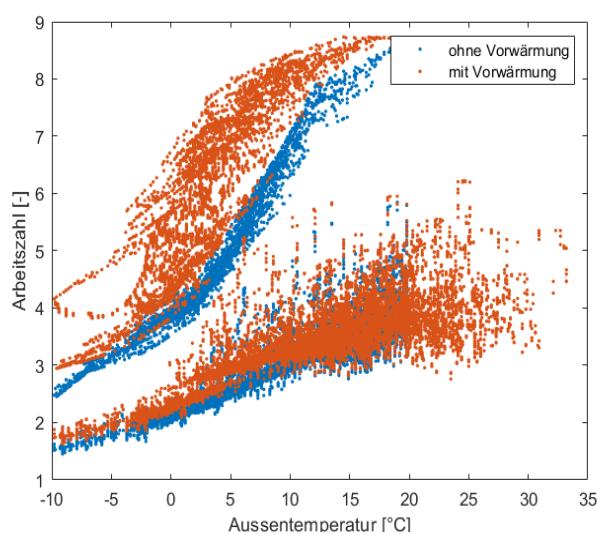


Abbildung 52: Arbeitszahl im Neubau mit Vorwärmung

Damit ergibt sich eine Spreizung über den Verdampfer von 3.5 K. Da sich die für die Effizienz massgebende Verdampfungstemperatur unterhalb der Luftaustrittstemperatur einstellt ist eine geringe Spreizung förderlich für einen guten COP, benötigt aber mehr Ventilatorleistung, was zu mehr Lärm und Stromverbrauch für den Ventilator führt.

In einem teilsanierten Gebäude mit reiner Abluftanlage und einem Heizleistungsbedarf zwischen den beiden untersuchten Fällen wird jedoch ein Anwendungspotential vermutet. Wegen der höheren Abluftmenge pro kW Heizlast ist die Wirkung der Temperaturerhöhung grösser als im unsanierten Altbau, es besteht aber keine Konkurrenzsituation zur Komfortlüftung mit passiver Wärmerückgewinnung.

Durch Reduktion des Gesamtvolumenstroms im Verdampfer kann die Lärmelastung vermindert werden. Damit sinkt aber die Effizienz. Mit der Beimischung von Abluft, welche eine höhere Temperatur aufweist, kann der Effizienzverlust kompensiert werden. Alternativ können zwei Wärmepumpen, je eine für Abluft und eine für Aussenluft, verwendet werden, wodurch die einzelnen Geräte besser auf die jeweiligen Bedingungen abgestimmt werden können und eine grössere örtliche Unabhängigkeit besteht.

Die Tabelle 5 zeigt eine Kombination von Abluft mit Aussenluft für ein Bestandsgebäude mit 60 kW Heizleistung und 2000 m² Energiebezugsfläche. Es wird eine Abluftmenge von 1 m³/m² EBF angenommen. In der Variante A (Referenz) wird eine Aussenluftmenge von 20'500 m³/h benötigt. Durch eine Substitution eines Teils der Aussenluft durch Abluft kann der COP von 2.28 auf 2.44 erhöht werden. Alternativ kann die Aussenluftmenge um 80% reduziert werden, womit der Effizienzvorteil zwar verloren geht, dafür aber durch die massiv reduzierte Aussenluftmenge Vorteile bei der Akustik oder der Integration der Luftwärmepumpe (z.B. Innenaufgestellt) entstehen.

Die technische Machbarkeit dieses Konzepts muss erst noch geprüft werden. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die für die Abtauung des Verdampfers benötigte Energie (Feuchtigkeit in der Abluft) und die grosse Temperatspreizung über den Verdampfer zu legen.

Tabelle 5: Abluftnutzung zur Reduktion des Aussenluftbedarfs

	Situation bei -10 °C, 60 kW Heizleistung				
	Aussenluft	Abluft	Total	Spreizung Verdampfer	COP
	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	K	-
A: nur Aussenluft	20500	0	20500	4.5	2.28
B: gemischt	18500	2000	20500	4.7	2.44
C: gemischt kleine Luftmenge	4300	2000	6300	14.7	2.28

Weitere Anwendungsmöglichkeiten erscheinen unter den folgenden Bedingungen günstig:

- Solare Vorwärmung in kalten und klaren Gebieten. Eine solare Vorwärmung mittels hinterlüfteter PV/T-Anlage wurde in [54] in einem Heizungsersatz in einem Stadthaus in Zürich umgesetzt und wissenschaftlich begleitet. Die Effizienzsteigerung war nur minim. Ein Potential wird jedoch in Gebieten mit hoher solarer Einstrahlung im Winter (z.B. Engadin) vermutet, sofern auch genügend Speicherkapazität zur Verfügung steht, so dass die Wärmepumpe hauptsächlich tagsüber betrieben werden kann.
- Hochtemperaturquelle wie Abwasser zur Luftvorwärmung [55]

Ein weiteres Potenzial für Effizienzsteigerungen könnte in der Abtauung einer Aussenluftwärmepumpe durch eine zweite Quelle liegen. Dies bedingt jedoch günstige örtliche Gegebenheiten der Quellen. Aussagen zur Abtauverlusten liegen im Bereich von 10%, die durch die alternative Abtauung erschlossen werden könnten.



5.8 Strategie Grundlast

Zwischen den Strategien Grundlast und Spitzenlast besteht ein fliessender Übergang. Während in der Strategie Spitzenlast der Fokus auf Quellen zur Spitzenlastdeckung liegen, wird in diesem Abschnitt der Fokus auf Quellen zur Grundlastdeckung gelegt.

Die Grundlastquelle wird dadurch charakterisiert, dass sie über das ganze Jahr eine gleichmässige Bandlast liefert, wobei eine Variabilität im Tagesverlauf durchaus zulässig ist, da dies gut mit Speichern (primär- oder sekundärseitig) aufgefangen werden kann. Die Ergiebigkeit der Grundlastquelle reicht aber nicht aus, um den gesamten Heizwärmebedarf zu jeder Zeit zu decken.

Typische Grundlastquellen sind demzufolge eine Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser oder der Abluft, die durch die Volumenstrombegrenzung des Frischwasserbedarfs bzw. den hygienisch notwendigen Luftwechsels nur einen Teil des gesamten Wärmebedarfs abdecken können, aber konstant im Jahresgang zur Verfügung stehen.

5.8.1 Auslegungsbeispiel

Basierend auf den Berechnungsgrundlagen von FEKA [56] ergibt sich für das in den Simulationen verwendete Bestandsgebäude ein Energieanteil der Grundlast von 24% und für das Neubaugebäude ein Energieanteil von 80%.

Wie in Abschnitt 3.6 zu Abwasser beschrieben reicht das Wärmepotenzial des Abwassers für die Erwärmung des Trinkwarmwassers. Da im Neubau der Wärmebedarf für die Trinkwarmwassererwärmung den Heizwärmebedarf übersteigt, siehe Abbildung 7, kann mit der Wärmerückgewinnung die sekundäre Quelle energetisch um gegen 80% entlastet werden. Leistungsmässig ist diese Entlastung mit ca. 25% jedoch nur gering, da die Gesamtleistung an den kältesten Tagen durch die Heizung dominiert wird. Damit besteht ein Potential zur Kombination von Grundlast aus der Abwasser-Wärmerückgewinnung mit energiebegrenzten Quellen wie Erdwärmesonden, welche damit substanzell reduziert werden können, wodurch auch wieder die Wärmerückgewinnung refinanziert werden kann. Im unsanierten Bestandsbau liegt die energetische Entlastung bei ca. 25% und die leistungsmässige Entlastung bei 7%, was nur noch ein geringes Potential für die Reduktion der Erdwärmesonden aufweist. Im sanierten Bestand vergrössert sich jedoch dieses Potenzial.

Bei Luft als zweiter Quelle ist das Einsparpotenzial gering, da diese durch die Leistung definiert wird.

5.9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 6 zeigt eine Zusammenfassung der untersuchten Strategien hinsichtlich der Zielerreichung.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse hinsichtlich der Zielerreichung

	Ziel 1 Ermöglichung	Ziel 2 Investitionskosten	Ziel 3 Effizienz
Strategie 1 Regeneration	Regeneration ermöglicht Platz- und Bohrtiefenreduktion	Refinanzierung der Zusatzquelle durch Verminderung der gesamten benötigten Sondenlänge	Bei kostenoptimaler Auslegung des Feldes besteht ein Effizienzpotential durch die Zusatzquelle
Strategie 2 Spitzenlast	Durch Aufteilung der Gesamtleistung Überwindung von Einschränkungen bei allen Quellen	Massives Einsparpotential durch überproportionale Reduktion des Erdsondenfeldes	Effizienzsteigerung gegenüber reinem Luftsyste m, Effizienzminderung gegenüber reinem EWS-System
Strategie 3 Vorwärmung	Situativ, Potential eher im Bestand	Vorhandenes Abluftsystem vorausgesetzt	Stark abhängig von Randbedingungen und Auslegung
Strategie 4 Grundlast	Konstanter Leistungsanteil über Grundlast ermöglicht Überwindung von Einschränkungen	Je nach Kostensituation der Quellen ist Refinanzierung nicht zwangsläufig gegeben.	Grundlastquellen: meist gutes Temperaturniveau



6 Empfehlungen

Aus den Simulationen können die folgenden Empfehlungen für Mehrquellsysteme abgeleitet werden. Auch wenn die Simulationsergebnisse auf den beiden in der Schweiz am häufigsten eingesetzten Quellen Aussenluft und Erdsonden beruhen, können die Empfehlungen mit Einschränkungen auch auf andere Quellen mit ähnlichen Eigenschaften übertragen werden. Die Luft steht dabei stellvertretend für eine (durch die Randbedingungen wie Lärmschutz) leistungsbeschränkte Quelle und das Erdreich für eine regenerierbare Quelle. Als Randbedingungen für die Simulationen wurde das Auslegungskriterium für Erdsonden nach SIA 384/6:2021 einer minimalen Sondenfluidmitteltemperatur von -1.5°C nach 50 Jahren zugrunde gelegt.

6.1 Quellenintegration

- Die durchgeföhrten Simulationen bestätigen, dass mit Mehrquellsystemen die Einschränkungen der Einzelwärmequellen entschärf't oder ganz umgangen werden können. Daher sollten bei Einschränkung einzelner Quellen die Möglichkeiten von Mehrquellennutzung für einen monovalenten Wärmepumpenbetrieb in der Planung ausgewertet werden.
- Eine Regeneration wird effektiver bei höherer Kompaktheit des Sondenfeldes, also geringeren Sondenabständen bzw. höherer Bohrtiefe, und sollte daher bei höheren Leistungen immer in die Planung mit einbezogen werden. Bei wenigen Sonden bzw. ausreichendem Abstand zwischen den Sonden von 20 m bringt eine Regeneration hingegen wenig Vorteile, da eine gute natürliche Regeneration durch das umgebende Erdreich erfolgt.
- Durch die Strategie Spitzenlast kann die gesamte Sondenlänge stärker reduziert werden als durch Regeneration.
- Bei grossen Leistungen kann sich eine Kombination der Strategien Spitzenlastdeckung und Regeneration lohnen, da die Auslegung robuster wird und die Effizienz leicht ansteigt. Da die Regeneration aber erst bei kompakteren Feldern effektiv ist, und durch das Spitzenlastkonzept die Sondenlänge schon deutlich reduziert werden kann, ist die Kombination erst ab höheren Leistungen sinnvoll, bei denen eine höhere Kompaktheit des Sondenfeldes vorliegt.
- Die einfachste Integration für die Spitzenlastdeckung ist eine Kaskadierung der Leistung auf zwei oder mehr Wärmepumpen bzw. Verdichter, die bei höheren Leistungen im Fall von Aussenluftwärmepumpen häufig auch bisher schon durchgeführt wird, allerdings mit der einzigen Quelle Aussenluft. Die Integration kann auf Seite der Heizwärme erfolgen.
- Eine Alternative bietet eine Wärmepumpe mit zwei Verdampfern. Allerdings gibt es erst wenige Produkte auf dem Markt und wenig Erfahrung mit dem Betriebsverhalten.
- Eine höhere Integration auf der Quellenseite ermöglicht eine Regeneration, wenn die Luftquelle auf die Erdsonde umgeschaltet werden kann und hat damit höhere Synergien zwischen den Quellen, allerdings steigt auch die Komplexität der Integration. Daher sollte eine Überwachung der Sonden-eintrittstemperatur erfolgen, um einer Unterkühlung der Sonden vorzubeugen.
- Eine Regeneration kann auch über Freecooling und/oder aktive Kühlung mit Rückkühlung ins Erdsondenfeld und damit einem Doppelnutzen erfolgen. Im Wohnbau ist der Kühlbedarf allerdings trotz Klimawandel auf absehbare Zeit zu gering, um hohe Regenerationsraten im Bereich von 60 - 80% zu erreichen.

6.2 Auslegung

- Bei Einsatz von Erdsonden zur Spitzenlastdeckung kann die gesamte Erdsondenlänge deutlich kürzer ausgelegt werden. Bei kompakten Erdsondenfeldern entspricht die Reduktion der gesamten Sondenlänge etwa dem Energieanteil, der aus dem Erdsondenfeld entzogen wird, siehe auch Abbildung 24, aus der die Reduktion der gesamten Erdsondenlänge abhängig vom Leistungsanteil abgeschätzt werden kann.
- Im Spitzenlastsystem kann die Auslegung der Luftquelle primär nach Lärmschutzanforderungen oder anderen Einschränkungen wie z.B. Aufstellungsort vorgenommen werden. Aus dem sich daraus ergebenden Leistungsanteil der Luftquelle bestimmt sich die Auslegung des Erdsondenfeldes.
- Auch ohne Lärmschutzeinschränkungen auf Luftseite wird bei höheren Leistungen ab 100 kW eine Aufteilung der Leistung auf zwei Quellen empfohlen, da die Systemkosten sinken und eine bessere Effizienz erzielt wird, siehe Abbildungen 21, 30 und 31.
- Bei Regeneration definieren die Platz- und/oder Bohrtiefenbeschränkungen die Mindestauslegung der Regenerationsquelle. Sowohl für die Platz-/Bohrtiefenreduktion als auch in Hinblick auf die Systemkosten wird eine Auslegung auf einen Regenerationsgrad von 60-80% empfohlen. Bei höherer Regeneration sind die Platz-/Bohrtiefenreduktion nur noch geringfügig höher, aber die Kosten steigen an.
- Sind Gebäudesanierungszyklen bei der Auslegung des Erdwärmesondenfeldes bereits bekannt, kann die Sondenlänge weiter reduziert werden, siehe auch 5.6.3

6.3 Effizienz

- Die Spitzenlastdeckung mit Mehrquellsystem kann im Vergleich zur reinen Luftwärmequelle eine Effizienzerhöhung bewirken, im Vergleich zum reinen Sondensystem sinkt die Effizienz.
- Bei einer kostenoptimalen Regeneration im Bereich von 60 – 80% wird keine Effizienzerhöhung über das Erdreich erzielt, aber kann über die Direktnutzung der Regenerationsquelle erzielt werden. Dies hängt aber von der Systemintegration ab.

6.4 Kosten und Wirtschaftlichkeit

- Die folgenden Empfehlungen beziehen sich auf die Simulationsergebnisse unter den Kostenrandbedingungen nach Tabelle 10 in Anhang 9.3 und Elektrizitäts- und Gaspreise von Juni 2022.
- Die Jahreskosten für die Spitzenlastdeckung können bei kleinen Leistungen im Bereich von 60 kW Heizleistung um ca. 50 CHF/kW höher als bei Einzelquellen liegen. Bei Einschränkungen der Einzelquelle ist dieser Betrag moderat und liegt bei derzeitigen Gaspreisen unter einer fossilen Spitzendeckung mit Gaskessel, siehe auch Abbildungen 30 und 31.
- Bei höheren Leistungen ab ca. 100 kW weist eine Spitzenlastdeckung mit zwei Quellen Kostenvorteile gegenüber Einzelquellen auf, die sich mit steigender Leistung erhöhen. Für diese Leistungen können über Mehrquellsysteme Kosteneinsparungen erzielt werden und Mehrquellenlösungen sollten in der Planung geprüft werden, siehe auch Abbildungen 30 und 31.
- Regeneration sollte immer ausgewertet werden, da sich auch in Situationen ohne Einschränkungen Kostenvorteile ergeben können.
- Eine Regeneration aus Abwärme eines passiven und/oder aktiven Kühlbetriebs ist sehr kostengünstig zu realisieren und sollte genutzt werden.



- Bei grösseren, kompakten Sondenfeldern und/oder geringerem Sondenabstand unter 10 m kann die Regenerationsquelle über die Einsparungen im Sondenfeld refinanziert oder die Kosten sogar über die Refinanzierung hinaus gesenkt werden, siehe Abbildung 21.
- Eine Wasserfüllung der Sonde kann über Einsparungen bei den Betriebskosten durch höhere Effizienz bei gleichmässigen Strompreisen über das Jahr nicht refinanziert werden. Wenn höhere Strompreise im Winter vorliegen, muss die Situation getrennt ausgewertet werden.
- In den Simulationen unter verschiedenen Randbedingungen liegt das Kostenoptimum bei Regenerationsgraden von 60-80%. Bei höheren Regenerationsgraden steigen die Kosten wieder an, da mehr in die Regenerationsquelle investiert werden muss.
- Eine Regeneration mit unabgedeckten, selektiven Kollektoren und separater PV-Produktion erzielte in den Simulationen die niedrigsten Jahreskosten. Allerdings war der Kostenunterschied zu den anderen betrachteten Regenerationssystemen PV/T und Luftwärmetauscher nicht sehr gross, so dass die Regenerationsquelle je nach Randbedingungen gewählt werden kann, siehe Abbildung 21.
- Bei Einschränkungen für solare Regeneration kann eine Regeneration über Luftwärmetauscher ebenfalls kosteneffizient erfolgen. Allerdings sind auch für den Regenerationsbetrieb die Schall-emissionen zu beachten.

6.5 Regelung und Betriebsüberwachung

- In den Simulationen wurde ein grosser Einfluss der Systemregelung festgestellt. Eine sorgfältig angepasste Regelstrategie und Überprüfung und Nachjustierung während der ersten Betriebsjahre ist wichtig und entscheidend für ein gutes Funktionieren.
- Ein Monitoring der wichtigsten Temperaturen und Energiemengen sollte eingeplant werden. Durch Integration in die Systemregelung kann die gleiche Sensorik genutzt werden, was die Kosten verringert.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die durchgeföhrten Simulationsuntersuchungen der Strategien Spitzenlastdeckung und Regeneration bestätigen das Potenzial, über Mehrquellenlösungen Einschränkungen der Einzelquellen zu überwinden und einen monovalenten Wärmepumpenbetrieb zu ermöglichen. Weiterhin können dabei Synergien zwischen den Wärmequellen zur Effizienzsteigerung und Kosteneinsparung genutzt werden. Die Effizienz kann durch Nutzung der Quellen mit den besten Temperaturbedingungen erhöht werden, was gleichzeitig zur Reduktion der Betriebskosten beiträgt. Eine weitere Effizienzsteigerung könnte erschlossen werden, wenn die zweite Quelle zur Abtäufung des Luftwärmetauschers genutzt werden kann. Die Abtauverluste liegen im Bereich von 10% des Wärmeertrags bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Grosse Kostenreduktionen entstehen durch Einsparungen von Sondenlänge in Erdsondenfeldern, die bei der Spitzenlastdeckung überproportional mit dem Leistungsanteil reduziert und auch bei Regeneration, abhängig vom Regenerationsgrad, deutlich vermindert werden kann. Diese Kosteneinsparungen ermöglichen eine Refinanzierung oder sogar Übercompensation der Kosten der weiteren Quellen, womit die Mehrquellsysteme sogar kostengünstiger als die Einzelquellenlösung sein können, was Mehrquellsysteme bei grösseren Anlagen auch für Anwendungsfälle ohne Einschränkungen attraktiv erscheinen lässt.

Die Kombination von Wärmequellen ist nicht auf die hier betrachtete Kombination von Aussenluft und Erdwärmesonden limitiert. Die Aussenluft steht dabei vielmehr für eine leistungsbegrenzte Quelle - bei Luft etwa durch Lärmschutzanforderungen - und das Erdreich für eine speicherbare Wärmequelle, die aber ebenfalls Einschränkung unterworfen sein kann. Als weitere Kombinationen kommen z.B. auch Grundwasser oder Oberflächenwasser mit begrenztem Fördervolumen oder Abwärme mit begrenzter Leistung in Kombination mit Luft oder Erdwärmesonden in Frage.

Beim Konzept der Regeneration dient die zweite Quelle primär der Bewirtschaftung der speicherbaren primären Wärmequelle. Darüber hinaus kann die Regenerationsquelle aber auch z.B. den Sommerbetrieb allein übernehmen, und dadurch saisonale Vorteil, bei solarer Regeneration etwa durch das gute sommerliche Strahlungsdargebot und bei Luftwärmetauscher die höheren Aussenlufttemperaturen im Sommer nutzen und damit die Regeneration der primären Wärmequelle weiter befördern.

Weiterhin können Synergien und wirtschaftliche Vorteile gegenüber einzelnen Quellen genutzt werden, und teils durch die Kombination auch weitere Betriebsarten, wie beispielsweise ein Freecooling-Betrieb bei zusätzlichem Einsatz von Erdsonden ermöglicht werden. Allerdings hängt die Nutzung dieser Freecooling-Möglichkeiten auch vom Gebäude ab, z.B. von einem Flächenübergabesystem, welches klassischerweise im Neubau eingebaut ist. Bei aktiver Kühlung mit Luftrückkühler und Erdsonden für den Heizbetrieb kann der Rückkühler auch als zweite Wärmequelle im Winterbetrieb genutzt werden, so dass die Komponenten für eine Mehrquellennutzung schon vorhanden sind. Über Rückkühlung ins Erdreich im passiven Kühlbetrieb oder als Abwärmenutzung im aktiven Kühlbetrieb lässt sich auch eine kostengünstige Regeneration erzielen. Allerdings hängt der Regenerationsgrad vom Kühlbedarf ab und erreicht allfällig keine hohen Regenerationsgrade im Bereich von 60-80%. Im Wohnbau ist das Potenzial durch einen geringeren Kühlbedarf beschränkt.

Im Rahmen des Projekts wurden reine Wärmepumpenlösungen untersucht. Darüber hinaus können aber die erarbeiteten Konzepte auch für eine Kombination mit anderen Wärmeträgern bzw. Wärmeerzeugern sinnvoll sein. In Kombination mit Fernwärme durch Kehrichtverbrennung oder Niedertemperaturabwärme wie z.B. ARA-Abwärme können dank der Abdeckung der Spitzenlast mit Erdwärmesonden mehr Gebäude ans Netz angeschlossen werden. Das Lastprofil für die vom Netz bezogene Energie verschiebt sich durch die Erhöhung des Warmwasseranteils zu mehr Grundlast, d.h. die Abwärme als ARA- oder Fernwärmeauskopplung kann besser genutzt werden und bestehende Netze können ohne Vergrösserung der Leitungsdurchmesser/Erzeugerleistung mehr Gebäude versorgen bzw. es steht mehr Wärme für Hochtemperaturanwendungen wie Bestandsgebäude zur Verfügung.

Die Kombination der Strategien Regeneration und Spitzenlastdeckung wird in einem P&D Projekt des BFE zum Wärmeerzeugersatz eines 200 kW Heizkessels durch zwei Propan-Wärmepumpen mit den



beiden Wärmequellen Aussenluft und Erdreich im Praxisbetrieb über drei Heizperioden mittels Monitoring weiter untersucht. Anhand der Monitoringdaten können die Simulationsmodelle validiert und weiterentwickelt werden sowie erweiterte Untersuchungen zum Systemverhalten und der Regelung der Kombination der Strategien ausgewertet werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ermöglicht das Projekt eine Auswertung der realen Kosteneffizienz des Wärmeerzeugerersatzes und Variantenvergleiche zu anderen Systemlösungen.

Da bei Spitzenlastdeckung die gesamte Sondenlänge deutlich reduziert werden kann, können mit der Spitzenlaststrategie auch einem Dichtestraß im Erdreich vorgebeugt oder Einschränkungen durch Nachbarsonden entschärft werden.

Die Ergebnisse legen nahe, dass Einzelquellen teils wirtschaftlich ineffizient sind und über Mehrquellensysteme bessere Systemlösungen mit Kostenvorteilen erschlossen werden können. Um Mehrquellensysteme stärker in die Anwendung zu bringen, sollen daher Planungsrichtlinien weiterentwickelt werden und in die gängige Qualitätssicherung, im Sinne des Wärmepumpensystemmoduls auch auf grössere Anlagen erweitert werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] *Bildungsoffensive Gebäude*. <https://www.energieschweiz.ch/bildung/bildungsoffensive-gebaeude/> (accessed April 24, 2023).
- [2] "Energieperspektiven 2050+: Kurzbericht," 2022.
- [3] "Wärmestrategie 2050,"
- [4] FWS Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz, *Statistik 2021*, 2022.
- [5] *Aqua & Gas*.
- [6] Dott, R., Winteler, C., Afjei, T., and Hafner, B., eds., *Key Facts for High Efficient Solar Ice Storage Heat Pump Systems*, 2016.
- [7] Xu, L., Pu, L., Shengqui, Z., and Li, Y., "Hybrid ground source heat pump system for overcoming soil thermal imbalance: A review," In *Sustainable Energy Technologies and Assessments*.
- [8] Kjellsson, E., Hellström, G., and Perers, B., "Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings," *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2667–2673, 2010.
- [9] Menard. Martin, "Erhöhung der Quellentemperatur von Wärmepumpen," 2015.
- [10] Persdorf, P., Ruesch, F., and Haller, M., "RegenOpt - Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher Beeinflussung von Erdwärmesonden: energetische und ökonomische Analysen," Schlussbericht.
- [11] Pieper, H., Ommen, T., Elmegaard, B., and Brix Markussen, W., "Assessment of a combination of three heat sources for heat pumps to supply district heating," *Energy*, vol. 176, pp. 156–170, 2019.
- [12] *Wärmepumpen-Kollektor Solink*, Produktwebsite. <https://www.consolar.de/de/pvt-kollektor-solink/> (accessed September 13, 2022).
- [13] *Verkaufsflyer Terra Booster*. <http://terra-booster.de>.
- [14] *System Zero: Die Wärmepumpen-Revolution für Gewerbe und Industrie*. <https://dimplex.de/sites/default/files/downloads/38221-gdts-brochure-system-zero-DE-web-single.pdf> (accessed September 13, 2022).
- [15] *ThermSelect*, Website. www.thermselect.de (accessed September 13, 2022).
- [16] *LWZ 8 CSE Premium*, Produktwebsite, 2022. https://www.stiebel-eltron.ch/de/home/produkte-loesungen/erneuerbare_energien/lueftung/zentral/lwz-cs-premium/lwz-8-cse-premium.html.
- [17] *Dynamischer Energie Manager*, Produktwebsite. <http://www.etank.de/etank-funktion/dynamischer-energie-manager/> (accessed September 13, 2022).
- [18] Bätschmann, M., Büttgenbach, S., Caflisch, M., and Willim, M., "Erkenntnisse über Erdwärmesonden-Regeneration am Beispiel Doppel-Mehrfamilienhaus Ländisch," 2021.
- [19] Muller, V., Carisch, L., and Ménard, M., "Effiziente Abluft-Erdsonden-Wärmepumpe für die Gebäudeerneuerung: Wohnsiedlung Dettenbühl, Wettswil a. Albis," Schlussbericht, 2016.
- [20] Vuataz, F.-D., "Geostrukturen und Energiepfähle: Ein kombiniertes System für Heizung und Kühlung,"



- [21] Kley, C., Bockelmann, F., Hauck, S., and Fisch, N., "EnOB: Monitoring und Betriebsoptimierung des Willibald-Glick-Gymnasiums in Neumarkt (i.d.OPf.)," Gemeinschaftlicher Abschlussbericht Verbundprojekt.
- [22] Rockenfeller, A., *Wärmepumpe mit zwei Quellen*. <https://www.deutsche-handwerkszeitung.de/waermepumpe-mit-zwei-quellen-134946/> (accessed September 13, 2022).
- [23] Leibundgut, J., Kunath, L., and Büttgenbach, S., "Solarenergie auf der Läger Hochwacht," In *HK-Gebäudetechnik*, 48–51.
- [24] Meier, C. and Goffin, P., *Rettung von Erdwärmesonden mittels Regeneration*. 2SOL-Fachtagung: Saisonale Wärmespeicher im System, 2022.
- [25] Lämmle, M., *Projekt "Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach": Wärmepumpen für ein energieeffizientes und wirtschaftliches Energiekonzept*, 2020.
- [26] "Bewilligungsverfahren Erdwärmesonden in den Kantonen: Übersicht der Bewilligungsverfahren für Erdwärmesonden in den Kantonen," 2017.
- [27] Huber, A., "Abwärmenutzung in Lüftungsanlagen," Kurzbericht, 2014.
- [28] van Velsen, S. and Benz, M., "Wärmerückgewinnung aus Schmutzwasser: Vorabklärung bezüglich des Potentials der Wärmerückgewinnung aus Schmutzwasser im Gebäude respektive auf dem Grundstück," Schlussbericht, 2013.
- [29] Heinz Andreas, Lerch Werner, Breidler Johann, Fink Christian, and Wagner Waldemar, "Wärmerückgewinnung aus Abwasser im Niedrigenergie- und Passivhaus: Potenzial und Konzepte in Kombination mit Solarthermie und Wärmepumpe," 2012.
- [30] Müller, E. A. and Dietler, M., "Abwasser als Energiequelle: Abwasser zum Heizen und Kühlen - Potenzial, Umsetzung und Wirtschaftlichkeit," In *Aqua & Gas*, 48–55.
- [31] Koch, M., Nietlisbach, A., Känel, B., Calderoni, M., Wille, B., Müller, R., Bretscher, P. et al., "Heizen und Kühlen mit Abwasser: Leitfaden für die Planung, Bewilligung und Realisierung von Anlagen zur Abwasserenergienutzung," <http://wwwара.zh/abwaerme>.
- [32] Buri, R. and Kobel, B., "Wärmenutzung aus Abwasser: Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen," 2004.
- [33] Afjei, T., Dott, R., and Huber, A., "Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen," Schlussbericht, 2007.
- [34] "Energienutzung aus Untergrund und Grundwasser," Planungshilfe, 2010.
- [35] Gadola, R., Sotnikov, A., and Maurer, T., "Empfehlungen zur Regeneration von Erdwärmesonden: Auslegeordnung und Vorschläge für einen sicheren Betrieb," Schlussbericht, 2018.
- [36] Bätschmann, M., Goffin, P., Crameri, S., Bosshard, I., and Zenhäusern, D., "Pilotprojekt Olfelden: Emissionsfreie Wärmeerzeugung mit tiefer Erdwärmesonde, effizienter Niederhub-Wärmepumpe und optimierter Wärmeverteilung," Abschlussbericht Kanton Zürich, Zwischenstand des Projekts per Ende 2020, 2020.
- [37] Buesser, S., Wemhoener, C., and Rominger Lukas, "Cost optimized design of ground probe fields with solar regeneration," In *Proceedings 13. IET Heat Pump Conference, Jeju, 26. - 29. April 2021*.
- [38] Solar-Institut Jülich, *CARNOT Toolbox*. <https://www.fh-aachen.de/forschung/solar-institut-juelich/camot>.
- [39] Huber, A. and Schuler, O., "Berechnungsmodul für Erdwärmesonden," Schlussbericht, 1997.

- [40] SIA 2024:2015. Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik.
- [41] SIA 2028:2010. Klimadaten für Bauphysik, Energie und Gebäudetechnik.
- [42] MeteoSchweiz, *Klimaszenarien für das zukünftige Innenraumklima: stündliche Klimadatensätze für die Zukunft in Ergänzung zu SIA 2028*, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Baudirektion Kanton Zürich, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA) und Hochschule Luzern (HSLU), Zürich., 2021.
- [43] "Belaria twin A (24,32), Belaria twin AR (24,32)," Datenblatt, 2021.
- [44] "Thermalia comfort (6-17), comfort H (7,10)," Datenblatt, 2021.
- [45] SIA 384/6:2021. Erdwärmesonden.
- [46] Stegmann, M., Bertram, E., Rockendorf, G., and Janssen, S., eds., *Modell eines unverglasten photovoltaisch-thermischen Kollektors basierend auf genormten Prüfverfahren*, 2012.
- [47] Meyer Burger Technology AG, *Datenblatt Meyer Burger Black*. Gwatt, Thun.
- [48] Energie Solaire SA, *Solardach AS, Technische Unterlagen*. Sierre.
- [49] Bergner, J. and Quaschning, V., "Sinnvolle Dimensionierung von Photovoltaikanlagen für Prosumer," 2019.
- [50] Baggenstos, A., Büttgenbach, S., Schmidt, T., and Zenhäusern, D., "Einbindung von PV/T-Kollektoren in erdsondengekoppelten Wärmepumpensystemen: Potentialevaluation der Kombination Solar & Wärmepumpe und Betriebsoptimierung mittels Monitoring einer Grossanlage solar regenerierter Erdsondenfelder," Schlussbericht, 2020.
- [51] Huber Energietechnik AG, *EWS*.
- [52] Jansen AG, *Prospekt Jansen Powerwave*. Oberriet.
- [53] Bosshard, I., Haller, M., and Wemhöner, C., "OptiPower: Untersuchung der optimalen Auslegung der Leistung von Heiz- und Kühlsystemen für Wohn- und Verwaltungsgebäude," Jahresbericht, 2021.
- [54] Frei, U., Philippen, D., and Nievergelt, G., "Dachintegrierte Luft/Wasser-Wärmepumpe mit hybrid genutzter PV-Anlage in einem Stadthaus," BFE P&D-Projekt SI/502032 (in Bearbeitung 2020-2023). In *News aus der Wärmepumpenforschung*.
- [55] Hadengue, B., Morgenroth, E., Larsen, T. A., and Baldini, L., "Performance and dynamics of active greywater heat recovery in buildings," *Applied Energy*, vol. 305, p. 117677, 2022.
- [56] FEKA Energiesysteme, *Energie aus Abwasser: Lehrmittel - System FEKA*, 2009.
- [57] *Heizkostenvergleichsrechner Version 36*: Hochschule Luzern.



9 Anhang

9.1 Simulationsparameter

Tabelle 7: Standardparameter der Simulation

Sondentyp	Duplex DN40
Wärmeleitfähigkeit	0.44 W/mK
Hinterfüllung	
Spez. Wärmekapazität	3040 J/kgK
Dichte	1180 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	Parametrisierbar, Standardwert: 2 W/mK
Erdreich	
Spez. Wärmekapazität	1000 J/(kgK)
Dichte	2600 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	2.4 W/(mK)
Mittl. Oberflächentemperatur Boden	9 °C
Geothermischer Gradient	0.03 K/m
Nahbereich	6 Knoten, bis 2m Radius
Erdschichten	10 Knoten
Superposition	180 Tage
Feldform	Linienfeld: Sonden in einer Linie Kompaktfeld: Sonden in Viereck mit jeweils gleichem Abstand
Wetter normal	SMA dry normal (Standard), Zürich [41]
Wetter kalt	SMA dry cold, Zürich [41]
Wetter warm	RCP 8.5 2035, Zürich [42]

9.2 Lastprofile

Die verwendeten Lastprofile wurden mit einem selbst entwickelten Lastgenerator auf Matlab Simulink erstellt. Das Gebäude wird mit dem Block «Simple House» aus der Carnot Toolbox dynamisch modelliert. Als Basis dienen ein Neubau und ein Bestandsbau mit Normwerten aus der SIA 2024. Die Energiebezugsfläche wurde dabei so angepasst, dass der Heizleistungsbedarf inkl. Warmwasseraufbereitung bei 2700 Volllaststunden ca. 60 kW beträgt.

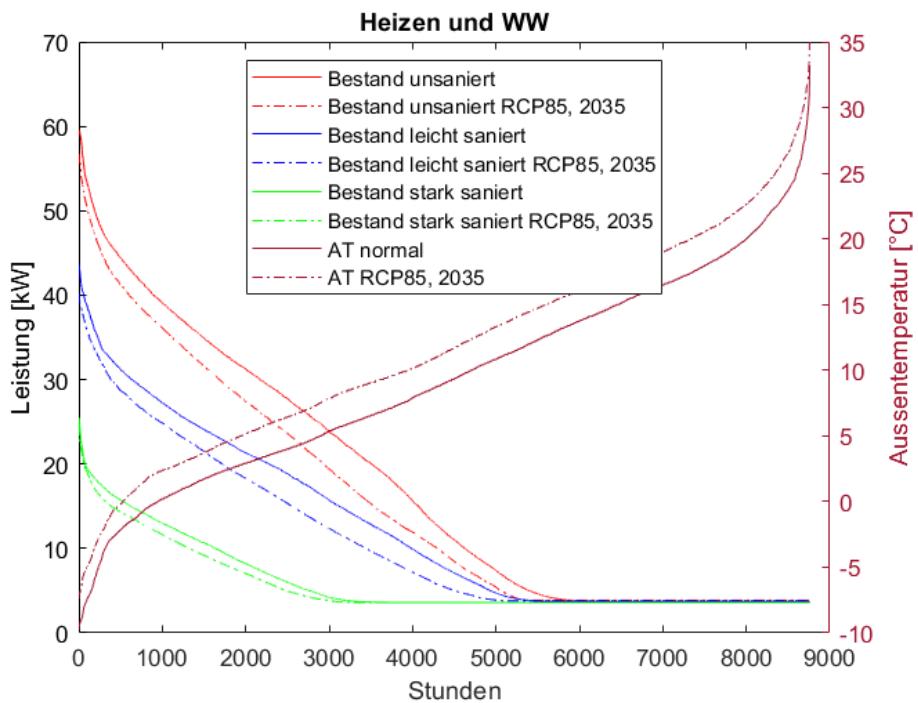


Abbildung 53: Summenhäufigkeit der Lastprofile im Bestandsbau. In der Darstellung wird die durchschnittlich benötigte Leistung für die Warmwasseraufbereitung dargestellt, im effektiven Lastprofil erfolgt dies in Ladefenstern.

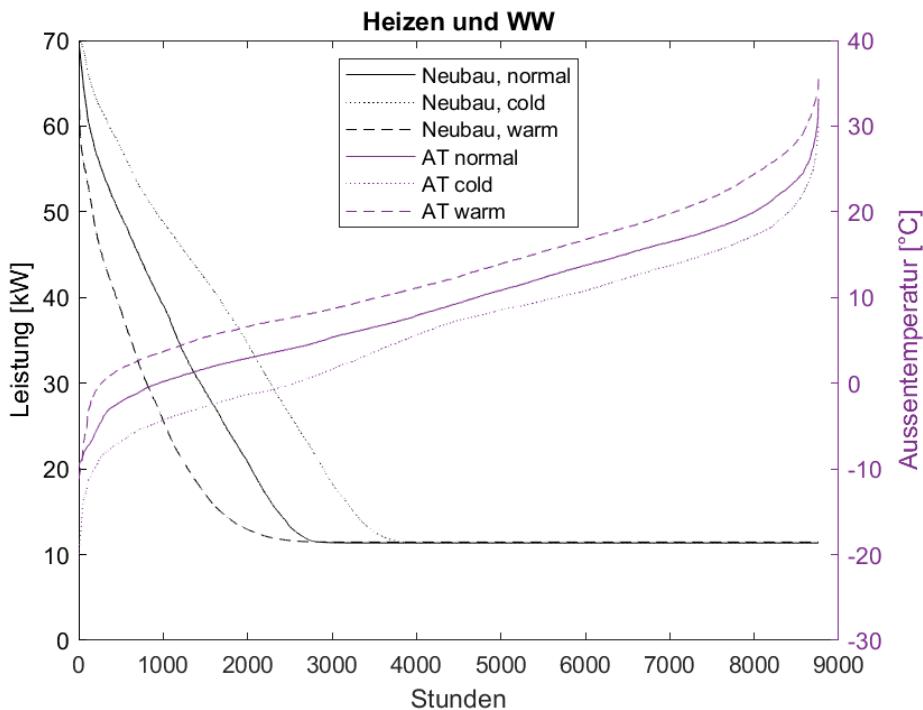


Abbildung 54: Summenhäufigkeit der Lastprofile im Neubau. In der Darstellung wird die durchschnittlich benötigte Leistung für die Warmwasseraufbereitung dargestellt, im effektiven Lastprofil erfolgt dies in Ladefenstern.



Tabelle 8: Kennzahlen der Lastprofile. Der Warmwasserbedarf beträgt für alle Gebäude 30 kWh/m2a

Bestandsbau, Wetter normal	Heizen [kWh/m2a]	Heizen + WW [kWh/m2a]	Leistung tot. [W/m2]	EBF [m2]	Heizleistung [kW]
unsaniert	117	148	54.4	1040	56.6
leicht saniert	74	105	40	1040	40.0
stark saniert	21	51	24	1040	24.0
Bestandsbau, Wetter warm					
unsaniert	80	112	54.4	1040	56.6
leicht saniert	47	78	40	1040	41.6
stark saniert	13	43	24	1040	25.0
Neubau					
Wetter normal	18	48	18	3300	59.4
Wetter warm	10	40	18	3300	59.4

Tabelle 9: Berechnungsparameter der Gebäude für die Lastprofile

	Einheit	Neubau	Bestandsbau	Bestandsbau leicht saniert	Bestandsbau stark saniert
Energiebezugsfläche EBF	m2	3300	1040	1040	1040
Normheizlast	W/m2	16.45	54.4	40	28.3
Heizgrenze	°C	12	15	14	13
Gebäude: Anzahl Stockwerke	-	6	3	3	3
Wärmeübertragungskoeffizient Wände, Dach, Boden	W/m2K	0.1	1.2	0.2	0.2
Fenster: Anteil	-	0.3	0.15	0.3	0.3
Fenster: Wärmeverlustkoeffizient	W/m2K	0.9	1.5	1.2	1.2
Fenster: Transmissionskoeffizient	-	0.5	0.65	0.5	0.5
Fenster: G-Wert bei Verschattung	-	0.1	0.2	0.14	0.14
Lüftung: Infiltration	m3/m2/h	0.15	0.3	0.15	0.15
Lüftung: Ventilationsrate	m3/m2/h	1	0	0	1
Lüftung: Wärmerückgewinnungsgrad	-	0.8	0	0	0
InterneLast: Beleuchtung	W/m	0.8	2.7	2.7	2.7
InterneLast: Geräte	W/m	4	10	8	8
Heizung: Vorlauftemperatur bei 0°C	°C	30.6	44	40	35
Heizung: Vorlauftemperatur bei -8°C	°C	34.8	53.3	44	40
Vollaststunden	h	2700	2700	2700	2700
Trägheit des Gebäudes	kJ/kgK	500'000	500'000	500'000	500'000

9.3 Randbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Tabelle 10: Basiswerte und Quellen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung (Preise von Juni 2022)

Kategorie	Enthält	Basiswerte	Quelle
Anlagekosten Wärmepumpen	Wärmepumpe Armaturen & Apparate Heizungsspeicher Luftkanal (für LWP) Montage Erschliessung Elektro Mehraufwand Elektrokasten Anschlussgebühren	Leistungsabhängig gemäss Quelle	HSLU Heizkosten- Vergleichsrechner V36 [57]
Unterhaltskosten Wärmepumpen	Wartungsabo	Leistungsabhängig gemäss Quelle	
Anlagenkosten Solar	PVT USK PV	750 Fr/m ² 400 Fr/m ² 250 Fr/m ²	Eigene Schätzung, Tend
Erdsondenbohrung	Pauschal für Bohrung, Sonde, Anschlussleitungen	100 Fr/m	Eigene Schätzung, Tend
Anlagekosten Kühlung	Installation pro Whg. Installation Zentrale	5 Fr/m ² EBF 12 kFr. (60 kW); 18 kFr. (120 kW); 24 kFr. (240 kW)	Eigene Schätzung, Tend
Anlagekosten Kaskadierung	pauschal für hydraulische Zusammenführung sekundär und Steuerung	15 kFr (60 kW) 30 kFr (120 kW) 45 kFr (240 kW)	Eigene Schätzung, Tend
Anlagekosten Gas	Kessel Armaturen & Apparate Montage	Leistungsabhängig gemäss Quelle, ohne Kamin und Anschlusskosten	HSLU Heizkosten- Vergleichsrechner [57]
Unterhaltskosten Gas	Wartungsabo Kaminfeger	Leistungsabhängig gemäss Quelle	
Energiekosten Gas	Leistungspreis	34 Fr/kW/Jahr	Energie360
	Energiepreis	15 Rp/kWh, entspricht ca. Tarif Energie360 mit 35% Biogasanteil im Juni 2022	eigene Annahme
Energiekosten Strom	Netzbezug Eigenverbrauch Einspeisevergütung	20 Rp/kWh 17 Rp/kWh 10 Rp/kWh	eigene Annahme
Kapitalkosten	Realzinssatz	1.5 %	eigene Annahme
Amortisation	Erdwärmesonde Anlagen	50 Jahre 20 Jahre	eigene Annahme
Kühlnutzen		1.5 Fr/(m ² EBF*a)	Tend
Betriebskosten Kühlung	Stromkosten	aktive Kühlung: Kühlenergie 6.7 kWh/(m ² EBF*a), EER=8 Freecooling (Volllastsonde): 0 (vernachlässigbar)	eigene Annahmen
Haushalts- Strombedarf		14.75 kWh/(m ² a)	SIA 2024:2015 [40]

Beim Erdgas wurde die Annahme getroffen, dass der Kamin und Gasanschluss schon vorhanden sind (Heizungssatz im Bestand) und daher diese Kosten nicht mehr anfallen.



9.4 Validierung des Luftwärmetauschers

Der Luftwärmetauscher wurde als Mehrknotenmodell in Simulink modelliert. Die Parametrisierung erfolgte Anhand des Datenblatts eines existierenden Luftkühlers von Cabero, welcher zur Erdsonden-Regeneration in der Mehrfamilienhaussiedlung Ettenbergstrasse in Wetzwil am Albis eingesetzt wird. Für dieses Projekt konnte die auf der Anlage erfassten Daten genutzt werden für die Validierung des Luftwärmetauschermodells. In der ersten Validierung wurden Wetterdaten von Meteoschweiz für den Standort Zürich genutzt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Abweichungen wegen lokaler Einflüsse relativ gross sind. Glücklicherweise konnte auf eine öffentlich zugängliche Wetterstation in 800 m Distanz zur Anlage zurückgegriffen werden. Damit hat sich eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen mit den simulierten Daten ergeben (Abbildung 55).

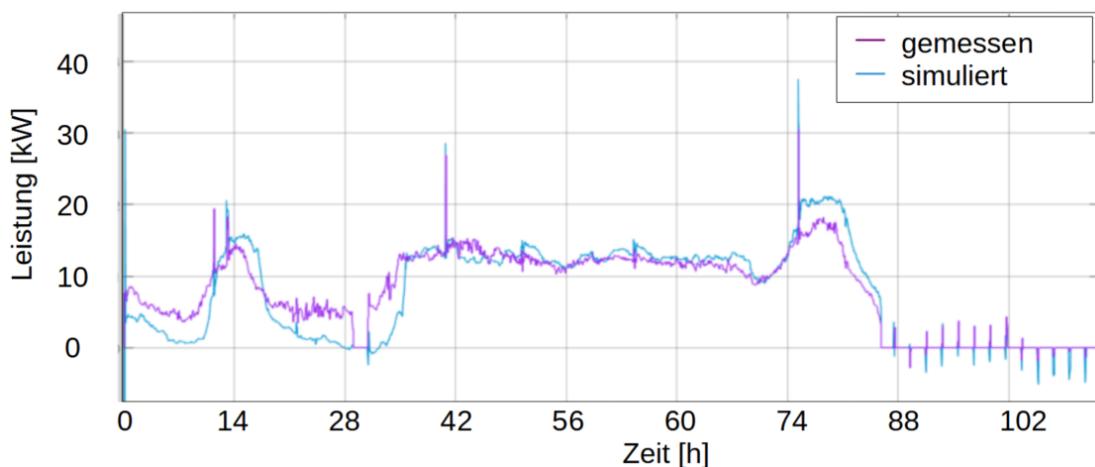


Abbildung 55: Vergleich der simulierten mit der gemessenen Leistung des Luftwärmetauschers über eine Woche im Januar 2022

Der eingesetzte Luftwärmetauscher hat eine Leistung von 80 kW auf den vom Hersteller angegebenen Betriebspunkt. Die spezifische normierte Leistung beträgt 13 kW/K. Die Normheizleistung aller vier Gebäude zusammen beträgt 106 kW. Damit ergibt sich eine spezifische Wärmetauscherleistung von 0.122 kW/kWh.



Abbildung 56: Luftwärmetauscher in der MFH-Siedlung Ettenbergstrasse.

9.5 Validierung der Simulation "Solare Regeneration"

Zur Validierung der Simulation konnten Messwerte auf Stundenbasis über 4 Jahre aus dem Objekt Ländisch, Feldmeilen [18] verwendet werden. Die Validierung wurde in zwei Schritten vorgenommen:

9.5.1 Validierung des Erdsonden- und Kollektormodells

Der gemessene Gesamtwärmebezug der Wärmepumpe wurde als Input in das Modell eingespeist. Im Weiteren wurden die lokal gemessenen Wetterdaten für die Simulation des Solarertrags in das Modell eingegeben. Der Kollektorertrag (thermisch und elektrisch) und die Erdreichtemperaturen wurden mit dem Modell simuliert. Der Kollektorertrag ist in der Simulation um 7% geringer als in der Messung. Dies führt zu einem 11% höheren Wärmeentzug aus dem Erdreich (Abbildung 57). Die Sondeneintrittstemperatur ist an den kältesten Tagen in der Simulation ca. 1-2 K tiefer als in der Messung. Dies ist auch auf den grösseren Wärmeentzug aus dem Erdreich zurückzuführen. Im Sommer ist die Eintrittstemperatur in der Simulation ca. 3-4 K niedriger als in der Messung, was auf den geringeren Solarertrag zurückzuführen ist.

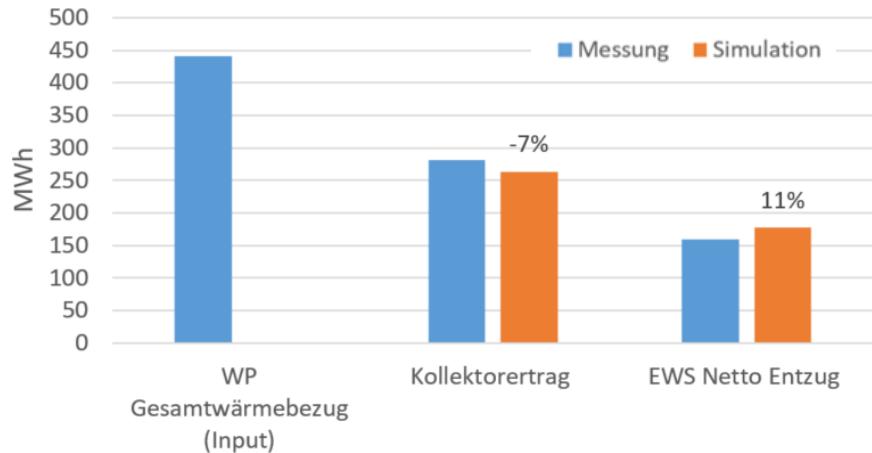


Abbildung 57: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messwerten (Summen über 4 Jahre)

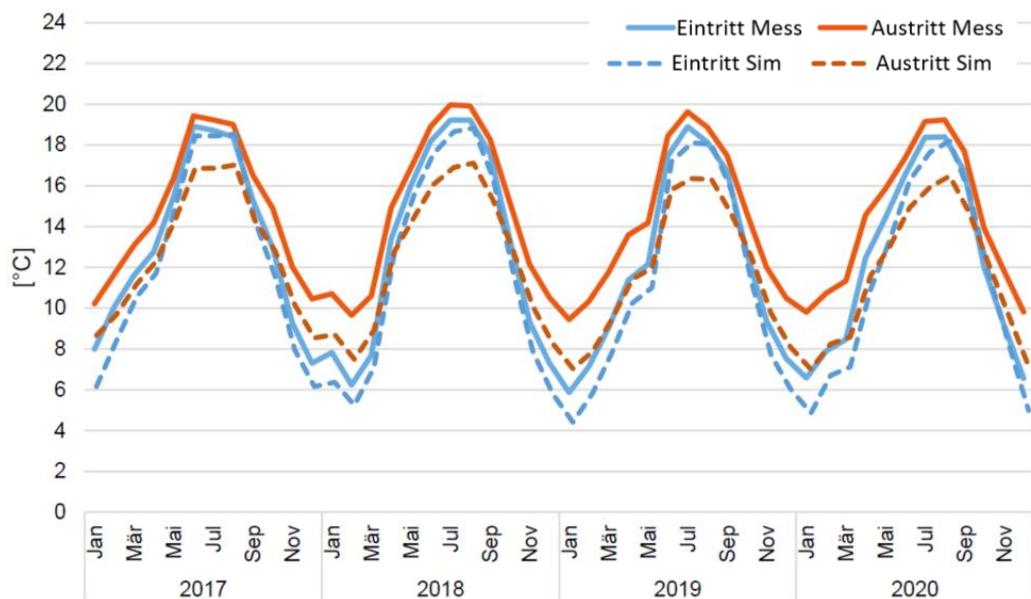


Abbildung 58: Mittlere monatliche Sondentemperaturen aus den Messungen und der Simulation über 4 Jahre für die Validierung des Teilmodells



9.5.2 Validierung des gesamten Modells

Im zweiten Schritt wurde die Simulation mit einem eigenen Lastprofil durchgeführt. Dazu wurde ein weiteres Profil "MFH Sanierter Bestand" erstellt, analog den beiden in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Profilen, jedoch mit einer Energiebezugsfläche von 2080 m².

	MFH Ländisch	Profil "MFH sanierter Bestand"
Energiebezugsfläche [m ²]	2000	2080 (Multipliziert mit Faktor 0.8 → 1664 m ²)
Verbrauch Warmwasser [kWh/(m ² a)]	20	19.8 (+50% Verluste)
Verbrauch Heizwärme [kWh/(m ² a)]	44	46.6

Abbildung 59: Kenndaten Ländisch im Vergleich mit dem Profil für die Simulation

Das Profil "MFH sanierter Bestand" wurde auf eine Heizleistung von 60 kW ausgelegt. Das Profil ist mit 2700 Vollaststunden gerechnet, was eine zu grosse produzierte Wärmemenge ergibt. Daher wurde das Profil mit Faktor 0.8 multipliziert. So ist zwar die Leistung in der Simulation niedriger als in der Messung, die Gesamtwärmeproduktion ist jedoch die gleiche.

Abbildung 60 zeigt den Temperaturverlauf in der Sonde über 4 Jahre. Die Temperaturen in der Simulation liegen zwar ca. 3K unter der Temperatur in der Messung, die minimale Temperatur bleibt jedoch über die 4 Jahre konstant, d.h. das Erdreich wird genügend regeneriert um eine Absenkung über längere Zeit zu verhindern.

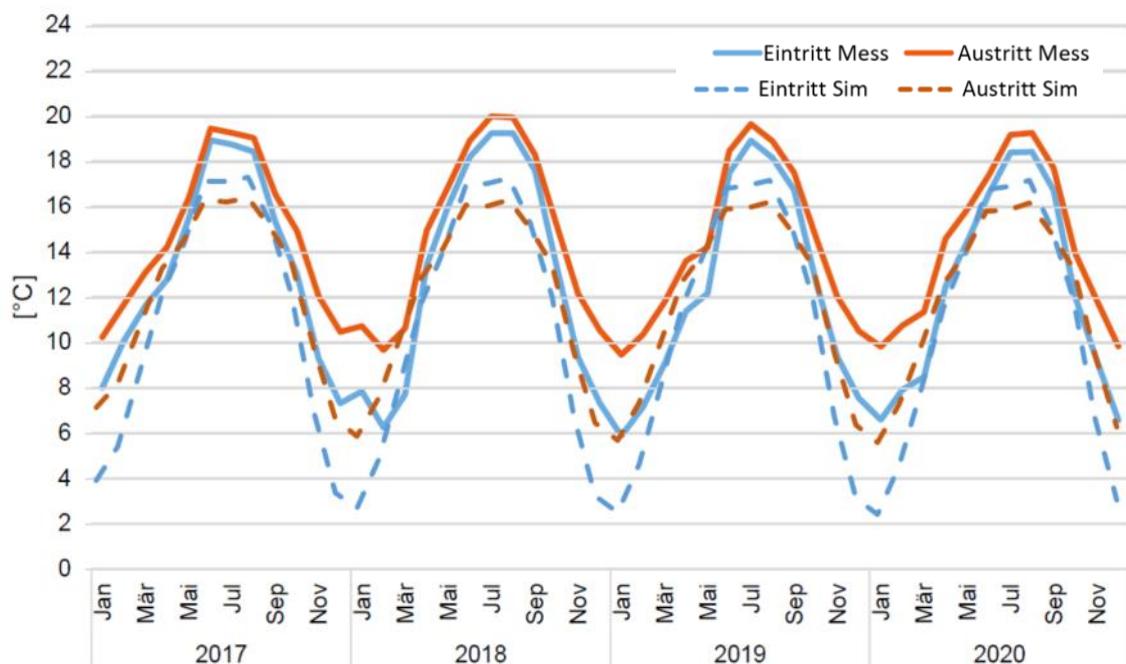


Abbildung 60: Mittlere monatliche Sondentemperaturen aus den Messungen und der Simulation über 4 Jahre für die Validierung des gesamten Modells

9.6 Fallbeispiel Kostenfeld

Die Tabelle 11 zeigt ein fiktives Beispiel für die Anwendung des Kostenfeldes für einen Neubau mit 240 kW Heizleistung und 13'200 m² EBF. Es werden zwei verschiedene Varianten A und B der begrenzenden Parameter dargestellt, welche sich durch die Grundstücksfläche und die Bohrtiefenbeschränkung unterscheiden.

Für die Variante A wurden 8 Stockwerke angenommen, wodurch sich eine Gebäudegrundfläche von 1824 m² ergibt. Es wurde eine Grundstücksfläche von 3200 m² angenommen.

Für die Variante B wurden 12 Stockwerke angenommen, wodurch sich eine Gebäudegrundfläche von 1217 m² ergibt. Es wurde eine Grundstücksfläche von 1600 m² angenommen.

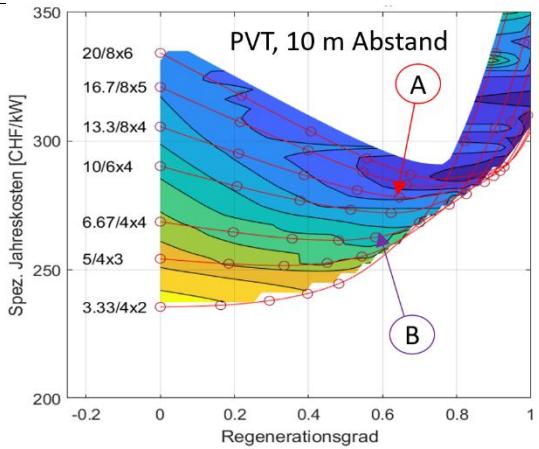
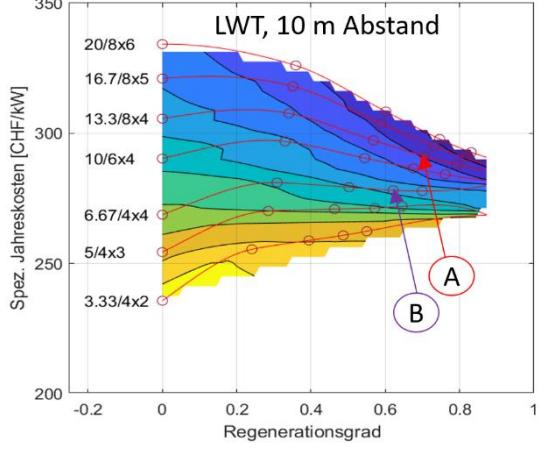
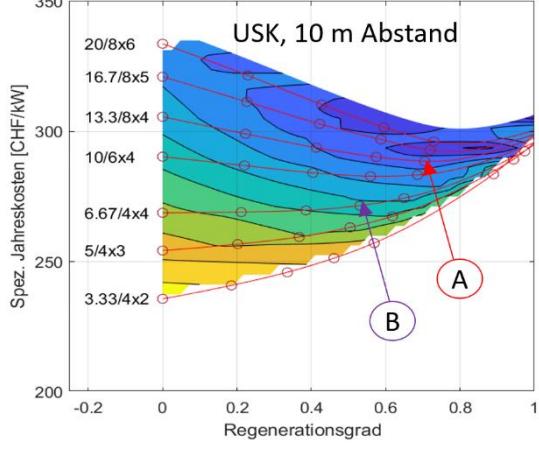
Die spezifischen Jahreskosten wurden mit den in 9.3 dargestellten Parametern berechnet. Zu beachten ist, dass die spezifischen Bohrkosten (Fr/m) für alle Bohrtiefen als gleich angenommen werden. Eine zusätzliche PV-Anlage wurde nicht miteingerechnet.

Die spezifischen Jahreskosten liegen für alle Varianten zwischen 265 und 290 Fr/kW nahe beieinander und damit im Unschärfebereich der Kostenschätzung.

Für die Varianten mit Luftwärmetauscher wird eine Leistung von 28.8 kW/K benötigt. Dies entspricht etwas mehr als zwei Einheiten des in der Abbildung 56 dargestellten Geräts.



Tabelle 11: Fallbeispiel für das Kostenfeld

	Varianten	A	B
Neubau, 240 kW Heizleistung Energiebezugsfläche: 13'200 m ²	Grundstücksfläche [m ²] (Platz zum Bohren) Max. spez. Fläche [m ² /kW] Bohrtiefenbeschränkung [m]	3200 13.3 200	1600 6.7 350
 PVT, 10 m Abstand	Simulations-Nr. Sondentiefe [m] Sondenfeld Fläche PVT [m ²] Regenerationsgrad Spez. Kosten [Fr/kW]	317 206 8x4 400 0.65 275	301 342 4x4 400 0.58 265
 LWT, 10 m Abstand	Simulations-Nr. Sondentiefe [m] Sondenfeld Leistung LWT [kW/K] Regenerationsgrad Spez. Kosten [Fr/kW]	199 195 8x4 28.8 0.71 290	189 334 4x4 28.8 0.62 275
 USK, 10 m Abstand	Simulations-Nr. Sondentiefe [m] Sondenfeld Fläche USK [m ²] Regenerationsgrad Spez. Kosten [Fr/kW]	317 194 8x4 400 0.7 290	300 350 4x4 300 0.8 270