Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

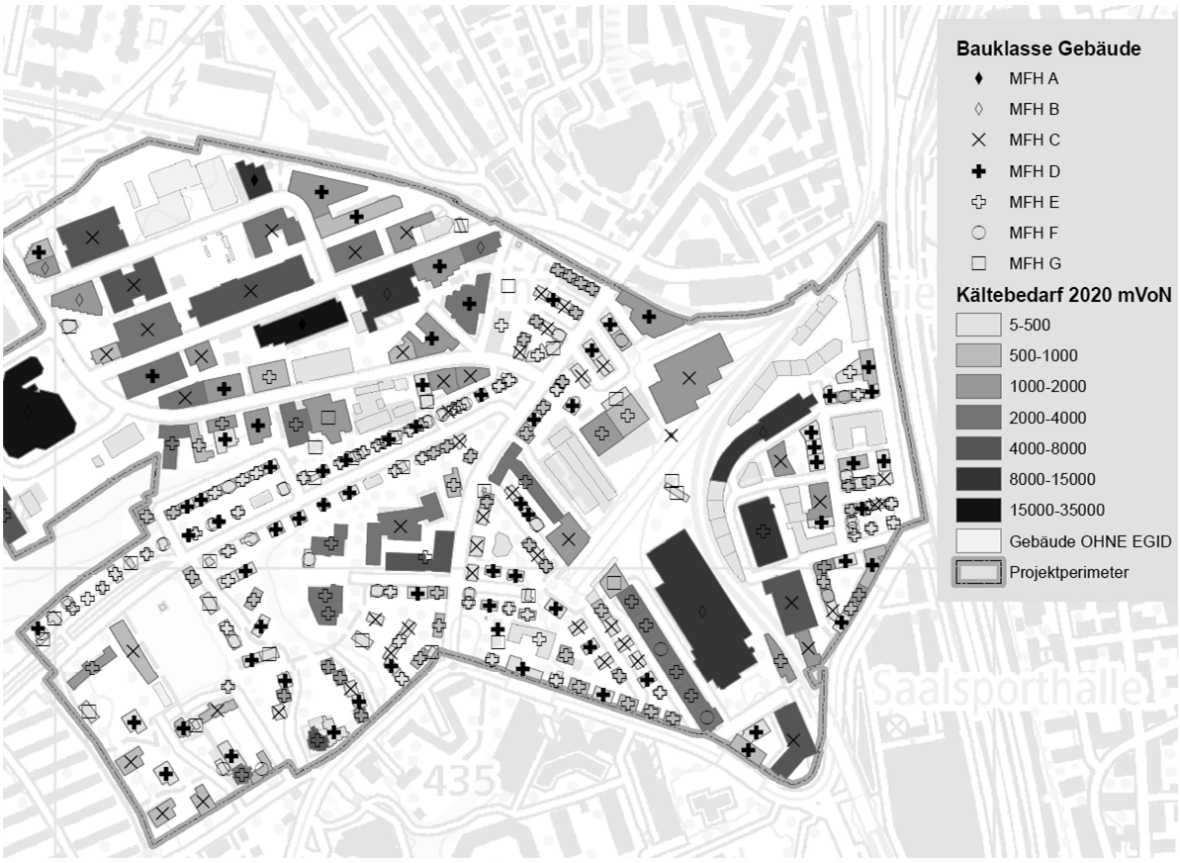
Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 10.11.2022

Cool2Regen

Aktives Kühlen von Gebäuden mit Wärmepumpen und Erdsonden für hohe Regenerationsgrade



Quelle: SPF

Datum: 10.11.2022

Ort: Rapperswil

Subventionsgeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Gebäude und Städte
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:
OST – Ostschweizer Fachhochschule
SPF Institut für Solartechnik
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil-Jona
www.ost.ch/spf

Hochschule Luzern
Technik & Architektur
Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE
Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw
www.hslu.ch

Autor/in:
Florian Ruesch, SPF, florian.ruesch@ost.ch
Lukas Füglister, SPF, lukas.fueglister@ost.ch
Michel Haller, SPF, michel.haller@ost.ch
Dr. Tobias Sommer, IGE, tobias.sommer@hslu.ch
Andrii Zakovorotnyi, IGE, andrii.zakovorotnyi@hslu.ch

BFE-Projektbegleitung:
Nadège Vetterli, nadege.vetterli@anex.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502166

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

Zusammenfassung

Die aktive Kühlung von modernen Neubauten kann zukünftig dazu eingesetzt werden, Erdwärmesonden substanziell zu regenerieren. Bei Bestandsgebäuden reicht der steigende Kühlbedarf alleine jedoch nicht aus, um hohe Regenerationsgrade zu erreichen.

Das vorhandene (nicht genutzte) PV-Potential im Sommer in den untersuchten Gebieten ist in der Tagesbilanz wesentlich höher als der benötigte Strombedarf für die aktive Kühlung zur Regeneration der Erdwärmesonden. In den betrachteten Quartieren könnte je nach Szenario 60-80% des elektrischen Bedarfs direkt durch PV-Strom gedeckt werden, ohne dass Massnahmen zur Erhöhung der Eigendeckung – zum Beispiel Kältespeicher - mit einbezogen wurden.

Analysen von Beispielquartieren zeigen, dass ein vollständiger Ersatz der Wärmeerzeuger mit Erdsonden-Wärmepumpen zu einer starken gegenseitigen Beeinflussung der Sonden und zu einer starken Langzeitauskühlung des Untergrundes führen würde. Die Regeneration mit aktiver Kühlung kann diesem Effekt entgegenwirken. In weniger dicht besiedelten Quartieren mit effizientem Gebäudestandard kann dadurch eine kritische Langzeitauskühlung verhindert werden. In dicht besiedelten Gebieten mit geringem Sanierungspotenzial würde aber trotz Regeneration durch aktive Kühlung eine signifikante Langzeitauskühlung bestehen bleiben, und es wären zusätzliche Regenerationsmassnahmen nötig, um vollständig auf Erdwärmesonden-Wärmepumpen umzusteigen.

Summary

Active regeneration of modern energy efficient buildings can be used to regenerate geothermal boreholes in a substantial way. On the other hand, the growing cooling demand is too small to generate elevated regeneration rates in standard buildings.

The potential for PV-electricity production on top of household needs is substantially higher than the electricity demand for active cooling. In the analyzed areas, 60-80% of this electricity demand can be directly covered with local PV production even without considering measures to enhance self-coverage (e.g. cold storage).

The analysis of example areas showed that a switch of all heating systems to geothermal heat pumps would lead to a strong interaction between the different boreholes and result in a significant long-term cooling of the ground. The regeneration with active cooling of the buildings can reduce this effect. In less densely populated areas with modern buildings, this effect is sufficient to avoid critical long-term cooling. On the other hand, active cooling of existing building stock with low renovation potential is not providing enough waste heat for ground regeneration. In such districts, a complete switch of all heating systems to ground-source heat pumps would lead to a significant long-term cooling of the ground and require additional measures for regeneration.

Sommaire

Le rafraichissement actif de bâtiments modernes neufs pourra permettre de régénérer substantiellement les sondes géothermiques. En ce qui concerne les bâtiments existants, un haut degré de régénération ne peut être atteint en dépit des besoins croissants en rafraîchissement.

En été, pour les régions étudiées, le potentiel photovoltaïque (inexploité) est, selon un bilan journalier, considérablement plus élevé que la quantité d'électricité requise pour la régénération des sondes géothermiques. Dans les quartiers considérés, en fonction du scénario, 60 à 80 % des besoins électriques peuvent être directement couverts par de l'électricité photovoltaïque sans que des mesures complémentaires pour l'augmentation de l'autoconsommation ne soient nécessaires.

L'étude de quartiers-type montre qu'un remplacement de tous les générateurs de chaleur par des pompes à chaleur à sonde géothermique engendre de fortes interactions entre les sondes géothermiques et à long terme entrainera un fort refroidissement du sous-sol. La régénération utilisant un rafraichissement actif peut contrer cet effet. Le refroidissement à long terme du sous-sol peut être évité dans les quartiers faiblement peuplés disposant de bâtiments efficaces énergétiquement. En dépit de la régénération basé sur le rafraîchissement actif, pour les quartiers fortement peuplés disposant d'un potentiel de rénovation, un refroidissement préoccupant du sous-sol à long terme demeure. Dans ce cas, des mesures de régénération complémentaires sont nécessaires en vue du remplacement de tous les générateurs de chaleur par des pompes à chaleur à sonde géothermique.

Take-home messages

- Der Kühlbedarf in Wohnbauten wird mit dem Klimawandel stark zunehmen, er hängt aber von Gebäudestandard und vor allem auch von der Umsetzung passiver Wärmeschutzmassnahmen wie der Verschattung und der Nachtauskühlung ab.
- Der Strombedarf für die Gebäudekühlung über reversible Erdsonden-Wärmepumpen kann bereits ohne zusätzliche Massnahmen hauptsächlich mit lokal produziertem PV Strom gedeckt werden.
- Ein vollständiger Umstieg auf EWS-Wärmepumpen würde in vier untersuchten Quartieren zu einer starken gegenseitigen Beeinflussung der Sonden und somit zu einer Langzeitauskühlung führen. In weniger dicht bebauten Quartieren mit modernem Gebäudebestand kann die Regeneration durch aktive Gebäudekühlung der Erdsondenauskühlung stark entgegenwirken. In dicht bebauten Quartieren mit wenig Sanierungspotenzial reicht die Kühl-Abwärme jedoch nicht aus, um eine starke Langzeitauskühlung zu verhindern.
- Besteht keine oder eine geringe nachbarschaftliche Auskühlung, so ist die passive Kühlung in Kombination mit passiven Wärmeschutzmassnahmen und längeren Erdsonden die günstigere Variante als aktive Kühlung. Erst bei sehr starker nachbarschaftlicher Auskühlung (bei Quartierflächen bezogenen Entzugsdichten zwischen 40 und 60 kWh/m^2) kann die aktive Kühlung günstiger sein.

Executive summary

Motivation und Fragestellung

Durch Klimawandel und moderne Bauweise wird der Kältebedarf von Wohngebäuden voraussichtlich stark zunehmen. Weil auch von einem starken Ausbau der Photovoltaik (PV) gerechnet werden kann, wird dieser Kühlbedarf wahrscheinlich zu einem hohen Anteil mit Solarstrom erzeugt werden können. Auf der anderen Seite wird der Ersatz von fossilen Wärmeerzeugern zu einer starken Zunahme von Erdwärmesonden-Wärmepumpen führen, welche dem Untergrund immer mehr Energie entziehen und diesen somit langsam auskühlen. Nach der neuen Version der SIA 364/6 (2021) muss die Auskühlung durch Nachbarsonden bei der Auslegung von EWS-Anlagen berücksichtigt werden. Daher wird in dicht besiedelten Gebieten vermehrt eine Regeneration von Sonden gefordert werden, um der langsamen Auskühlung des Untergrundes entgegenzuwirken.

Im Projekt Cool2Regen (BFE Programm Gebäude und Städte) wurde untersucht, inwiefern ein Umstieg auf eine aktive Kühlung mit reversiblen Wärmepumpen zum Erreichen von hohen Regenerationsgraden eingesetzt werden kann. Dabei wurde auch eine Erhöhung des Kühlbedarfs und somit Regenerationsgrades durch den Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen in Betracht gezogen. Ebenfalls wurde untersucht, inwiefern der wachsende Kühlbedarf mit lokalem Solarstrom gedeckt werden kann.

Gebäudesimulationen

Detaillierte Gebäudemodelle aus anderen Projekten wurden in der Software IDA-ICE simuliert und mit unterschiedlichen passiven Massnahmen zum Wärmeschutz, unterschiedlichen Verteilsystemen und unterschiedlichen Klimadaten kombiniert. In Abbildung 1 wird der Wärme- und Kühlbedarf für unterschiedliche Varianten dargestellt. Die Simulationen haben gezeigt, dass bei einem vollständigen Einsatz der passiven Wärmeschutzmassnahmen auch im Jahr 2050 bei keinem Gebäudetyp ein hoher Kühlbedarf erwartet wird. Wenn aber auf passive Wärmeschutzmassnahmen wie die Verschattung oder die Nachauskühlung durch Fensterlüftung verzichtet wird, kann bei modernen Gebäuden mit hohem Dämmstandard, der Kühlbedarf den Heizwärmebedarf deutlich übersteigen. Bei Bestandesgebäuden mit schlechterem Dämmstandard und geringerem Fensteranteil übersteigt der Heizwärmebedarf den Kühlbedarf in allen Fällen um ein Vielfaches. Detaillierte Simulationen der Gebäudetechnik (Erdwärmesonde, Wärmepumpe/Kältemaschine) haben gezeigt, dass bei den beiden modernen Gebäuden die aktive Kühlung ausreichen kann, um eine vollständige Regeneration der Sonden zu erreichen. Dies auch dann, wenn der Heizwärmebedarf mit einem Warmwasserbedarf von 15-20 kWh/m^2_{EBF} (je nach Personenbelegung der Gebäude) ergänzt wurde.

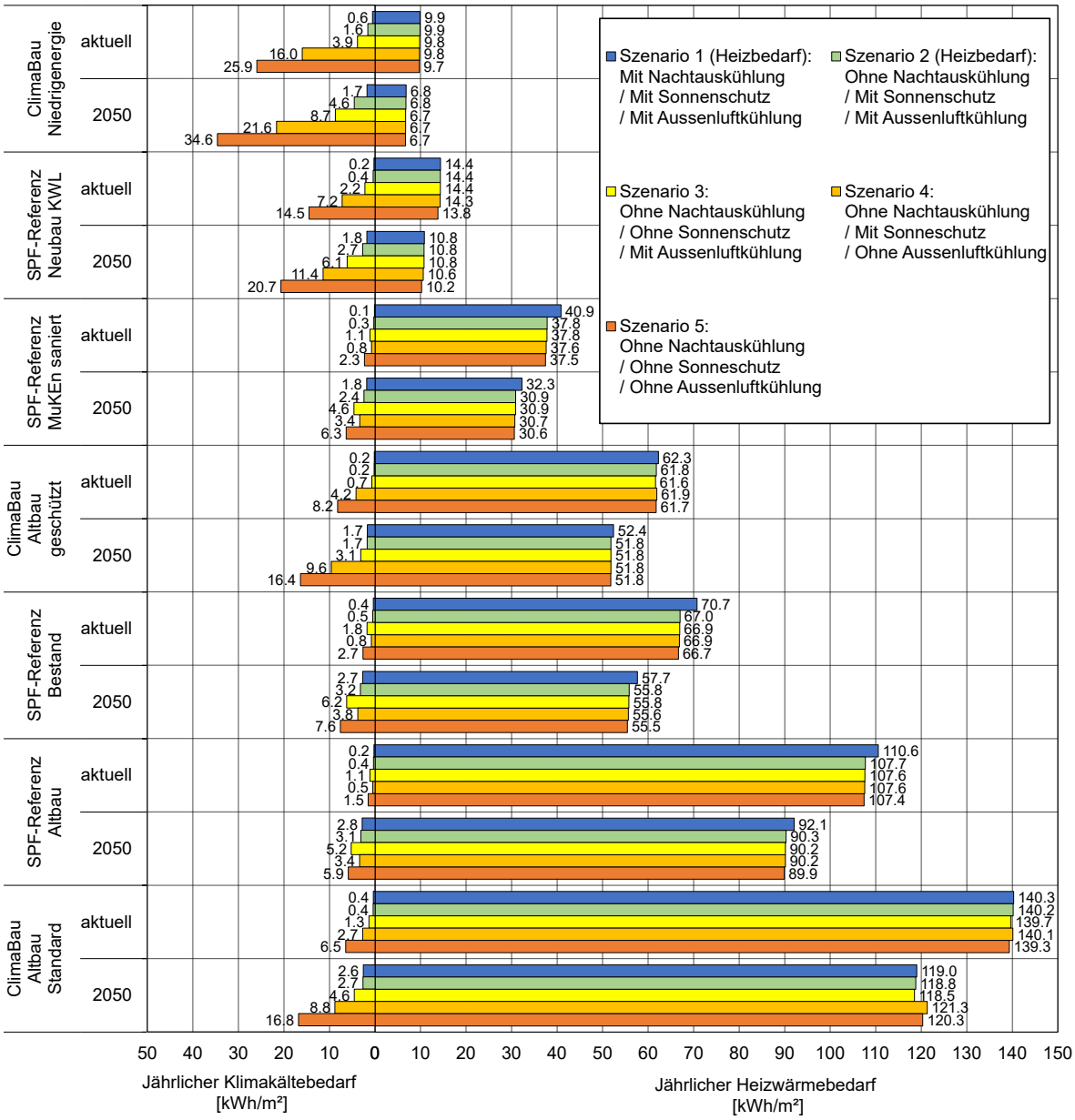


Abbildung 1: Heiz- und Kühlbedarf unterschiedlicher Gebäude für unterschiedliche Szenarien des passiven Wärmeschutzes, simuliert mit aktuellen Klimadaten und Vorhersagen für 2050.

Quartieranalysen

Drei Quartiere aus Zürich und ein Quartier aus Rapperswil-Jona wurden als Beispiele analysiert, wobei der reale Gebäudebestand durch unterschiedliche Verteilungen der oben dargestellten und dann skalierten Gebäude angenähert wurde. Dabei standen auch Prognosen für den Gebäudebestand im Jahr 2050 zur Verfügung. Anhand dieser Quartiere wurde analysiert, inwiefern ein hypothetischer, forcierter Kühlbedarf über Erdsonden-Wärmepumpen mit lokal im Quartier produziertem PV Strom gedeckt werden könnte. Es hat sich gezeigt, dass in allen Quartieren das PV Potenzial viel grösser als der Elektrizitätsbedarf zum Erzeugen der Kühlenergie ist. Durch die sehr gute zeitliche Korrelation von Kältebedarf und Sonneneinstrahlung wurden ohne zusätzliche Optimierungsmassnahmen direkte Deckungsgrade von ca. 70-80% erreicht.

Basierend auf den vier Beispielquartieren wurde ebenfalls untersucht, wie hoch die nachbarschaftliche Auskühlung ausfallen würde, wenn alle Gebäude auf eine Wärmeversorgung mit EWS-Wärmepumpen umstellen würden und inwiefern diese Auskühlung durch Regeneration mit einer forcierten aktiven Kühlung verhindert werden könnte. Die nachbarschaftliche Auskühlung (zusätzlich zur Selbstauskühlung durch den Betrieb der Sonden) wurde mit einem semianalytischen Sondenmodell für jedes Gebäude im Quartier berechnet. Die Verteilung dieser nachbarschaftlichen Auskühlung nach 50 Jahren Betrieb wird in Abbildung 2 für die Quartiere Hottingen und Käferholz als Box-plots dargestellt. Im Quartier Hottingen mit einem dichten Bestand an älteren Gebäuden läge die nachbarschaftliche Auskühlung ohne Regenerationsmassnahmen durchschnittlich bei über 15 K und könnte auch durch eine aktive Regeneration ohne passive Wärmeschutzmassnahmen (Szenario 5) nicht massgeblich verringert werden. Diese sehr hohen, theoretischen Werte zeigen, dass in diesem Quartier ein vollständiger Umstieg auf Erdwärme-Wärmepumpen nicht ohne zusätzliche Regenerationsmassnahmen möglich ist. Im weniger dichten, moderneren Quartier Käferholz beträgt die durchschnittliche nachbarschaftliche Auskühlung ohne Regeneration knapp weniger als 5 K (ab 5 K Auskühlung wird in der SIA 384/6 eine Regeneration gefordert). Durch forcierte aktive Kühlung liesse sich die durchschnittliche, nachbarschaftliche Auskühlung auf nur noch etwas mehr als 1 K reduzieren.

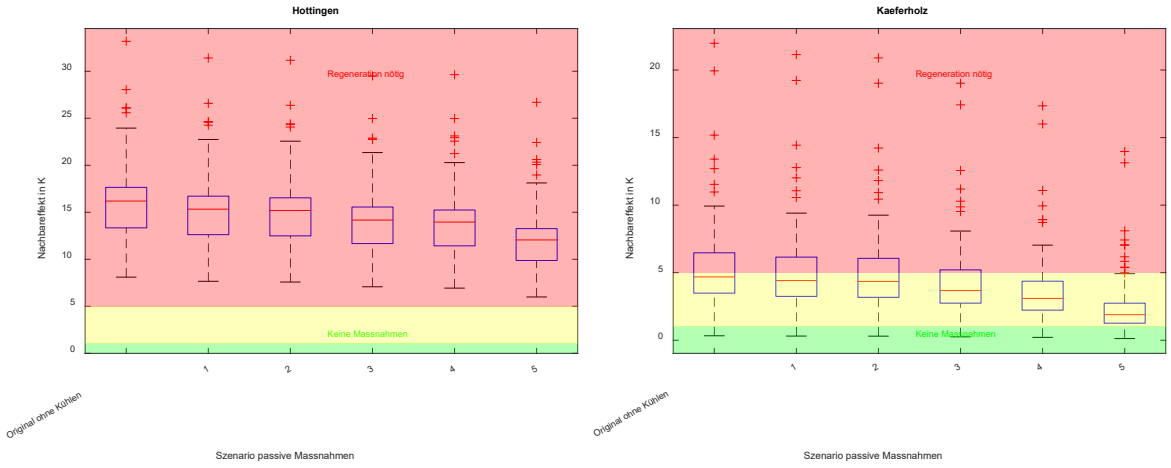


Abbildung 2: Nachbarschaftliche Auskühlung nach 50 Jahren für zwei Quartiere unter der Annahme, dass alle Gebäude auf EWS umsteigen. Ohne Regeneration und mit Regeneration durch aktives Kühlen mit unterschiedlichen Szenarien (1-5, Bezeichnung siehe Abbildung 1) zum passiven Wärmeschutz.

Das semianalytische Sondenmodell wurde ebenfalls verwendet, um die geneseitige Beeinflussung von regelmässig verteilten Sonden zu berechnen und generelle Aussagen daraus abzuleiten. Es konnte gezeigt werden, dass die in der SIA 384/6 verwendete Berechnung mit weniger als 50 Sonden à 200 m den nachbarschaftlichen Einfluss eher unterschätzt, vor allem dann, wenn Bohrtiefenbeschränkungen bestehen. Wenn zum Beispiel lediglich 100 m tief gebohrt werden kann, führt bereits die Hälfte des in der SIA 382/6 angegebenen, flächenspezifischen Entzugs zu einer kritischen Auskühlung von 5 K.

Schlussfolgerungen

1. Bei Gebäuden mit Neubaucharakter können durch eine forcierte, aktive Kühlung sehr hohe Regenerationsgrade erreicht werden, bei Bestandesgebäuden hingegen nicht.

2. Passive Massnahmen wie Fensterlüftung, Nachtauskühlung und Verschattung haben einen grossen Einfluss auf das Regenerationspotenzial durch aktive Kühlung.
3. Ein grossflächiger Umstieg auf EWS-Wärmepumpen in realen, bestehenden Quartieren würde zu einer sehr starken nachbarschaftlichen Auskühlung führen und ist nicht ohne Regenerationsmassnahmen umsetzbar.
4. Bei Quartieren, welche durch Bestandsbauten mit wenig Sanierungspotenzial dominiert werden, reicht eine Regeneration durch aktives Kühlen nicht, um das Problem der nachbarschaftlichen Auskühlung zu verhindern. Bei weniger dichten, modernen Quartieren könnte eine Regeneration mit aktiver Kühlung die Langzeitauskühlung des Untergrundes stark vermindern.
5. Der Bedarf an elektrischer Energie für eine grossflächig umgesetzte aktive Kühlung könnte zu einem sehr hohen Anteil durch lokal erzeugten PV Strom zeitgleich gedeckt werden.
6. Die SIA 384/6 unterschätzt die nachbarschaftliche Beeinflussung tendenziell, dies vor allem in Gebieten mit einer Bohrtiefenbeschränkung.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **3**
Summary **3**
Sommaire **4**
Take-home messages **5**
Executive summary **6**
1 Einleitung **12**
1.1 Ausgangslage und Motivation des Projektes 12
1.2 Projektziele 13
2 Methode **14**
2.1 Methodik Heiz- und Kühlbedarf 15
2.2 Methodik Wärmeerzeugung 18
2.3 Methodik Quartieranalysen 21
2.4 Methodik nachbarschaftliche Beeinflussung 29
2.5 Methodik Wirtschaftlichkeit und Kosten 33
3 Grundlagen **35**
3.1 Quartiere und Datensätze 35
3.2 Kennwerte der Quartiere 36
3.3 Klimadaten 37
3.4 Kostengrundlagen 38
4 Ergebnisse **44**
4.1 Ergebnisse Heiz- und Kühlbedarf 44
4.2 Ergebnisse Wärmeerzeugung 51
4.3 Ergebnisse Quartieranalysen 57
4.4 Ergebnisse nachbarschaftliche Beeinflussung 60
4.5 Ergebnisse Wirtschaftlichkeit und Kosten 72
5 Bewertung der Ergebnisse **78**
5.1 Diskussion Heiz- und Kühlbedarf 78
5.2 Diskussion Wärmeerzeugung 79
5.3 Diskussion Quartieranalysen 80
5.4 Diskussion gegenseitige Beeinflussung 81
5.5 Diskussion Wirtschaftlichkeit und Kosten 82
5.6 Abgrenzung und nicht betrachtete Aspekte 86
6 Schlussfolgerungen **88**
6.1 Heiz- und Kühlbedarf 88
6.2 Wärmeerzeugung 88

6.3 Quartieranalyse 89
6.4 Nachbarschaftliche Beeinflussung 89
6.5 Wirtschaftlichkeit und Kosten 89
7 Ausblick 91
7.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen 91
7.2 Verzicht auf Wärmeschutzmassnahmen und Nutzerakzeptanz 91
8 Danksagung 92
9 Publikationen 92
10 Literaturverzeichnis 93
Annex A Methodik Heiz- und Kühlbedarf 95
Annex B Quartiere 101
Annex C Detaillierte Resultate Regenerationsgrad Erdsonde 105
Annex D Referenzgebäude, Parameter technische Ausrüstung 106
Annex E Erweiterung semianalytisches Sondenmodell 107
Annex F Vor- und Nachteile unterschiedlicher hydraulischer Einbindungsvarianten zur Gebäudekühlung 110

Abkürzungsverzeichnis

JAZ	Jahresarbeitszahl
COP	Coefficient of performace
MFH	Mehrfamilienhaus
EFH	Einfamilienhaus
MuKEn	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
BWW	Brauchwarmwasser
WP	Wärmepumpe
EWS	Erdwärmesonde
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
EGID	Eidgenössischer Gebäude Identifikator
EER	Energy-efficiency ratio
EKZ	Energiekennzahl
RJ	Rapperswil Jona
DRY	Design reference year
RCP	Representive concentration path
EBF	Energiebezugsfläche
KWL	Komfortwohnungslüftung

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation des Projektes

In der Schweiz sind Gebäude für über 40 % des Endenergieverbrauchs und rund ein Drittel der CO_2-Emissionen verantwortlich. Wärmepumpen mit Erdwärmesonden (EWS) gehören zu den effizientesten erneuerbaren Wärmeerzeugungsanlagen und spielen daher eine entscheidende Rolle zur Senkung der CO_2-Emissionen des zukünftigen Gebäudeparks. So rechnet die Stadt Zürich beispielsweise für eine 2000 W kompatible Energieversorgung mit fast 10 % des heutigen und mehr als 20 % des zukünftigen Wärmebedarfs für Gebäude aus geothermischen Wärmepumpen[1]. Auf den Wärmebedarf des gesamten Schweizer Gebäudeparks hochgerechnet könnte man also mit einer forcierten Nutzung von geothermischen Wärmepumpen fossile Brennstoffe in der Grössenordnung von 25'000 TJ und CO_2-Emissionen von ca. 1.2 Mio. t einsparen.

Für Quartiere, in denen die Erdwärmenutzung erlaubt ist, bedeutet dies allerdings Entzugsdichten von ca. 20-100 kWh/m^2. Die neue SIA 384/6 (2021)[2] fordert jedoch bereits ab einer grundstücksflächenbezogenen Entzugsdichte von 8 kWh/m^2, dass EWS entweder regeneriert oder länger ausgelegt werden müssen. Ab einer Entzugsdichte von 33 kWh/m^2 ist eine Regeneration vorgeschrieben. Damit die untiefe Geothermie (Wärmepumpen mit EWS) einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten kann, müssen EWS im städtischen Umfeld entsprechend grossflächig regeneriert werden. Das Erreichen von hohen Regenerationsgraden ist dabei aber mit relevanten Zusatzkosten verbunden. Durch die Klimaerwärmung, Wärmeinseln in urbanen Gebieten und die moderne Bauweise der Gebäude wird der Kühlbedarf gegenüber dem Wärmebedarf immer wichtiger. Erdwärmesonden können mittels Geocooling (auch Freecooling / passive Kühlung) mit geringen Zusatzkosten zur Gebäudekühlung eingesetzt werden, dabei werden aber nur beschränkte Kälteleistungen und tiefe Regenerationsgrade erreicht[3]. Mit aktiver Kühlung mittels Kältemaschine oder reversibler Wärmepumpe und ggf. zusätzlicher Entfeuchtung der Zuluft können höhere Kälteleistungen und Regenerationsgrade erreicht werden[4]. Jedoch ist die aktive Kühlung von Wohngebäuden - Stand 2022 - nicht vorgesehen, und die SIA 180[5] verlangt, dass der Komfort mit passiven Massnahmen erfüllt werden können muss. Daher fokussieren bestehende Studien meist auf andere Regenerationsmethoden wie Geocooling, Solarwärme oder Aussenluft-Wärmetauscher. Der Ausbau der Photovoltaik im Zuge der Energiewende wird zu einer vermehrten Verfügbarkeit und voraussichtlich zu einem Überschuss von günstigem, lokal verfügbarem erneuerbarem Strom an heissen Sommertagen führen. Der Einsatz von PV-Strom zur Kühlung von Wohngebäuden und gleichzeitig zur Regeneration von EWS kann daher sinnvoll sein.

Der Einsatz einer Wärmepumpe als Kältemaschine ist mit geringen Zusatzkosten möglich und kann einen erhöhten Komfort bieten. Aktive Kühlung von Gebäuden erzeugt Abwärme, welche im Sommer nur teilweise genutzt werden kann. Eine Abgabe an die Aussenluft verstärkt dabei den Wärmeinseleffekt im dicht bebauten Raum und erhöht dadurch den Energiebedarf zur Gebäudekühlung zusätzlich. Durch die Regeneration von EWS kann diese Abwärme sinnvoll eingesetzt und dem Mikroklima der Stadt sogar Wärme entzogen werden. Wenn dadurch hohe Regenerationsgrade erreicht werden, können EWS im Vergleich zu nicht regenerierten Sonden kürzer ausgelegt und somit Kosten für die Erstellung der Sonde eingespart werden.

Diese Einsparungen sind bei Einzelanlagen gering, werden aber bei Sondenfeldern oder einer dichten Erdwärmenutzung im städtischen Gebiet relevant.

1.2 Projektziele

In dieser Studie wird aufgezeigt, inwiefern sich hohe Regenerationsgrade auf die Langzeittemperaturentwicklung des Untergrundes von realen Quartieren und Städten auswirkt. Dies wird am Beispiel von realen Quartieren der Stadt Zürich und einem Quartier in Rapperswil-Jona analysiert. Diese Quartiere weisen eine Vielzahl von Objekten mit unterschiedlichem Wärme- und Kältebedarf auf. Dabei wird aufgezeigt, wie sich von Objekt zu Objekt unterschiedliche, aber im Durchschnitt hohe, Regenerationsgrade auf die Langzeit-Temperaturentwicklung der Sonden auswirken.

Ziel des Projektes ist die Beantwortung folgender Forschungsfragen:

- Unter welchen Bedingungen kann eine aktive Kälteerzeugung bei Systemen mit Wärmepumpe und EWS in Wohngebäuden energetisch und ökonomisch vorteilhaft sein?
- Ist eine aktive Kühlung von (bestehenden) Wohngebäuden mit Erdsonden-Wärmepumpen zum Erreichen von hohen Sondenregenerationsgraden technisch machbar und energetisch und ökonomisch sinnvoll?
- Was ist der zukünftige Kältebedarf für verschiedene Gebäudetypen und welchen Einfluss hat ein Verzicht auf Massnahmen zum passiven Wärmeschutz?
- In welchem Masse wird in der Zukunft günstiger, lokaler PV-Strom für die Gebäudekühlung zur Verfügung stehen?
- Wie beeinflussen sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Erdwärmesonden gegenseitig?
- Welchen Einfluss haben unterschiedliche Regenerationsgrade auf den Elektrizitätsbedarf von Wärmepumpen unter Berücksichtigung der nachbarschaftlichen Beeinflussung?
- Wie hoch sind die Kosten im Vergleich zu anderen Regenerationsmethoden oder nicht regenerierten Sonden?

2 Methode

In einem ersten Schritt wurden typische Gebäude (Referenzgebäude) definiert und der Kältebedarf inkl. Kälteverteilung simuliert. Parallel dazu wurden für - in Rücksprache mit der Begleitgruppe - definierte Quartiere PV-Flächen und (elektrische) Erträge aus diesen Quartieren erhoben. Die Gegenüberstellung von Stromproduktion und Stromverbrauch zur Gebäudekühlung erlaubt eine quantitative Aussage ob lokal genügend PV Strom produziert werden kann. Basierend auf den Ergebnissen wurden verschiedene Szenarien bezüglich Bereitstellung der Wärme- Kälteenergie durch Erdwärmesonden erhoben und deren Einfluss auf eine gegenseitige Beeinflussung der Erdwärmesonden aufgezeigt. Abschliessend wurden Kosten für verschiedene technische Möglichkeiten zur Regeneration der Erdwärmesonden erhoben und einander gegenübergestellt. In den folgenden Abschnitten wird die Methodik der einzelnen Schritte genauer erläutert.

Eine vereinfachte Übersicht der angewandten Tools kann der nachfolgenden Abbildung 1 entnommen werden. Die definierten Untersuchungsgebiete legen zusammen mit den von den Projektpartnern abgegebenen kantonalen und nationalen Gebäudedatenbanken den Grundstein der Arbeit.

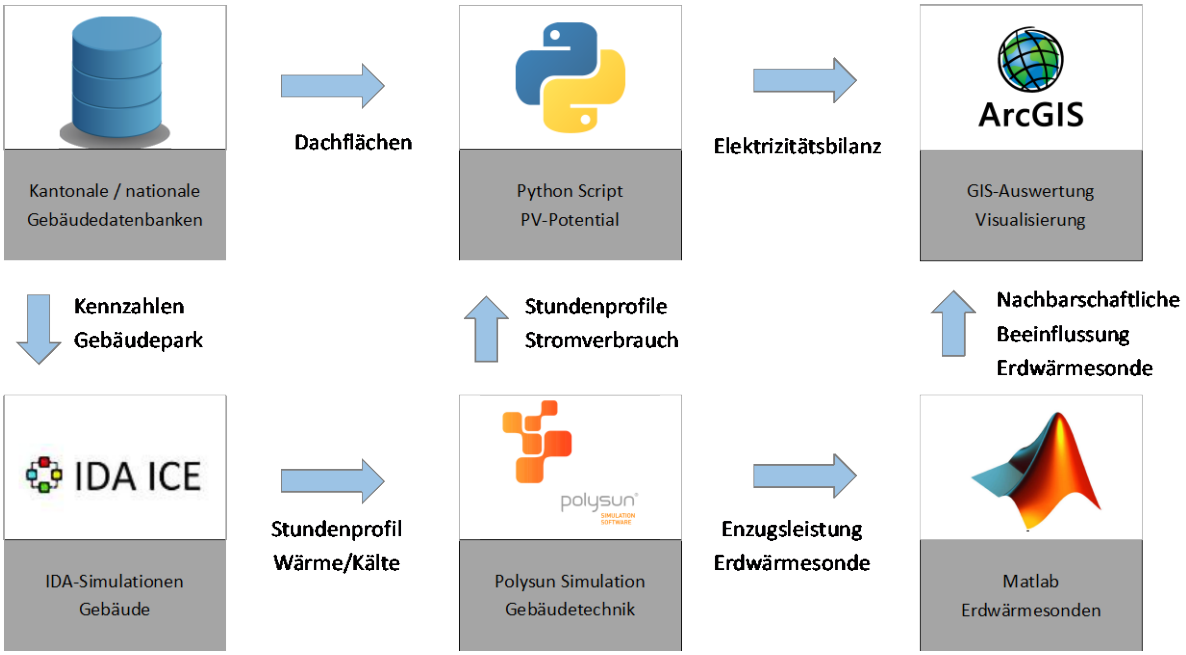


Abbildung 1: Übersicht Methodik und verwendete Hilfstools.

Die Gebäudedaten aus der nationalen Datenbank werden verwendet, um über eine repräsentative Auswahl an IDA-ICE Gebäudesimulationen den Gebäudepark für die untersuchten Gebiete individuell abzubilden. Über eine Polysun Simulation werden Kennwerte für den Stromverbrauch (Stundenprofile) sowie zur notwendigen Entzugsleistung über das Erdreich erhoben. Diese Daten wiederum werden abgeglichen mit einer Python basierten Auswertung des PV-Potentials der Dachflächen und resultieren in einer Bedarfs-

Verbrauchsbilanz auf Stufe Elektrizität. Parallel wird über eine MATLAB-Simulation die Auskühlung des Erdreiches über 50 Jahre bestimmt und ausgewiesen.

2.1 Methodik Heiz- und Kühlbedarf

Der Heiz- und Kühlbedarf der betrachteten Quartiere wurde mit der Software IDA-ICE simuliert. Um die unterschiedlichen Gebäudetypen in den Quartieren abzubilden, wurden sieben Referenzgebäude ausgewählt, welche anhand ihrer Energiekennzahlen (Heizenergie pro m^2 und Jahr) den Gebäuden im Quartier zugeordnet werden können und anschliessend für unterschiedliche passive Wärmeschutzmassnahmen, unterschiedliche Heiz-/Kühlsysteme sowie unterschiedliche Klimaszenarien simuliert werden.

Die Referenzgebäude für die Simulationen basieren auf den Forschungsprojekten ClimaBau[6] und ImmoGap[7] nämlich, beginnend mit dem Gebäude mit dem tiefsten Heizwärmebedarf:

- **ClimaBau Niedrigenergie** (jährlicher Heizwärmebedarf 10 kWh/m²)
- **SPF-Referenz Neubau KWL** (jährlicher Heizwärmebedarf 14 kWh/m²)
- **SPF-Referenz MuKEn saniert** (jährlicher Heizwärmebedarf 38 kWh/m²)
- **ClimaBau Altbau geschützt** (jährlicher Heizwärmebedarf 62 kWh/m²)
- **SPF-Referenz Bestand** (jährlicher Heizwärmebedarf 67 kWh/m²)
- **SPF-Referenz Altbau** (jährlicher Heizwärmebedarf 108 kWh/m²)
- **ClimaBau Altbau Standard** (jährlicher Heizwärmebedarf 140 kWh/m²)

Die wesentlichen Aspekte der unterschiedlichen Simulationsgebäude sind in Tabelle 20 im Anhang A.1 zusammengefasst.

Die Referenzgebäude werden mit zwei Klimadatensätzen aus synthetischen Designreferenzjahren aus Meteonorm 8 für den Standort Zürich simuliert[8]: «Meteonorm Aktuell» (weiter als ***«aktuell»*** bezeichnet) und «Meteonorm 2050 RCP4.5» (weiter als ***«2050»*** bezeichnet). Im Kapitel 3.3 sind die ausführlichen Eingaben zu Klimadatensätzen beschrieben.

Gemäss der BFE-Studie «ResCool»[9] haben die Heiz- und Kühlabgabesysteme einen wesentlichen Einfluss auf die räumliche Behaglichkeit in Neu- und Altwohnbauten im Sommerhalbjahr. Gemäss deren Ergebnissen (siehe Abbildungen 11 bis 13 im Schlussbericht[9]) weist der Einsatz der Kühldecke die kleinste Zahl an Überhitzungsstunden (bis 20 h pro Jahr) für zukünftige Wetterdaten am Standort Basel-Binningen auf. Der Einsatz einer Fussbodenkühlung allein ist mit einer deutlich höheren Zahl an Überhitzungsstunden verbunden (zwischen 50 bis 150 h pro Jahr). Die Wirksamkeit von Radiatoren als Kühlelemente im Vergleich zur Fussbodenkühlung ist noch tiefer (noch grössere Anzahl an Überhitzungsstunden).

Für die räumliche Behaglichkeit ist aber nicht ausschliesslich die empfundene Raumtemperatur sondern auch die Raumluftfeuchte wichtig. Gemäss SIA 382/1:2014[10] soll die relative Raumluftfeuchte in Wohnbauten unterhalb 60 % bleiben. Diese Voraussetzung kann jedoch ohne aktive Entfeuchtung nicht immer eingehalten werden. Kriesi et al.[4] schlagen eine Systemeinbindung der Zuluftkühlung vor der WRG des Lüftungsgerätes vor, um einen höheren Regenerationsgrad und zusätzlich eine Entfeuchtung zu erreichen. Diese Einbindung

entspricht nicht dem Standard und es fehlen Erfahrungswerte, dennoch wurde die Einbindungsvariante «Bodenkühlung mit Aussenluftvorkühlung und -entfeuchtung» als Zusatzvariante simuliert und analysiert. Die Wärmeverluste des Verteilsystems im Gebäude wurden bei allen Varianten vernachlässigt.

In diesem Zusammenhang wurden folgende Systeme für die Untersuchung ausgewählt:

- ***Ideales Heiz- und Kühlsystem***
- ***Heiz- und Kühldeckensegel***
- ***Bodenkühlung*** kombiniert ***mit milder Zuluftkühlung***, um die jährliche Anzahl der Überhitzungsstunden zu minimieren
- ***Bodenkühlung*** kombiniert ***mit Aussenluftvorkühlung und -entfeuchtung***, um die akzeptable Raumluftfeuchte zu gewährleisten

Weitere Details zu Heiz- und Kühlabgabesystemen im Kapitel sind im Anhang A.2 dargestellt.

Unterschiedliche Kombinationen von passiven Wärmeschutzmassnahmen inklusiv Sonnenschutz, Nachtauskühlung, Aussenluftkühlung werden auch in Simulationen berücksichtigt:

- Szenario 1 ***«Voll Wärmeschutz»***: mit Nachtauskühlung, mit Sonnenschutz, mit Aussenluftkühlung
- Szenario 2 ***«Ohne Nachtauskühlung»***: ohne Nachtauskühlung, mit Sonnenschutz, mit Aussenluftkühlung
- Szenario 3 ***«Nur Aussenluftkühlung»***: ohne Nachtauskühlung, ohne Sonnenschutz, mit Aussenluftkühlung
- Szenario 4 ***«Nur Sonnenschutz»***: ohne Nachtauskühlung, mit Sonnenschutz, ohne Aussenluftkühlung
- Szenario 5 ***«Kein Wärmschutz»***: ohne Nachtauskühlung, ohne Sonnenschutz, ohne Aussenluftkühlung

Umfassender Beschrieb der angewendeten Nachtauskühlung, Sonnenschutz, Aussenluftkühlung befindet sich im Anhang A.3.

Als interne Lasten werden die ***Standardwerte*** nach SIA Merkblatt 2024[11] für ein Mehrfamilienhaus verwendet. Ausserdem wird die Sensitivität des Heizwärmebedarfs und Klimakältebedarfs bestimmt. Hierfür wurde das Referenzgebäude «SPF-Referenz Neubau KWL» mit ***Ziel-*** und ***Bestandwerten*** von SIA Merkblatt 2024[11] simuliert. Generell gilt, dass die «***Zielwerte***» aus SIA2024:2015[11] von effizienteren elektrischen Geräten und effizienterer Beleuchtung ausgehen als die «***Standard***-» und «***Bestandswerte***», also weniger internen Laste produzieren. Im Fall «***Bestandwerte***» Die zusammengefassten Eingaben sind in der Tabelle 21 im Anhang A.4.

Die Zusammenfassung der betrachteten Referenzgebäude, Wärmschutzmassnahmen, Heiz-/Kühlsysteme und interne Lasten sind in der Tabelle 1 dargestellt. Fürs Referenzgebäude «SPF-Referenz Neubau KWL» wurden zusätzliche Simulationen ausgeführt. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der betrachteten Referenzgebäude (***Dunkelrot***), passiven Wärmeschutzmassnahmen (***Grün***), Heiz-/Kühlsysteme (***Blau***) und internen Lasten (***Violet***). Die simulierten Klimadaten sind ***mit dunkler fetter Farbe*** dargestellt.

		Passive Wärmeschutzmassnahmen				
		Szenario 1 «Voll Wärme-schutz»	**Szenario 2 «Ohne Nachtaus-kühlung»**	**Szenario 3 «Nur Aussenluft-kühlung»**	**Szenario 4 «Nur Sonnen-schutz»**	**Szenario 5 «Kein Wärme-schutz»**
Referenzgebäude	ClimaBau Niedrigenergie	***Szenarien «aktuell»:*** Ideales Heiz- und Kühlsystem / SIA Standardwerte ***Szenarien «2050»:*** Ideales Heiz- und Kühlsystem / SIA Standardwerte				
	SPF-Referenz Neubau KWL					
	SPF-Referenz MuKEn saniert					
	ClimaBau Altbau geschützt					
	SPF-Referenz Bestand					
	SPF-Referenz Altbau					
	ClimaBau Altbau Standard					

Tabelle 2: Zusätzliche Simulationsszenarien fürs Referenzgebäude «SPF-Referenz Neubau KWL»: passiven Wärmeschutzmassnahmen (***Grün***), Heiz-/Kühlsysteme (***Blau***) und internen Lasten (***Violet***).

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="3">Passive Wärmeschutzmassnahmen</td></tr>
<tr><td>Szenario 2 «Ohne Nachtauskühlung»</td><td>Szenario 4 «Nur Sonnenschutz»</td><td>Szenario 5 «Kein Wärmschutz»</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Heiz- und Kühlsysteme</td><td>Ideales Heiz- und Kühlsystem</td><td rowspan="2">Szenarien «aktuell» und «2050»:
SIA Standardwerte</td><td colspan="2" rowspan="2">Szenario «2050»:
SIA Standardwerte</td></tr>
<tr><td>Heiz- und Kühldecken-segel</td></tr>
<tr><td>Bodenkühlung mit milder Zuluftkühlung</td><td colspan="3">Szenarien «aktuell» und «2050»:
• SIA Zielwerte
• SIA Standardwerte
• SIA Bestandwerte</td></tr>
<tr><td>Bodenkühlung mit Aussenluft-vorkühlung und -entfeuchtung</td><td>Szenarien «aktuell» und «2050»:
SIA Standardwerte</td><td colspan="2">Szenario «2050»:
SIA Standardwerte</td></tr>
</table>

2.2 Methodik Wärmeerzeugung

Im Nachfolgenden Kapitel wird beschrieben, wie die Heiz-Kälteanlage (Komponenten der Heizzentrale) ausgelegt wurden. Es gilt zu beachten, dass hier teilweise stark vereinfachte Annahmen getroffen wurden, um eine verhältnismässige Implementation in der Polysun-Simulation zu ermöglichen.

Das vereinfachte hydraulische Schema der Anlage ist in Abbildung 2 dargestellt. Zur Simulation der Anlage in Polysun musste das Schema angepasst werden. Grund dafür ist die Eingabe, respektive Übernahme der Wärme- und Kälteprofile als separate Profile aus IDA-ICE. Die Wärme- und Kälteerzeugung, wie auch die Wärme- und Kälteabgabe, werden in der Simulation als separate Systeme betrachtet, wobei in der Realität Heiz- und Kühlenergie über dasselbe Verteilsystem abgegeben wird. Die thermische Masse und die daraus folgenden Effekte und Verzögerungen werden bereits in der Gebäudesimulation berücksichtigt, und wurden in der Polysun Simulation daher ausgeschlossen werden.

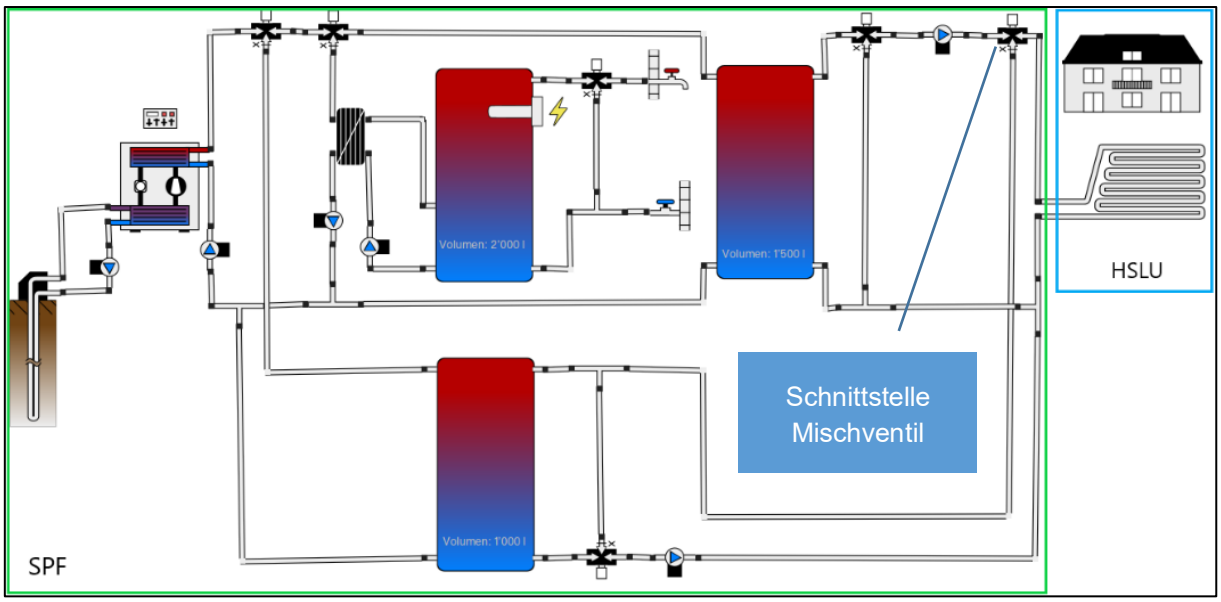


Abbildung 2: Vereinfachtes hydraulisches Schema Wärmeerzeugungs- und Kühlanlage. Eingezeichnet sind die Schnittstellen zwischen dem Simulationsteil in Polysun durch OST-SPF (grün) und der IDA-ICE Simulation durch HSLU (blau).

Die Schnittstelle zwischen den IDA-ICE Simulationen der HSLU und den Polysun Simulationen von OST-SPF befindet sich nach dem Beimischventil auf Gebäudeseite der Speicher für Heizwärme und Raumkühlung. Die Vorlauf-, Rücklauftemperaturen und der Massenstrom des Heiz-/Kühlsystems der IDA-ICE Simulationen werden mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde eingelesen und an die Gebäudetechnik übergeben. Die Gebäudetechnik muss so ausgelegt und gesteuert werden, dass die Vorgaben dieser Verbrauchsprofile eingehalten werden. Dies wird durch den Einsatz eines Heiz- und eines Kühlspeichers sichergestellt. Somit ist eine realistische Steuerung der Wärmepumpen mit Takten und Umschaltung zwischen Heizung und Warmwasserbeladung möglich. Eine Speicherladung für den Heizwärmespeicher wird begonnen, wenn die Temperatur im oberen Bereich des Speichers (oberer Temperaturfühler) unter der benötigen Soll-Vorlauftemperatur gemäss IDA-ICE Vorgabe sinkt. Die Speicherladung wird beendet, wenn die Temperatur im unteren Bereich des Speichers (unterer Temperaturfühler) +3 Kelvin über der Soll-Vorlauftemperatur liegt. Die Steuerung der Wärmepumpe im Heizbetrieb erfolgt im Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL leistungsreguliert gemäss Sollwertvorgabe aus der IDA-ICE Simulation. Im SPF-Referenz Bestand ist eine 2-Stufige Wärmepumpe verbaut.

Das effektive Schema, welches der Simulation hinterlegt ist, kann der Abbildung 3 entnommen werden. Angaben zu gewählten Komponenten, Apparaten und Armaturen können dem Annex C entnommen werden.

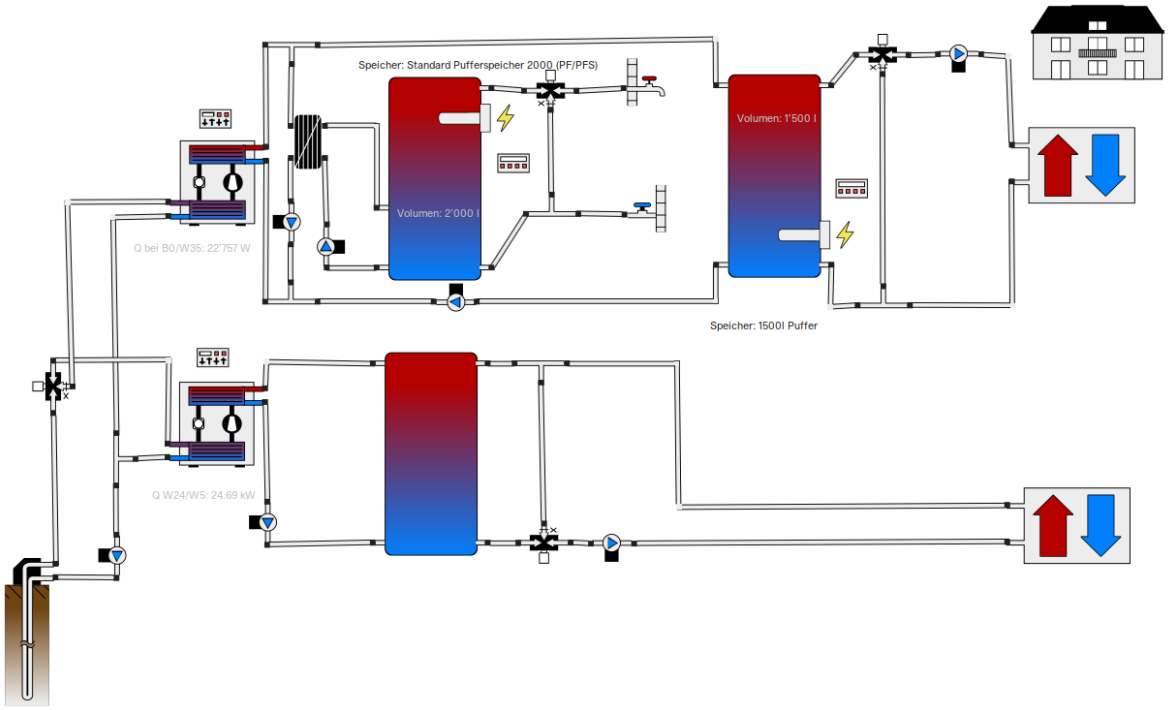


Abbildung 3: Effektives hydraulisches Schema Wärmeerzeugungs- und Kühlanlage. Wärme- und Kälteerzeugung wie auch Wärme- und Kälteabgabe werden in der Simulation als separate Lastprofile eingebunden.

Eine Speicherladung für den Kältespeicher wird begonnen, wenn die Temperatur im unteren Bereich des Speichers (unterer Fühler) über 18 °C steigt. Sinkt die Temperatur im obersten Bereich des Speichers auf unter 16 °C (oberer Fühler), so wird die Wärmepumpe ausgeschaltet. Die Steuerung der Wärmepumpe im Kühlbetrieb erfolgt über einen einstufigen Ein/Aus Betrieb. Für die Warmwasserladung gilt eine Vorrangschaltung bei Bedarf. Der Warmwasserspeicher ist auf einen Tagesbedarf ausgelegt und wir auf 60 °C geladen.

Die Beimischventile für den Heizbetrieb wie auch für den Kühlbetrieb werden dabei so geregelt, dass die von der HSLU vorgegebenen Vorlauftemperaturen soweit möglich erreicht werden. Durch die Vorrangschaltung für die Warmwasserbereitstellung kann es kurzzeitig zu Unterdeckungen kommen. In der Simulation sind keine Sperrzeiten für die Wärmepumpen vorgesehen, in der Auslegung jedoch bis 4 Stunden berücksichtigt.

In den Polysun Simulationen wurde eine Wärmepumpe mit einer internen Kreislaufumschaltung implementiert. Zur Abschätzung der Effizienzwerte des Gerätes im Kühlbetrieb wurden Kenndaten bei der CTA AG (Mitglied Begleitgruppe) eingeholt. Der nachfolgenden Abbildung 4 können die implementierten Effizienzwerte in Abhängigkeit der Quellentemperatur sowie der Speicherladetemperatur entnommen werden. Diese Werte wurden der Simulation hinterlegt. Die Leistungszahl ist hierbei auf einen Maximalwert von 7.5 (bei 50 % Last) und 8.0 (bei 30 % Last) begrenzt, welche einen Mindesthub (Temperaturdifferenz zwischen Verdampfungs- und Kondensationstemperatur) berücksichtigt.

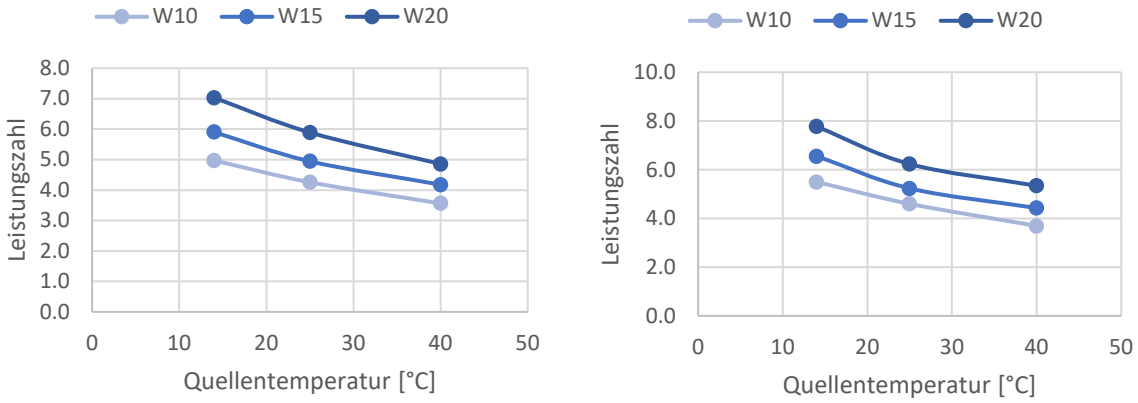


Abbildung 4: Kennfeld (EER-Wert) Kühlbetrieb Wärmepumpe in Abhängigkeit der Quellentemperatur und der Speicherladetemperatur (CTA Optiheat Inverta Economy OH I 17e) Tabelle links bei 50 % Last, Tabelle rechts bei 30 % Last.

Die resultierende Kälteleistung des gewählten Gerätes (CTA Optiheat Inverta Economy OH I 17e) kann der nachfolgenden Abbildung 5 für die Leistungsstufen von 50 % und 30 % entnommen werden. Für die Simulation des Gebäudes SPF Referenz Bestand wurden für den Kälteteil auch die Effizienz- und Leistungswerte des aufgeführten Gerätes (CTA Economy OH I 17e) verwendet. Zur Bereitstellung der Heizenergie des Gebäudes ist jedoch ein grösseres Gerät (CTA Optihead Duo 1-85e) notwendig. Die Leistugungsdaten zu diesem Gerät können den Datenblättern der Herstellerfirma[12] entnommen werden.

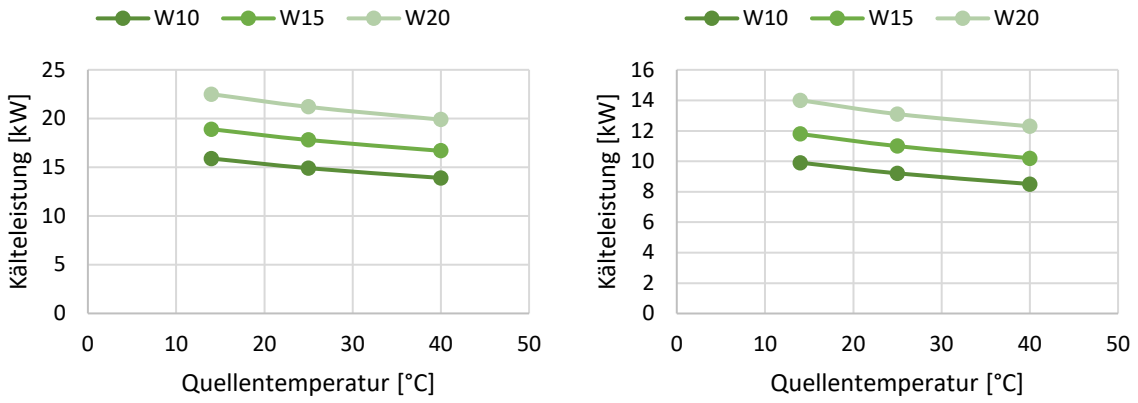


Abbildung 5: Kennfeld Kälteleistung Wärmepumpe in Abhängigkeit der Quellentemperatur und der Speicherladetemperatur (CTA Optiheat Inverta Economy OH I 17e) Tabelle links bei 50 % Last, Tabelle rechts bei 30 % Last.

2.3 Methodik Quartieranalysen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Auswertung des Kältebedarfs auf Quartierebene und der Herleitung des vorhandenen PV-Potentials in den Untersuchungsgebieten.

Der Kältebedarf wurde anhand der Energiekennzahl für die Raumheizung über eine georeferenzierte Analyse wie beschrieben erhoben. Bezüglich des PV-Potentials wurden,

basierend auf dem nationalen Datensatz des BFE[13], sämtliche Dachflächen in den Gebieten klassifiziert und geeignete Flächen für die Installation einer PV-Anlage ausgewiesen. Abhängig von der Orientierung und Neigung wurden in Polysun spezifische Produktionsprofile auf Stundenbasis generiert. Die Stundenprofile aus der Polysun-Simulation wurden abschliessend mit den Potentialflächen für eine PV-Anlage verrechnet und ergeben das PV-Produktionspotential auf Quartierebene in einer stundenbasierten Auflösung.

Das oben beschriebene Potential wurde in einem nächsten Arbeitsschritt einem elektrischen Verbrauch gegenübergestellt. Hierbei wurden die folgenden Verbraucher erhoben.

1. Verbrauch Haushaltsstrom (ohne eMobilität, Stand 2020)
2. Verbrauch Strombedarf Wärmepumpen zu Kühlzwecken (Stand heute / 2050 für verschiedene Szenarien)

Diese Verbrauchsprofile (mit und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms) wurden der PV-Produktion gegenübergestellt und sollen aufzeigen, ob der auf Quartierebene anfallende Kältebedarf durch lokal produzierten PV-Strom gedeckt werden kann.

2.3.1 Von den Referenzgebäuden zum Quartier

Um den für die Referenzgebäude simulierten Bedarf für die Raumkühlung auf das Quartier zu übertragen, wurde eine georeferenzierte Analyse durchgeführt. Basierend auf der Energiekennzahl Heizen wurden sämtliche Gebäude im Quartier dem entsprechenden Referenzgebäude zugeordnet. Die Bauklassifizierung für das «Szenario 2, aktuell» kann der Abbildung 6entnommen werden. Diese Bauklassen sind für jedes Simulationsszenario (gemäss Kapitel 3.1.4) neu zu definieren, da sich entsprechend der Massnahme die Energiekennzahl Heizen und insbesondere die Energiekennzahl Kühlen für das entsprechende Gebäude ändert.

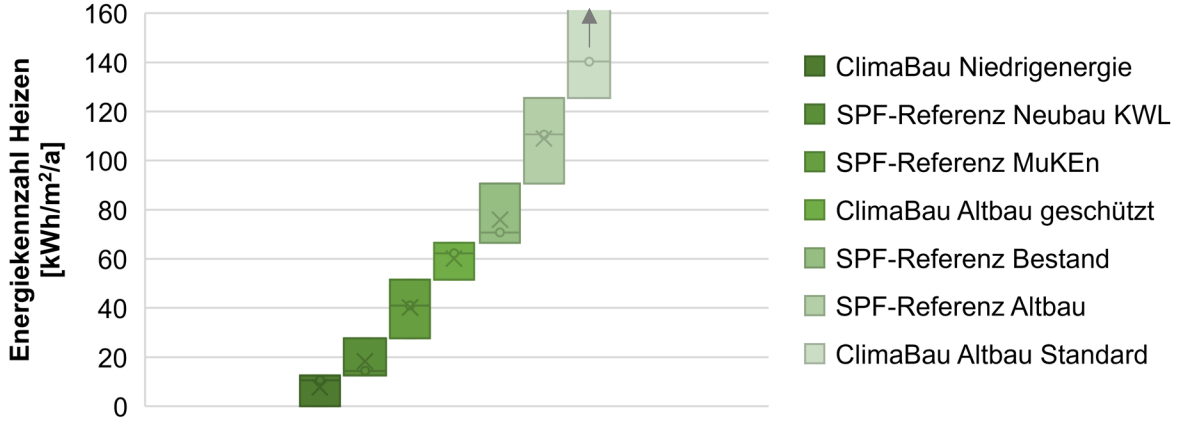


Abbildung 6: Zuordnung Gebäude auf Quartierebene anhand der Referenzgebäude am Beispiel vom «Szenario 2, aktuell».

Nach der Zuordnung sämtlicher Gebäude im Quartier zu einer der Bauklassen kann den Gebäuden in einem nächsten Schritt die entsprechende Energiekennzahl Kühlen basierend auf den IDA-ICE Simulationen zugeordnet werden. Kühl- und Heizbedarf sind von den betrachteten Simulationsszenarien abhängig. Als Beispiel wird in Tabelle 5 die Zuordnung für

das «Szenario 2, aktuell» angegeben. Abschliessend wird unter Berücksichtigung der Energiebezugsfläche der Kühl- und Heizbedarf für sämtliche Gebäude ausgerechnet und damit der Kühl- und Heizbedarf für das gesamte Quartier.

Tabelle 3: Zuordnung Kennzahl Heizen / Kühlen beispielhaft für das «Szenario 2, aktuell».

Referenzgebäude	EKZ Heizen [KWh/m^2]	Zuordnung	EKZ Kühlen [KWh/m^2]
ClimaBau Niedrigenergie	11	->	1.54
SPF-Referenz Neubau KWL	14	->	0.82
SPF-Referenz MuKEn saniert	38	->	0.26
ClimaBau Altbau geschützt	62	->	0.19
SPF-Referenz Bestand	67	->	0.52
SPF-Referenz Altbau	108	->	0.35
ClimaBau Altbau Standard	140	->	0.40

Aus den Polysun-Simulationen wird aus dem Heiz- und Kühlbedarf mithilfe einer Annahme für die mittlere Jahresarbeitszahl für Heizen und Kühlen die Entzugsenergie aus dem Erdreich, bzw. die Regenerationsenergie in das Erdreich, berechnet. Diese Energien bilden die Grundlage für die Berechnungen zur Regeneration in Kapitel 3.3.

2.3.2 Herleitung der mittleren Jahresarbeitszahl im Heiz- und Kühlbetrieb

Zur Herleitung einer fundierten Annahme für die JAZ (Jahresarbeitszahl) der Wärmepumpenanlage im Heiz- und im Kühlbetrieb wurden die definierten Gebäude wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben in einer Polysun-Simulation implementiert und ausgewertet. Die JAZ beschreibt hierbei lediglich die in der Wärmepumpe integrierten Prozesse ohne Strom für die externen Umwälzpumpen.

Um auf Quartierebene eine realistische Abschätzung der Jahresarbeitszahl vorzunehmen, wurden diese wie nachfolgend Beschrieben erhoben. In Anbetracht der allgemeinen Unsicherheiten bei der Betrachtung auf Quartierebene, wurde zur Abschätzung der JAZ ein einfacher und pragmatischer Ansatz basierend auf den vorliegenden Daten gewählt.

$$JAZ_{Heizen} = 0.2\ x\ JAZ_{NB,KWL,4.2} + 0.8\ x\ JAZ_{Best,5.2} = 4.37 \quad (1)$$

$$JAZ_{Kühlen} = 0.2\ x\ JAZ_{NB,KWL,4.2} + 0.8\ x\ JAZ_{Best,5.2} = 6.55 \quad (2)$$

Die Formel (1) beschriebt die Berechnung der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe im Heizbetrieb. Die $JAZ_{NB,KWL,4.2}$ beschreibt die gewichtete Jahresarbeitszahl vom Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL im «Szenario 4, 2050» und im zweiten Simulationsjahr. Die $\mathrm{JAZ}_{\mathrm{Best},5.2}$ beschreibt die gewichtete Jahresarbeitszahl vom Gebäude «SPF Referenz Bestand» im «Szenario 5, 2050» und im zweiten Simulationsjahr.

Die Formel (2) beschriebt die Berechnung der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe im Kühlbetrieb. Die $\mathrm{JAZ}_{\mathrm{NB,KWL},4.2}$ beschreibt die gewichtete Jahresarbeitszahl vom Gebäude SPF-

Referenz Neubau KWL im «Szenario 4, 2050» und im zweiten Simulationsjahr. Die $JAZ_{Best,5.2}$ beschreibt die gewichtete Jahresarbeitszahl vom Gebäude SPF-Referenz Bestand im «Szenario 5, 2050» und im zweiten Simulationsjahr.

Weil in realen Quartieren grossmehrheitlich Bestandesbauten anzutreffen sind, wurde der Neubau mit 20 % gewichtet und der Bestandesbau mit 80 %. Grundsätzlich hat die Szenarienwahl bezüglich der JAZ im Heizbetrieb wenig Einfluss. Bei der JAZ im Kühlbetrieb wurden bewusst zwei Szenarien mit mittlerem (Neubau) bis hohem (Bestandesbau) Regenerationsgrad gewählt.

2.3.3 Erhebung Haushaltsstrom im Quartier

Die Erhebung des Haushaltsstromes erfolgte über eine Abschätzung der in den Wohnquartieren benötigte Bedarf an elektrischer Energie. Der Fokus lag auf dem benötigten Haushaltsstrom der Gebäude, welche in den betrachteten Gebieten durch den Wohnsektor dominiert werden. Externe Faktoren wie beispielsweise ein möglicher Zubau der Elektromobilität, Einflüsse von Industrien oder sonstige Transformationsprozesse wurden nicht berücksichtigt.

Als Referenzquellen zur weiteren Ausarbeitung dienten hauptsächlich die Statistik der Schweizer Städte[14], die Referenzbedarfsprofile gemäss Polysun-Simulation sowie eine Erhebung des typischen Haushaltsstromverbrauchs[15]. Eine Übersicht der Methodik zur Erhebung des Eigenbedarfes kann der Abbildung 7entnommen werden.

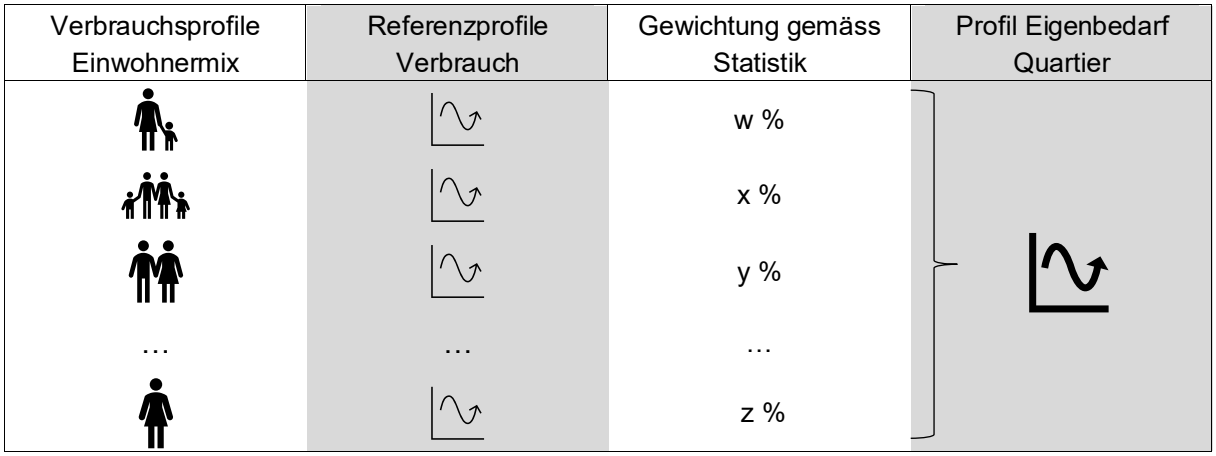


Abbildung 7: Übersicht Methodik Erhebung Eigenbedarf Gebäudepark.

Für die Ermittlung des gesamten Haushaltsstrombedarfs in den jeweiligen Quartieren wurde der Gesamtbedarf auf zehn Referenzprofile aus der Software Polysun verteilt. Kennwerte zu diesen Referenzprofilen können der nachfolgenden Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 4: verwendete Polysun-Referenzprofile zur Erhebung des Elektrizitätsverbrauches in den Quartieren.

Profiltyp	Beschreibung	Personen [n]	Jahresverbrauch [kWh]
H05	Familie 3 Kinder	5	3340
H63	Familie 2 Kinder, 1 Arbeit	4	3390
H64	Familie 1 Kinder, 1 Arbeit	3	2770
H02	Paar, beide Arbeiten	2	2130
H16	Paar, über 65	2	1590
H07	Single, berufstätig	1	1650
H11	Student	1	770
H06	Person, arbeitslos	1	1820
G0	Gewerbe allgemein	0	1000
G4	Gewerbe aller Art	0	1000

Der Einwohnermix in einem 'idealen' Wohnquartier wurde basierend auf der Statistik Schweizer Städte für die Stadt Zürich definiert. Die Verbrauchsprofile wurden in einem abschliessenden Schritt anhand der Anzahl Einwohner in den Quartieren skaliert und ergeben somit das elektrische Verbrauchsprofil auf Quartierebene.

2.3.4 Grundlagen und potenzielle Dachflächen

Die Grundlage zur Auswertung des PV-Potentials bildete der über swisstopo erhältliche Gebäudedatensatz zur Solareignung von Fassaden und Dachflächen[13,16]. In diesen Studien wurden die Fassaden und Dachflächen der Schweiz im Hinblick auf ihre Eignung zur PV-Produktion ausgewertet und durch das BFE über die Plattform www.solardach.ch veröffentlicht. In vorliegender Studie wurden Daten aus der Datenbank zur Nutzung der Dachflächen verwendet. Eine allfällige PV-Nutzung über Fassadenelemente wurde nicht berücksichtigt.

Tabelle 5: Einordnung Eignung Dachflächen gemäss vorliegender Auswertung. Grün eingefärbt die im Rahmen der Arbeit verwendeten Flächen (Ab Stufe gut).

Code	Beschreibung/Wert	Abhängigkeit zu MSTRAHLUNG
1	gering	< 800 kWh / m^2 / Jahr
2	mittel	≥ 800 und < 1'000 kWh / m^2 / Jahr
3	gut	≥ 1'000 und < 1'200 kWh / m^2 / Jahr
4	Sehr gut	≥ 1'200 und < 1'400 kWh / m^2 / Jahr
5	hervorragend	≥ 1'400 kWh / m^2 / Jahr

Der erhaltene Datensatz der Dachflächen wurde einer Vorauswertung unterzogen. Die Eignung der einzelnen Dachflächen zur Solarenergieerzeugung auf Basis der mittleren Einstrahlung gemäss Tabelle 7 wurde ausgelesen. Für die nachfolgende Auswertung wurden sämtliche Werte ab Stufe gut (≥ 1'000kWh / m^2 / Jahr) und einer Fläche von grösser 20 m^2 für die weitere Auswertung ausgewählt und betrachtet.

Wie Abbildung 8 exemplarisch entnommen werden kann, ist zur korrekten Erhebung des Tagesverlaufs einer PV-Anlage deren Orientierung und Neigung von hoher Wichtigkeit. Je nach Ausrichtung der Anlage, ergibt sich über den Tag ein anderer Leistungsverlauf.

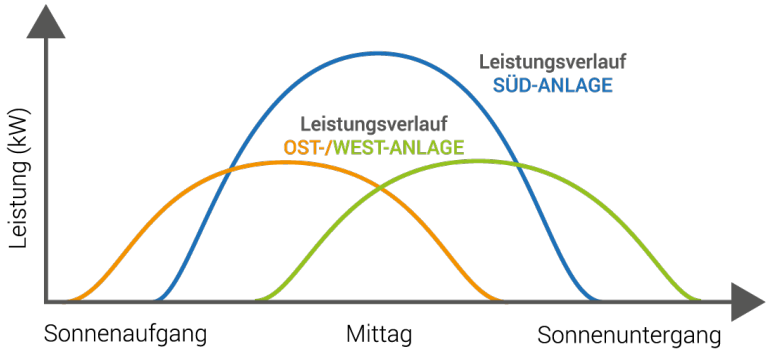


Abbildung 8: Leistungsverlauf PV-Anlage in Abhängigkeit der Ausrichtung. (Quelle: https://www.photovoltaik.at/gewerbe)

Im Rahmen der weiteren Ausarbeitung soll die PV-Produktion im Quartier dem Kältebedarf der Gebäude auf Stundenbasis gegenübergestellt werden. Um für die mögliche PV-Produktion im Quartier realistische Werte zu erhalten, wurden die Dachflächen je Untersuchungsgebiet über eine Geoanalyse anhand Ihrer Neigung in drei Klassen und bezüglich der Orientierung in zehn Klassen eingeordnet. Jeder Dachfläche wurde hierbei eine UID_OriNei (Identifier Orientierung Neigung) zugeordnet. Diese UID_OriNei wird jeder Teilfläche als Tabellenwert hinterlegt, sodass die einzelnen Teilflächen für weitere Auswertungen zur Verfügung stehen. Eine Übersicht der definierten Flächen kann Abbildung 9 entnommen werden.

Tabelle 6: Aufschlüsselung der Dachflächen nach Orientierung und Neigung mit jeweiligem UID-Code zur Einordnung der Fläche.

ID_Ori		Orientierung									
		1 (E)	2 (ESE)	3 (SE)	4 (SSE)	5 (S)	6 (SSW)	7 (SW)	8 (WSW)	9 (W)	100 (flat)
	100 Flach	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200
Neigung	100 (1-30°)	101	102	103	104	105	106	107	108	109	-
	200 (30-60°)	201	202	203	204	205	206	207	208	209	-
	300 (60-90°)	301	302	303	304	305	306	307	308	309	-

Zum besseren Verständnis kann der Abbildung 9 ein Ausschnitt der Auswertung Gebiet Binz entnommen werden. Die Dachflächen sind gemäss Eignung wie in Tabelle 7 beschrieben klassifiziert. Für die gemäss Auswertung relevanten Dachflächen ist eine PIN-Nadel mit dem zugehörigen Wert der ID_OriNei hinterlegt. Anhand der Nummer kann die Dachfläche gemäss Tabelle 8 einer Orientierung und Neigung zugeordnet werden.

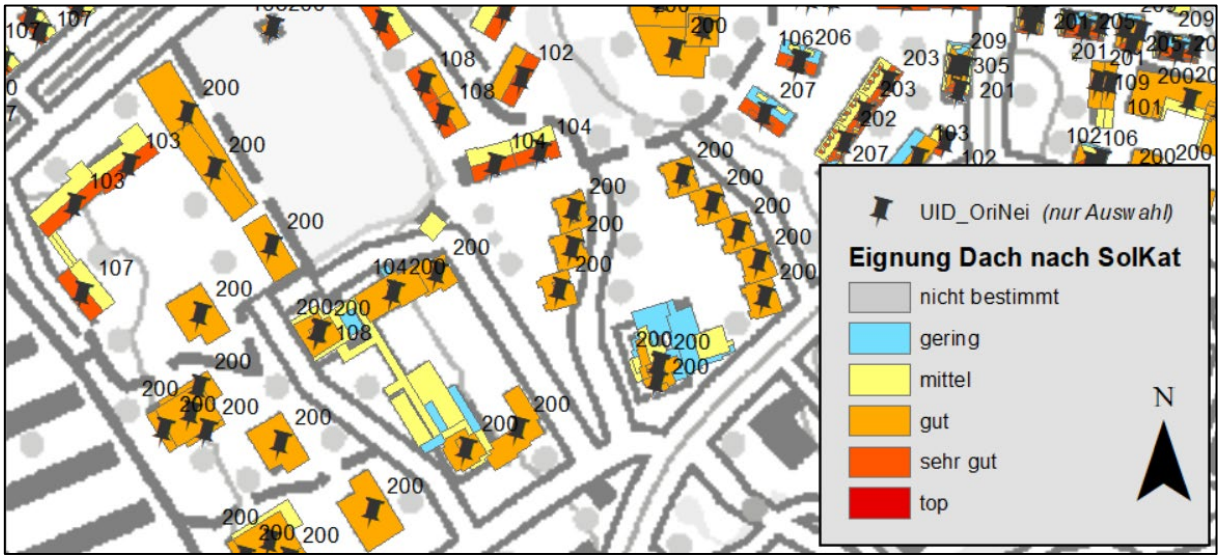


Abbildung 9: Ausschnitt Auswertung Gebiet Binz mit Eignung Dachfläche und Zuordnung UID_OriNei für ausgewählte Dachflächen gemäss Methodik.

2.3.5 PV-Produktion in den Untersuchungsgebieten

Basierend auf der Einteilung der einzelnen Dachflächen in Kapitel 3.3.1 kann die gesamte mögliche PV-Produktion in den Untersuchungsgebieten auf Stundenbasis abgeschätzt werden. Für die Ausarbeitung dieser Profile wurden verschiedene Annahmen getroffen, welche nachfolgend ausgeführt werden.

Die Datenbank zur Solareignung von Fassaden und Dachflächen weist grundsätzlich neben den Gebäudeflächen auch direkt eine mögliche PV-Produktion auf den Teilflächen auf. Diese Daten als Monats- oder Jahreswerte, haben jedoch eine zu geringe zeitliche Auflösung und wurden nach Auffassung der Autoren mit zu tiefen Leistungswerten für eine zukünftige Installation betrachtet (η_{Modul} = 17 % und PR (Performance Ratio) = 80 %). Daher wurde für jede Orientierung eine Simulation mit besseren Kennwerten und aktuelle Referenzwetterdaten in Polysun durchgeführt. Eine Auflistung von Kennwerten der verwendeten Komponenten und Kennzahlen kann Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 7: Kennwerte der Referenzanlage für Polysun-Simulationen der festgelegten Ausrichtungen.

Parameter	Wert	Einheit / Anmerkung
Modulwirkungsgrad STC	19.2	%
Modul P_{Max} STC	0.325	kWp
Zelltyp	Mono	Monokristallin PERC Zelle
PV-Feld	50	PV-Module
Grösse PV-Feld	84.5	m^2
Nennleistung DC	16.25	kW
Performance Ratio (PR)	80-85	% (abhängig von Ausrichtung)

Diese Anlage wurde als Referenzinstallation für alle 28 Ausrichtungen simuliert. Als Grösse des PV-Feldes wurde der Medianwert aller erhobenen Dachflächen gemäss Auswertung Kapitel 3.3.1 festgelegt. Die Auswertung stütz sich hierbei (wie in Kapitel 2.3 ausgeführt) auf das Referenz-Klimaszenario Zürich RCP4.5 2050. Die Auswertung zeigt, dass unter Verwendung dieser Werte mit einer rund 10 % höheren PV-Produktion zu rechnen ist im Vergleich zur Verwendung der aktuellen Referenzwetterdaten.

Um die gewünschten Werte zur PV-Produktion in den jeweiligen Quartieren zu erhalten, wurden die spezifischen Erträge aller 28 Orientierungen mit den Summen aller im Quartier vorhandenen Dächer multipliziert. Die somit erhaltenen Resultate können in unterschiedlichster Art ausgewertet werden. Als Beispiel wird der spezifische Leistungsertrag der Dachflächen in Tabelle 10 für das Gebiet Binz ausgewiesen.

Tabelle 8: Spezifischer Ertrag Dachflächen am Beispiel der Auswertung Gebiet Binz. Grün hervorgehoben die Ausrichtungen mit den höchsten spez. Erträgen.

Ertrag pro Modulfläche kWh/m²		Orientierung									
		1 (E)	2 (ESE)	3 (SE)	4 (SSE)	5 (S)	6 (SSW)	7 (SW)	8 (WSW)	9 (W)	100 (flat)
Neigung	100 Flach	-	-	-	-	-	-	-	-	-	201
	100 (1-30°)	192	199	205	209	211	209	205	199	191	-
	200 (30-60°)	172	188	201	209	212	209	200	186	169	-
	300 (60-89°)	0*	0*	0*	193	196	193	0*	0*	0*	-

* 0-Werte ergeben sich, wenn keine Dachflächen mit einer Eignung von mindestens "gut" vorhanden sind.

Als weiteres Beispiel wird über einen Zeitraum von zehn Sommertagen (31.05 – 05.06) in Abbildung 10 das Gesamtpotential in kWh, der Anteil an Gesamtpotential von Flachdächern sowie die Aussentemperatur auf der Sekundärachse abgebildet. Es zeigt sich der zu erwartende Tagesverlauf der Produktion in Abhängigkeit von Aussentemperatur und Sonnenstand.

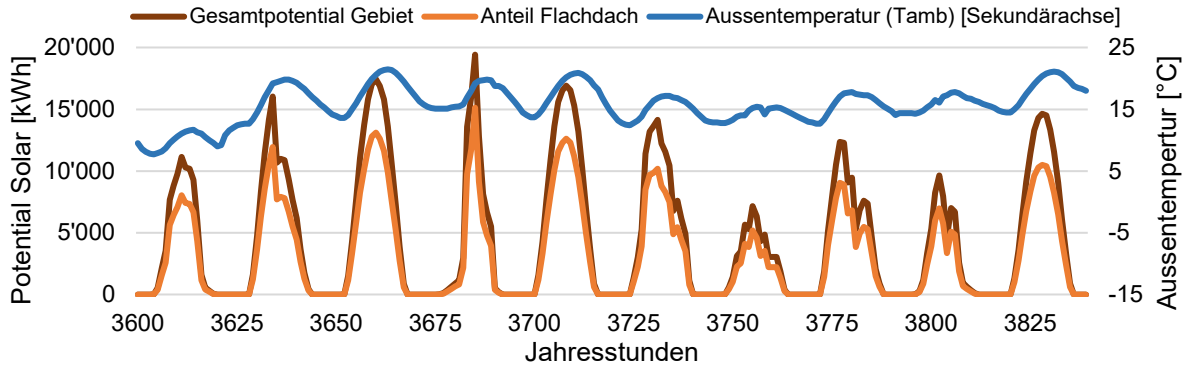


Abbildung 10: 10-Tagesverlauf (31.05-05.6) Gebiet Binz Potential PV-Produktion Flachdach, Gesamthaft sowie Aussentemperatur auf Sekundärachse.

2.4 Methodik nachbarschaftliche Beeinflussung

Ausgehend von den Wärme- und Kältelasten aus den IDA-ICE Simulationen wurden die Gebäudetechnik und die daraus resultierenden Kennwerte wie die Jahresarbeitszahlen mit der Software Polsyun simuliert. Die Modellierung der Erdreichauskühlung in ganzen Quartieren wurde in einer vereinfachten Form in Matlab durchgeführt, wozu aber die mit Polysun ermittelten Kennwerte verwendet wurden.

2.4.1 Langzeitauskühlung bei regelmässigem Sondenraster

Basierend auf den Arbeiten von Cimmino und Bernier[17] wurde das semianalytische Modell zur Berechnung des Langzeitverhaltens von grossen Erdsondenfeldern in matlab implementiert und weiterentwickelt. Die genauen mathematischen Ansätze dazu werden im Anhang beschrieben. Die durchgeführten Erweiterungen erlauben eine Berechnung der Beeinflussung von Sonden mit unterschiedlicher Entzugsleitung und unterschiedlichem Inbetriebnahme-zeitpunkt. Aufgrund von Vereinfachungen können aber dennoch sehr grosse Sondenfelder oder ganze Quartiere (bis ca. 2500 Sonden bei 16 GB RAM) ohne Spezialcomputer berechnet werden.

Diese Methode wurde verwendet um eine 'Nachbar g-Funktion' $g_{nachbar}$ zu berechnen, welche den Langzeiteinfluss von regelmässigen EWS Feldern auf eine Sonde in der Mitte dieses Feldes wiedergeben. Eine Erläuterung zum Konzept der 'Nachbar g-Funktion' wird im RegenOpt Bericht[18] gegeben. Es wurden 'Nachbar g-Funktionen' für unterschiedliche Sondenlängen (100-400 m) und unterschiedliche Sondenabstände (6-40 m) anhand eines Feldes mit 1761 (41x41) Sonden berechnet.

In Annex D der SIA 384/6[2] wird ein iteratives Verfahren vorgeschlagen, mit welchem die Länge der EWS anhand des Temperaturgradienten und der Bohrtiefe angepasst wird. Wozu folgende Formeln verwendet wird:

$$L_{BHE} = \frac{L_{BHE,N} \cdot \Delta\theta_{G,N}}{\Delta\theta_G} \qquad (3)$$

Tabelle 9: Symbole und Standardwerte, welche für die Berechnung der Auskühlung mit regelmässigem Sondenraster verwendet wurden.

Sondenlänge	$L_{BHE}\ in\ m$
Sondenlänge bei Standardbedingungen	$L_{BHE,N}$ = *100 m*
Bodentemperaturdifferenz	$\Delta\theta_G\ in\ K$
Bodentemperaturdifferenz bei Standardbedingungen	$\Delta\theta_{G,N} = 11.5\ K$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = 2.5\ \frac{W}{mK}$
Dichte	$\rho = 2600\ \frac{kg}{m^3}$
spezifische Wärmekapazität	$cp = 1000\ \frac{J}{kgK}$
Temperaturgradient	$\nabla\theta_G = 0.03\ \frac{K}{m}$
Bodentemperaturdifferenz unter Normbedingungen	$\Delta\theta_{G,N} = 11.5\ K$
Auslegetemperatur	$\theta_{BHE,50} = -1.5\ °C$
Vollaststunden inkl. Warmwasser	h_{voll} = *2330 h*
spezifische Entzugsleistung bei Standardbedingungen	$\dot{q_N} = 37\ \frac{W}{m}$

Weil sich die spezifische Entzugsleistung q̇ proportional zur Verlängerung der EWS verringert, wurde diese folgendermassen angepasst:

$$\dot{q} = \frac{\dot{q_N} \cdot \Delta\theta_G}{\Delta\theta_{G,N}} \qquad (4)$$

Wobei:

$$\Delta\theta_G = \theta_{G,N} + \frac{L_{BHE} \cdot \nabla\theta_G}{2} - \theta_{BHE,50} - \Delta\theta_{Nachbar} \qquad (5)$$

Die nachbarschaftliche Auskühlung $\Delta\theta_{Nachbar}$ wurde anhand der spezifischen Entzugsleitung und der 'Nachbar g-Funktion' berechnet:

$$\Delta\theta_{Nachbar} = \dot{q} \cdot \frac{g_{nachbar}(50\,a)}{2\pi\lambda} \qquad (6)$$

Analog zur SIA 364/6 wurde diese Formeln iterativ angewendet, um bei einer Vielzahl regelmässigen Felder die verringerte Entzugsleistung anhand des Nachbareinflusses auszurechnen, wozu die in

Tabelle 11 gegebenen Symbole und Standardwerte verwendet wurden.

Für jedes betrachtete Feld kann aus der iterativ ermittelten spezifischen Entzugsleistung, den typischen Vollaststunden, der Sondenlänge und des Sondenabstandes, eine (grundstücks-) flächenspezifische Entzugsleistung berechnet werden. In Abbildung 11 wird die Abnahme der möglichen spezifischen Entzugsleistung (pro Sondenmeter) für unterschiedliche Bohrtiefen als Funktion der flächenspezifischen Entzugsleistung dargestellt. Die einzelnen Punkte in den gezeigten Kurven entsprechen jeweils einem konkreten regelmässigen Sondenabstand.

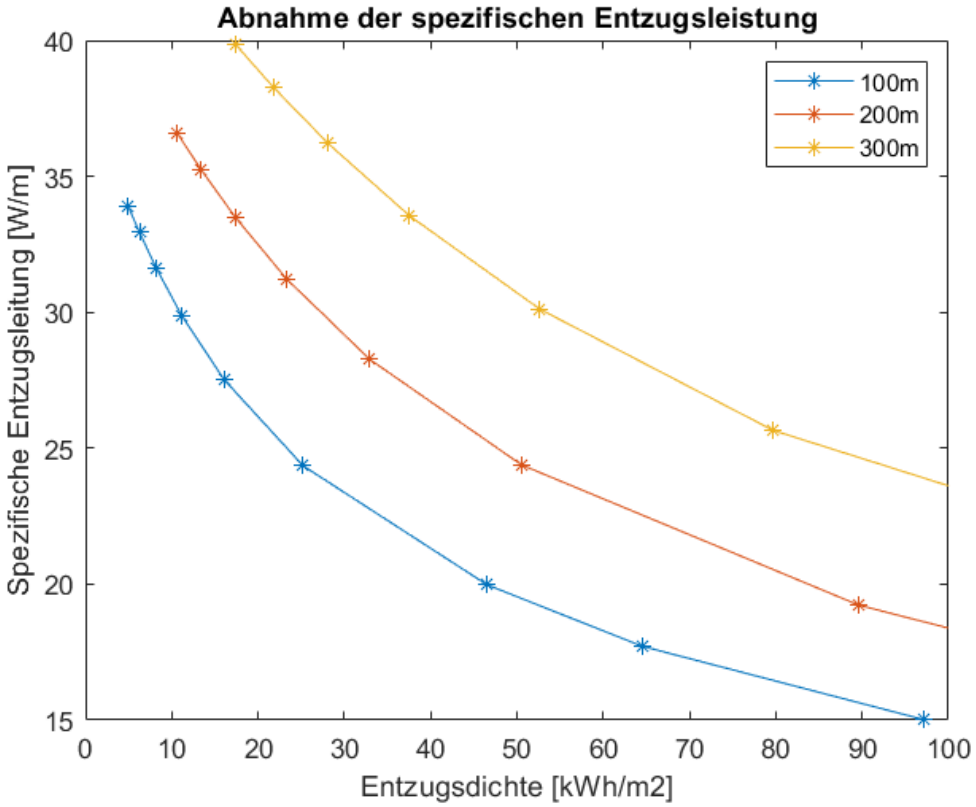


Abbildung 11: Abnahme der spezifischen Entzugsleistung.

Aus den Berechnungen mit regelmässigen Feldern können generelle Aussagen zur Nachbarauskühlung und zur benötigten Sondenverlängerung für unterschiedliche grundstücksbezogene Entzugsdichten abgeleitet werden. Diese können wiederum für die Abschätzung und den Vergleich von Kosten übernommen werden.

2.4.2 Langzeitauskühlung in Quartieren

Um die nachbarschaftliche Auskühlung von EWS in realen, nicht regelmässigen Situationen aufzuzeigen, wurde die gegenseitige Beeinflussung auch in den Beispielquartieren ausgerechnet. Dazu wurde angenommen, dass die gesamte Wärmeversorgung in den Beispielquartieren auf EWS-Wärmepumpen umgestellt wird. Wie in Kapitel 3.3.1 erläutert wird, wurden alle Gebäude in den Beispielquartieren einer Gebäudeklasse zugeordnet, wodurch für jedes Szenario ein Kältebedarf abgeleitet werden konnte. Die somit vorhandenen gebäudescharfen Bedarfsdaten wurden mit dem angepassten semianalytischen Modell (Annex D), kombiniert um den Einfluss aller Sonden Im Quartier auf jede Parzelle auszurechnen. Dazu wurden die Bedarfsdaten mit einer JAZ von 4.37 für die Wärmebereitstellung und 6.55 (EER) für die Gebäudekühlung (sieh auch Kapitel 3.2.1) umgerechnet, um die Entzugsenergien aus den Sonden abzuschätzen. Die Auskühlung durch gegenseitige Beeinflussung wurde jeweils für das Zentrum einer Parzelle/Liegenschaft berechnet. Das heisst es wurde nicht bei jedem Grundstück nach realistischen Positionen für mögliche EWS gesucht. Bei Gebäuden mit einem erhöhten Wärmebedarf, welche in der Praxis mehrere Sonden benötigen würden, wurde die gesamte Entzugsleistung auf eine 200 m tiefe

Linienquelle/-senke in deren Zentrum konzentriert. Dadurch entstehen unrealistisch hohe Entzugsleistungen und das Verhalten (der Einfluss der betrachteten Sonde auf sich selber) wird unrealistisch. Der Einfluss des Energieentzuges auf andere Parzellen im Quartier kann jedoch mit dieser Vereinfachung betrachtet werden und ist realistisch. Der Platzbedarf und die verfügbaren Flächen wurden nicht abgeklärt. Tatsächlich gibt es in den Quartieren Gebäude/Parzellen bei welchen in der Praxis keine oder nicht genügend EWS installiert werden könnten. Bei der Berechnung der nachbarschaftlichen Beeinflussung wurde dies jedoch vernachlässigt. Um Randeffekte zu minimieren, wurden die Quartiere mit einem regelmässigen Raster mit 20 m x 20 m Abstand umgeben, wobei die mittlere flächenspezifische Entzugsleitung aus dem Quartier auf das umgebende Raster übertragen wurde.

2.5 Methodik Wirtschaftlichkeit und Kosten

Obwohl eine aktive Gebäudekühlung im Vergleich zum passiven Gebäudekühlung durch EWS höhere Regenerationsgrade (Kriesi et al.[4]) sowie bessere Raumbehaglichkeit im Sommer leistet, ist die aktive Gebäudekühlung mit höheren Zusatzkosten verbunden. Die zusätzlichen Kosten in dem Fall beinhalten die Kosten von zusätzlichen gebäudetechnischen Anlagen inkl. ihre Installation als auch die Betriebskosten. Von anderer Seite wäre es möglich, einige Kosten mit dem Verzicht der Automatisierung von passiven sommerlichen Wärmeschutzmassnahmen sowie mit der Auslegung von kürzeren Sonden im EWS einzusparen.

Das Ziel des aktuellen Kostenvergleichs ist es, die Korrelation zwischen den für die aktive Gebäudekühlung notwendigen Zusatzkosten, erhöhten Regenerationsraten und Verbesserung der räumlichen Behaglichkeit zu bestimmen.

Mit diesem Hintergrund wird das Kühlszenario ***«Passive Fussbodenkühlung» als Basisszenario*** für den Kostenvergleich gewählt. In diesem Kühlszenario erfolgt die Raumheizung und die Erwärmung des Brauchwarmwassers mittels einer Standard Sole-Wasser Wärmepumpe; die Kühlenergie wird vom EWS mittels eines Wasser-Wasser Wärmetauschers an die in Wohnungen bestehenden Fussbodenheizsysteme übergegeben. Es wird davon ausgegangen, dass bereits ein Fussbodenheizungssystem existiert. Das Kühlszenario wurde hinsichtlich der Regenerationsrate vom EWS und thermische Behaglichkeit in RegenOpt[18] sowie ResCool[9] bereits untersucht.

Die Kombination der Zuluftkühlung und Fussbodenkühlung kann eine Erhöhung des Regenerationsgrades sowie räumlicher Behaglichkeit gewährleisten, jedoch beansprucht die Zusatzkosten. Dieses Kühlszenario wird als ***«Aktive Fussbodenkühlung mit Zuluftkühlung»*** bezeichnet und ***besteht aus drei Ausführungsvarianten*** der aktiven Gebäudekühlung, nämlich:

- In der ***Ausführungsvariante (i) «Reversible Wärmepumpe»*** wird die aktive Kühlung mittels einer reversiblen Wärmepumpe erfolgen. Im Vergleich zum Kühlszenario «Passive Kühlung» soll die Fliessrichtung des Kältemittels mit der Hilfe vom 4-Weg-Ventil umgekehrt werden kann und damit die Wärmeüberträger ihre Rolle tauschen: der Verdampfer wird zum Kondensator und der Kondensator wird zum Verdampfer, was die zusätzlichen Investitionskosten beansprucht. Wegen des Umbaus der Wärmepumpe sind schlechtere Jahresarbeitszahlen für die Wärmeproduktion zu erwarten.

- In der ***Ausführungsvariante (ii) «Externe hydraulische Umschaltung»*** wird die aktive Kühlung durch die Erweiterung des hydraulischen Schemas erfolgen; die Wärmepumpe selbst wird auf reversible nicht umgebaut. In der Variante funktioniert der Heizbetrieb gleich wie in der ersten Ausführungsvariante. Im Kühlbetrieb muss der Fussbodenkreis vom Kondensator der Wärmepumpe auf den Verdampfer geschaltet werden, der Erdsondenkreis vom Verdampfer auf den Kondensator. Das Fussbodensystem muss über einen Wärmeübertrager vom soledurchflossenen Verdampfer getrennt werden. Brauchwarmwasser wird weiter über den Kondensator der Wärmepumpe erwärmt. Die Effizienz der Wärmeproduktion durch die Wärmepumpe soll in dem Fall nicht beeinflusst werden.
- In der ***Ausführungsvariante (iii) «Separate Wärmepumpe zum Kühlen»*** wird eine separate Wärmepumpe für Kühlen betrachtet, um die Jahresarbeitszahl von beiden Wärmepumpen für die Wärme- und Kälteproduktion möglichst wenig zu beeinflussen.

Für den Vergleich von aufgelisteten Kühlszenarien werden die Investitions- und Betriebskosten separat betrachtet. Die Investitionskosten betreffen nur die Anlagen in die zusätzliche Ausrüstung für die aktive Kühlung. Die Baukosten sowie die Kosten für die rudimentären Gebäudetechnik werden im Kostenvergleich nicht dargestellt, da diese in allen Szenarien gleich sind. Die berücksichtigten Investitionskosten je nach Szenario enthalten:

- Wärmepumpenpreise sowie Umbaukosten für reversiblen Betrieb
- Umbaukosten bestehendes Bodensystems zur Raumkühlung
- Preis für den Kühlregister in Lüftungsanlage, Installation und hydraulische Einbindung
- Kältespeicher
- Hydraulische Umschaltung der Wärmepumpe für die Raumkühlung

Die Betriebskosten berücksichtigen die Stromkosten für Heizen und Kühlen mittels Wärmepumpe über 20 Jahre. Die Stromkosten für den Betrieb der Kreislaufpumpen werden auch mitberücksichtigt. Die weitere Wartungs- und Entsorgungskosten werden nicht berücksichtigt.

Die möglichen Einsparungen bei der Automatisierung beziehen sich auf den Verzicht auf Automatisierung der Jalousien und Fensterlüftungen. Augangslage ist eine Smart Home Komplettlösung, bei der alle Fenster und Jalousien zentral gesteuert werden. Smart Home Komplettlösungen werden meist bei Neubauten umgesetzt, sind jedoch auch im Bestand möglich.

In Quartieren mit hohen Wärmeentzugsdichten stellt sich bei der Dimensionierung von Erdsonden die Frage, ob diese regeneriert werden und daher eher kürzer ausgelegt werden können oder ob auf Regeneration verzichtet wird und dadurch längere Sonden nötig sind. Damit entsteht ein zusätzliches Einsparpotential bei der Anwendung einer aktiven Kühlung.

Der Kostenvergleich wird fürs Referenzgebäude ***«SPF-Referenz Neubau KWL»*** im ***«Szenario 5, 2050»*** erstellt.

3 Grundlagen

Für dieses Projekt wurden diverse Datensätze von vier Quartieren in Zürich und einem Quartier in Rapperswil-Jona zusammengetragen und ausgewertet. Zusätzlich wurden Meteodaten für den momentanen Zeitpunkt und eine Prognose für das Jahr 2050[8] verwendet. Die verwendeten Basisdaten werden nachfolgend kurz vorgestellt.

3.1 Quartiere und Datensätze

Sämtliche Auswertungen im Rahmen der vorliegenden Studie wurden für real existierende Quartiere durchgeführt. Die ausgewählten Quartiere zeichnen sich in verschiedener Hinsicht durch unterschiedliche Strukturierung aus.

Für die Studie wurden die nachfolgend aufgelisteten Gebiete definiert. Übersichtskarten mit dem genauen Projektperimeter können dem Annex A entnommen werden.

- Stadt Zürich, Gebiet Binz (nachfolgend Binz)
- Stadt Zürich, Gebiet Hottingen (nachfolgend Hottingen)
- Stadt Zürich, Gebiet Käferholz (nachfolgend Käferholz)
- Stadt Rapperswil-Jona, Gebiet Südquartier (nachfolgend RJ Südquartier)

Um die Situation in den definierten Gebieten abzubilden, wurden diverse kommunale, kantonale und nationale Geodatenbanken zusammengeführt und für die weitere Ausarbeitung aufbereitet. Der nachfolgenden Tabelle 1 kann eine Übersicht der verwendeten relevanten Geodatenbanken entnommen werden.

Tabelle 10: Im Rahmen des Projektes verwendete Geodatenbanken.

Name	Referenzjahr	Beschreibung	Quelle
Solarenergie Eignung Dächer	2016	Dachflächen PV	(BFE, 2016)[19]
EnergyGIS Wärme	2015	Bedarfsdaten Südquartier	(AWE, 2017)[20]
GWR Basisdaten	2018	Basisdatensatz Quartiere	(BFS, 2018)[21]
GDP Stadt Zürich	2018	Bedarfsdaten Zürich	(Stadt Zürich, 2018)[22]
swissBuildings3D	2020	Visualisierung Gebäude	(swisstopo, 2020)[23]

Die Datenbanken enthalten diverse Daten zu Heizwärmebedarf, Warmwasserbedarf, Energiebezugsflächen, Baujahr, Parzellengrenzen, Solarpotential und weitere. Die Daten sind hierbei aufgeschlüsselt und können über den Gebäudeidentifikator (EGID) auf das jeweilige Gebäude zugeordnet werden. Für die Gebiete in Zürich stehen zusätzlich Prognosen für Wärmebedarf und EBF (Energiebezugsfläche) für das Jahr 2035 und 2050 zur Verfügung.

3.2 Kennwerte der Quartiere

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind einige relevante Kennzahlen zur Einordnung der Gebiete ausgewiesen. Die Werte bilden die heutige Situation für das jeweilige Untersuchungsgebiet ab. Die gebäudescharfen Daten (nach EGID) wurden hierbei auf die Quartierebene aufsummiert. Grundlage liefern die Datensätze gemäss Kapitel 2.1.

Tabelle 11: Übersicht und relevante Kennzahlen der betrachteten Untersuchungsgebiete.

	Binz	Hottingen	Käferholz	Südquartier
Perimeterfläche (ha)	50	117	12	90
Anzahl Gebäude nach EGID	350	1500	200	510
Median Baujahr Gebäude	1941	1909	1945	1967
Wohnfläche nach EBF (km^2)	0.684	1.259	0.064	0.309
Total Heizbedarf 2020 (MWh)	37'700	118'200	5'800	19'200
Warmwasserbedarf 2020 (MWh)	6'000	19'500	1'100	6'400
Spez. Wärmebedarf (kWh/m^2)	64	109	109	83

Der Heizwärmebedarf der Wohngebäude ist in Abbildung 12 für die verschiedenen Quartiere graphisch als Funktion des Baujahrs aufgetragen. Wie ersichtlich, ist die Streuung des Heizwärmebedarfes bis 1990 relativ gross. Ab Baujahr 1990 reduziert sich der Heizwärmebedarf schrittweise.

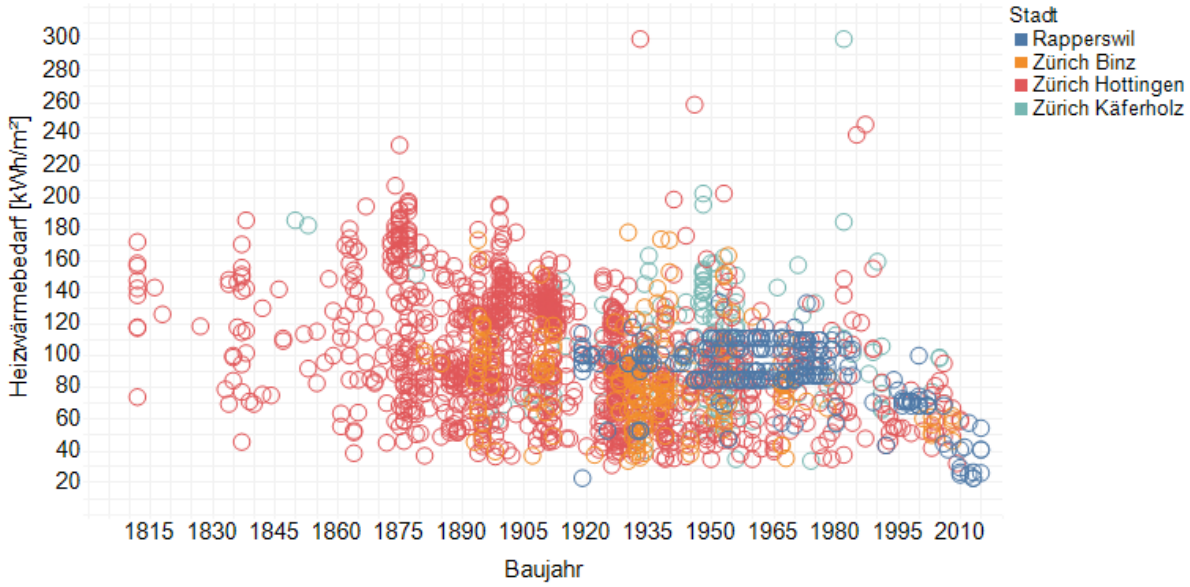


Abbildung 12: Heizwärmebedarf der ausgewählten Quartiere, aufgeschlüsselt nach Baujahr des Objektes.

3.3 Klimadaten

In der Studie werden zwei Klimadatensätze aus synthetischen Designreferenzjahren aus Meteonorm 8 für den Standort Zürich verwendet[8]:

a) «Meteonorm Aktuell» und

b) «Meteonorm 2050 RCP4.5».

Die Szenarien beziehen sich jeweils auf ein Klimaszenario gemäss IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)[24]. Das für das Referenzjahr 2050 verwendete Szenario RCP4.5 ist ein mittleres Szenario, bei dem die Emissionen um das Jahr 2050 ihr Maximum erreichen und anschliessend sinken. Weitere Szenarien wären RCP8.5, bei welchem die Treibhausgasemissionen weiter kontinuierlich ansteigen (Worst-Case), sowie RCP2.6, bei welchem die globale Erwärmung gemäss Pariser Abkommen auf 2 °C begrenzt wird. RCP2.6 verlangt umfassende Massnahmen zur Emissionsreduktion und Negativemissionen gegen Ende des 21. Jahrhunderts. Die Wahl des Referenzszenarios erfolgte in Absprache mit der Begleitgruppe.

Im Vergleich zum Designreferenzjahr der SIA 2028[25] weisen die ausgewählten Jahre höhere Aussenlufttemperaturen (Abbildung 13) und grössere Solareinträge (Abbildung 14) aus.

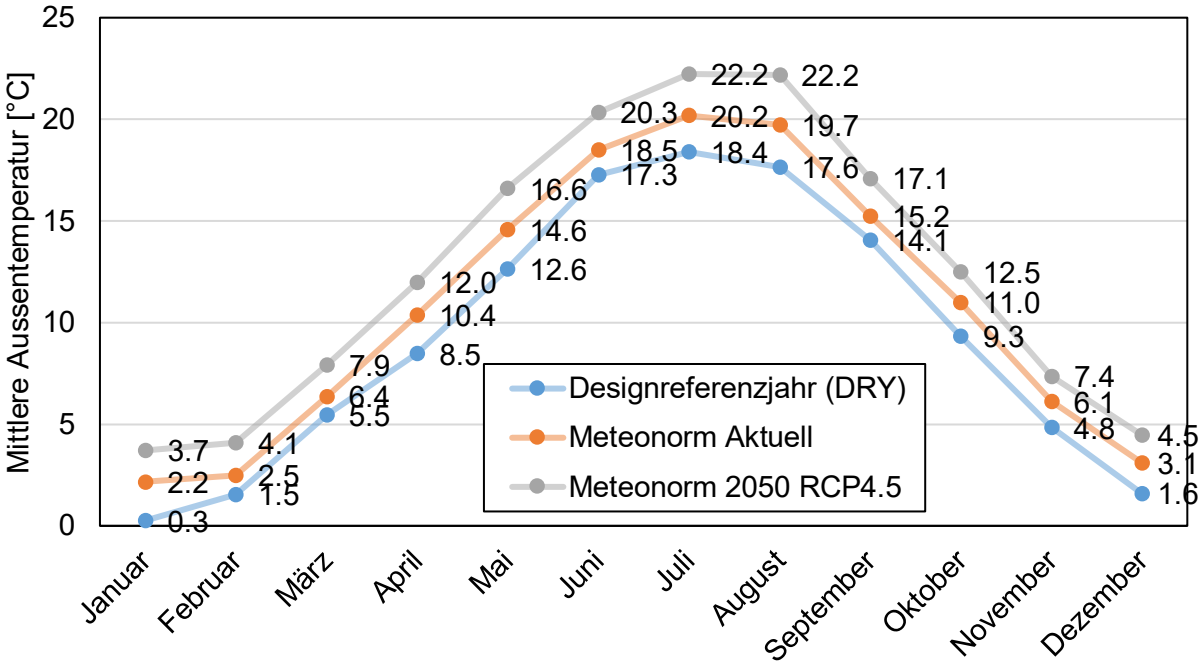


Abbildung 13: Vergleich der mittleren monatlichen Aussenlufttemperatur des Designreferenzjahrs mit Meteonorm Wetterdaten.

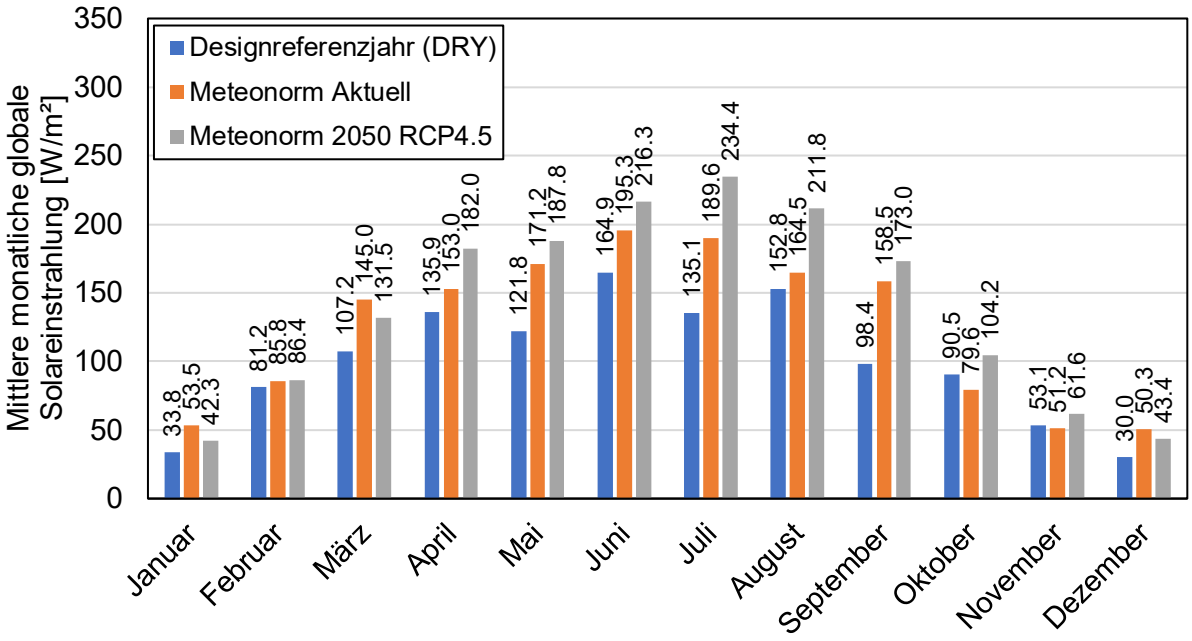


Abbildung 14: Vergleich der mittleren monatlichen Globalstrahlung des Designreferenzjahrs mit Meteonorm Wetterdaten.

3.4 Kostengrundlagen

3.4.1 Kosten Lüftung und Kühlregister

Um die Kosten für die Installation einer mechanischen Lüftung mit einem Wärmerückgewinnungsgerät abzuschätzen, wurde die Kostenauflistung von 17 dokumentierten Gebäuden aus Berichten der CRB[26] und der Stadt Zürich[27] verwendet. Abbildung 15 zeigt die Kosten für die Lüftungsinstallation in Abhängigkeit der Energiebezugsfläche. Die Streuung ist enorm und die konkreten Kosten sind stark von den lokalen Gegebenheiten abhängig (Wohnungsgrösse, Verteilkonzept). Zudem beziehen sich die hier dargelegten Kosten auf Neubauten. Bei Nachrüstung einer Lüftung kommt es sehr auf den vorhandenen Platz für Geräte und Leitungen sowie das Schachtkonzept an. Für Nachrüstungen sind jedoch keine Daten verfügbar. Die Mehrheit der Gebäude (>99 %) in den vier Untersuchungsgebieten RJ Südquartier, Käferholz, Hottingen und Binz haben eine Energiebezugsfläche < 10'000 m^2 und der vorhandene Datensatz wird auf diese Gebäude eingeschränkt. Die gestrichelte Linie entspricht der Formel **«Kosten Lüftung (CHF) = 30 CHF/m^2 × EBF (m^2) + 14'000 CHF»**, welche im Folgenden als Abschätzung der Kosten in Abhängigkeit der Energiebezugsfläche verwendet wird. Die Linie wurde so gewählt, dass sie durch den Kostenpunkt (200 m^2 EBF, 20'000 CHF) des suissetec Merkblattes[28] geht und gleichzeitig die ansteigenden Kosten mit grösserer Energiebezugsfläche wiedergibt. Die dokumentierten Kosten für Energiebezugsflächen < 10'000 m^2 liegen zwischen 20'000 CHF und 391'000 CHF.

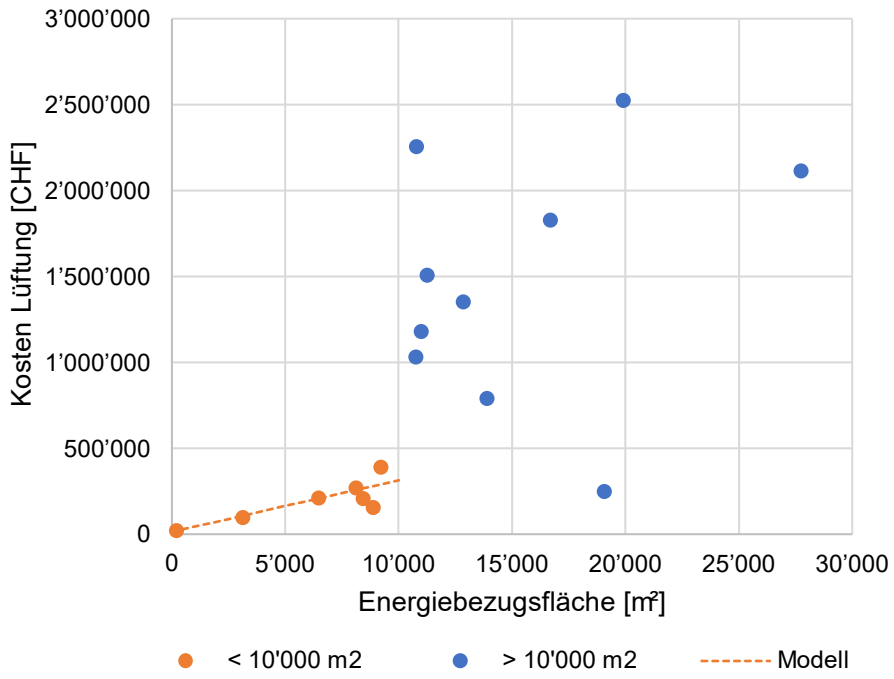


Abbildung 15: Kosten für die Lüftungsinstallation in Abhängigkeit der Energiebezugsfläche für 17 Gebäude.

Ein Kühlregister in einer Lüftungsanlage wird gemäss der benötigten Leistung und Volumenstrom ausgelegt. Die Auslegungsbedingungen sind dafür folgende:

- Lufteintrittstemperatur: 30 °C
- Luftabkühlung: ca. 12 K

Für die Kostenberechnung des Kühlregisters dient die Preisliste 2022 der Helios Lufttechnik AG[29]. Die Auswertung der Preisliste ist in der Abbildung 16 dargestellt. Kosten für die Installation und Anbindung des Kühlregisters werden mit dem Preiszuschlag von 50 % berechnet.

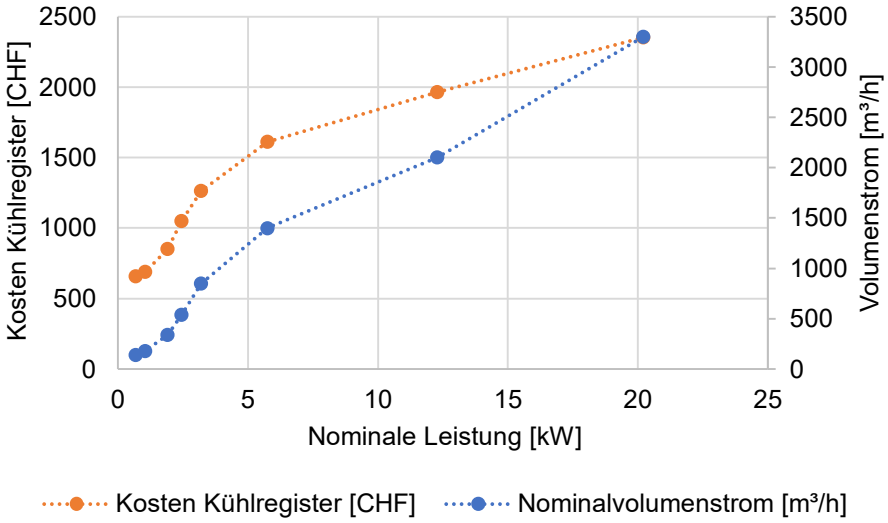


Abbildung 16: Kosten eines Kühlregisters in Abhängigkeit von nominaler Leistung

3.4.2 Kosten Wärmepumpen

Um die Kosten von Wärmepumpen in Abhängigkeit von ihrer Heizleistung grob abzuschätzen, wurde die Preisliste der CTA AG[30] verwendet. Es wurden sieben verschiedene Sole/Wasser-Wärmepumpentypen mit Heizleistungen zwischen 1.6 kW und 230 kW betrachtet. Die Wärmepumpentypen sind Optiheat Inverta TWW, Optiheat Inverta Economy, Optiheat All-in-One, Optiheat Economy, Optiheat Duo, Optiheat Duo HT, Optipro, wobei die ersten beiden über eine Invertertechnologie verfügen, also leistungsgeregelt sind. Nur die erste Wärmepumpe Optiheat Inverta TWW ist reversibel. Alle Wärmepumpen nutzen Quelltemperaturen (Temperaturen Eingang Verdampfer) im Bereich von -6 °C und 20 °C (nur bei Optiheat Economy bis 25 °C). Die möglichen Temperaturen für den Ausgang Kondensator, also typischerweise die Heiztemperaturen, sind zwischen 25 °C und 65 °C. Für jeden der sieben Wärmepumpentypen gibt es mehrere Ausführungen mit unterschiedlichen Heizleistungen. Die Kennzahlen der Wärmepumpe Optiheat Inverta Economy wurde im Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL verwendet. Für eine einfache, grobe Kostenabschätzung wurde für jeden Wärmepumpentyp die minimale und maximale Heizleistung extrahiert und gemittelt, sowie der dazugehörende minimale Preis und maximale Preis extrahiert und ebenfalls gemittelt. Damit ergeben sich sieben Datenpunkte, welche Abbildung 17 dargestellt sind. Als grobe Abschätzung des Preises als Funktion der Heizleistung (gestrichelte Linie) wurde die Formel

«Preis Wärmepumpe (CHF) = 400 CHF kW^{-1} × Heizleistung (kW) + 11'000 CHF»

verwendet. Die dazugehörige Gerade ist in Abbildung 17 gestrichelt dargestellt. Obwohl in Abbildung 17 nur die Wärmepumpe Optiheat Inverta TWW als reversibel ausgewiesen ist, kann prinzipiell jede Wärmepumpe zu einer reversiblen Wärmepumpe umgerüstet werden, indem über ein 4-Weg-Ventil die Fliessrichtung des Kältekreises gedreht wird. Wir gehen im Folgenden von Zusatzkosten von 3 % des Ursprungspreises aus. Bei einer 20 kW Wärmepumpe mit einem Preis von 19'000 CHF (gemäss Näherungsformel) entspräche dies Zusatzkosten von 570 CHF.

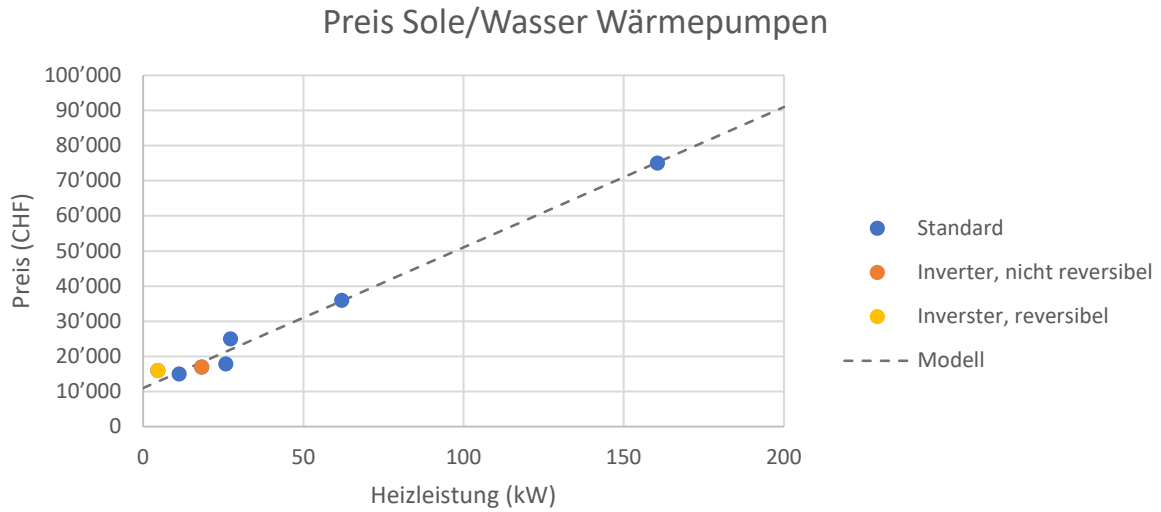


Abbildung 17: Wärmepumpenkosten in Abhängigkeit der Heizleistung.

Um die Kostenabschätzung einfach und übersichtlich zu halten, werden folgende Annahmen getroffen:

i. COP und EER der Wärmepumpe im Heizfall und im Kühlfall sind von Jahr zu Jahr konstant, das heisst nicht beeinflusst von einer langfristigen Abkühlung des Erdreichs.

ii. Der Stromverbrauch der Umwälzpumpen ist identisch sowohl für aktive und passive Kühlung als auch für die unterschiedlichen Varianten der aktiven Kühlung.

3.4.3 Kosten Kältespeicher

Die Kosten für den Kältespeicher wurden ebenfalls aus den Preislisten der CTA AG[31] übernommen und in Abhängigkeit des Speichervolumens extrahiert (siehe Abbildung 18). Das Speichermaterial ist Stahl (nach EN 10025) und die Speicher verfügen über eine diffusionsdichte PEXL-Isolierung zum Schutz vor Schwitzwasser. Der Temperaturbereich für die Kältespeicher liegt zwischen 10 °C und 18 °C. Der Betriebsdruck beträgt 3 bar für die kleineren Speicher bis 1600 l (blau in Abbildung 18) und 6 bar für die grösseren Speicher (orange in Abbildung 18) von 2000 l bis 5000 l. Es werden zwei Näherungsformeln verwendet, um den Speicherpreis in Abhängigkeit des Speichervolumens auszudrücken.

Kleine Speicher (blau in Abbildung 18): Preis (CHF) = 5.8 CHF l-1 × Volumen (l) + 165 CHF.

Grosse Speicher (orange in Abbildung 18): Preis (CHF) = 1.9 CHF l-1 × Volumen (l) + 3674 CHF.

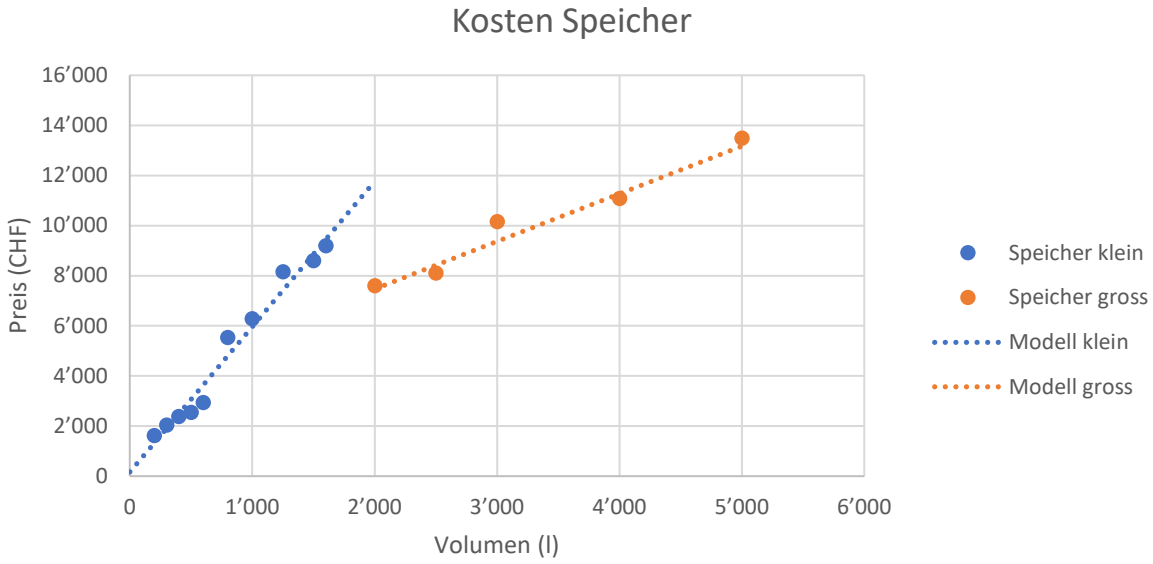


Abbildung 18: Kosten eines Kältespeichers in Abhängigkeit vom Speichervolumen.

3.4.4 Kosten hydraulische Umbauten zum Kühlen

Um ein Fussbodensystem zum Heizen auch zum Kühlen verwenden zu können, ist ein hydraulischer Umbau nötig. Soll passiv gekühlt werden, so ist das Fussbodensystem nicht mehr mit dem Kondensator der Wärmepumpe verbunden, sondern mit dem Erdsondenkreis (aber getrennt durch eine Wärmeübertrager um Sole-Wasser Mischung zu vermeiden). Dafür sind zusätzliche Rohrleitung, Ventile und eine Steuerung nötig. Auch bei aktiver Kühlung sind hydraulische Umbauten nötig, sei es über eine reversible Wärmepumpe, eine externe Umschaltung oder eine separate Wärmepumpe zum Kühlen (siehe Diskussion von Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Einbindungsvarianten in Annex F). Die Umbauten zur Nutzung eines bestehenden Fussbodensystems zum Kühlen finden in der Heizzentrale des Gebäudes statt und sind daher weitgehend unabhängig von der Gebäudegrösse. Eine Quantifizierung der Kosten ist schwierig, da es diverse Realisierungsmöglichkeiten gibt. In Gesprächen mit Fachpersonen wurde die Grössenordnung auf «mehrere tausend CHF» geschätzt. Im suissetec Merkbaltt[32] wurden für ein Einfamilienhaus von 200 m^2 Energiebezugsfläche Kosten von 8'000 CHF veranschlagt, und wir übernehmen diese Pauschale für diese Studie. Die Pauschale fällt sowohl bei passiver Kühlung, aktiver Kühlung über eine reversible Wärmepumpe, aktive Kühlung über externe Umschaltung als auch aktive Kühlung mit separater Wärmepumpe an. Nicht enthalten in dieser Pauschale ist die Einbindung eines Wärmeübertragers in das Lüftungssystem zur Zuluftkühlung, welcher bei aktiver Kühlung in Kombination mit dem Fussbodensystem angewendet wird. Dafür werden weitere 2'000 CHF veranschlagt. Soll die aktive Kühlung über externe Umschaltung erfolgen, sind im Vergleich zur reversiblen Wärmepumpe, bzw. zur separaten Wärmepumpe, ebenfalls zusätzliche Rohrleitungen, Ventile und mindestens ein Wärmeübertrager nötig, um Wasserkreislauf und Solekreislauf zu trennen. Der Preis für eine externe Umschaltung ist daher höher und wird mit zusätzlich 10 % des Wärmepumpenpreises abgeschätzt.

3.4.5 Kosten Automatisierung

Für die Automatisierung der Fensteröffnung werden pro Fenster 400 CHF veranschlagt. Diese 400 CHF setzen sich zusammen aus 300 CHF für den Datenpunkt «Messung der Fensteröffnung» und 100 CHF für die Motorisierung des Fensters. Pro Jalousie werden 300 CHF für den Datenpunkt «Position der Jalousie» angenommen. Es wird angenommen, dass die Jalousien bereits motorisiert sind und die Motorisierung der Jalousien wird nicht der Automatisierung zugerechnet. Insgesamt werden pro Fenster mit Jalousie also 700 CHF veranschlagt (400 CHF für die Fensteröffnung und 300 CHF für die Jalousie). Die Initialkosten für Montage, Sensoren, Steuerung und Programmierung sind stark situationsabhängig und bewegen sich im Bereich von einigen tausend Franken. Um einen groben Anhaltspunkt im Vergleich zu den anderen Kostenpunkten zu haben, werden vereinfacht pauschal 5'000 CHF angenommen. Wird nicht von einer Smart Home Lösung, sondern von der Nachrüstung individueller Räume oder Wohnungen ausgegangen, sind die Kosten pro Raum/Wohnung grösser, weil pro Raum/Wohnung eine individuelle Steuerung aufgesetzt werden muss. Es entfallen jedoch die Kosten für die zentrale Steuerung.

3.4.6 Kosten Verlängerung Erdsonden

Bezüglich Kostenbetrachtung sind daher die Kosten pro Sondenmeter relevant. Diese werden basierend auf RegenOpt[18] mit **68 CHF/m** veranschlagt.

3.4.7 Kosten Strom

Aktive Kühlung mit einer Wärmepumpe benötigt Strom und verursacht dadurch Betriebskosten. Auch für die Umwälzpumpen zur Zirkulation des Wassers in den Rohrleitungen und den Erdsonden wird Strom benötigt. Dieser Anteil ist jedoch typischerweise um eine Grössenordnung kleiner als der Strom für die Wärmepumpen. Wir betrachten deshalb in diesem Bericht nur die Stromkosten für die Wärmepumpe. Für die Stromkosten zum Kühlen im Sommer wird eine Eigenstromproduktion durch PV mit einem Deckungsgrad von 70 % angenommen. Wird PV Strom produziert und dieser direkt für die Wärmepumpe zum Kühlen verwendet, wird für diesen Strom keine Rückspeisevergütung vom Stromanbieter bezahlt und der Strompreis wird gleich dem (nicht erhaltenen) Rückspeisetarif gesetzt. Der Rückspeisetarif variiert regional sehr stark zwischen < 4 Rp/kWh und 20 Rp/kWh[33], wobei hier ein mittlerer Wert von 8 Rp/kWh angenommen wird. Für die restlichen 30 %, welche nicht durch PV Strom gedeckt werden, wird ein Strompreis von **26 Rp/kWh** angenommen (Tarif ewz.econatur[33] Der Strompreis zum Kühlen ist definiert durch das gewichtete Mittel 0.7×8 Rp/kWh + 0.3×26 Rp/kWh = **13 Rp/kWh**.

Wird eine reversible Wärmepumpe zum Kühlen eingesetzt, arbeitet die Wärmepumpe im Winter mit leicht kleinerem, also schlechterem COP aufgrund von zusätzlichen hydraulischen Komponenten im Kältekreis. Damit steigt der Stromverbrauch im Winter zum Heizen. Dieser gesteigerte Stromverbrauch wird mit einem Strompreis von 26 Rp/kWh abgerechnet.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse Heiz- und Kühlbedarf

Um die Entzugswärme aus dem Erdreich, die Regenerationswärme in das Erdreich, und damit schliesslich die Langzeitauskühlung des Erdreichs abschätzen zu können, muss zuerst der Heizwärme- und Klimakältebedarf der Gebäude in den betrachteten Quartieren bestimmt werden. Dafür wurden die sieben Referenzgebäude (Kapitel 3.1.1) den Gebäuden im Quartier zugeordnet und für verschiedene Klimaszenarien (Kapitel 2.3), verschiedene Heiz- und Kühlsysteme (Kapitel 3.1.2) und verschiedene passive Wärmeschutzmassnahmen (Kapitel 3.1.3) der Heiz und Kühlbedarf bestimmt.

4.1.1 Vergleich zwischen simulierten Wetterdaten

Um die simulierten Meteonorm-Wetterdaten (aktuell und 2050) mit dem Designreferenzjahr des SIA Merkblattes 2028[25] zu vergleichen, wurde das Gebäude «SPF-Referenz Neubau KWL», «Szenario 1» mit den drei Wetterdaten simuliert. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 19 dargestellt. Die Verwendung der Daten nach «Meteonorm aktuell» gegenüber dem «Designreferenzjahr» führt in der Simulation zu tieferen Wärmebedarfswerten. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass nach Meteonorm aktuell von weniger Heizgradtagen ausgegangen wird und die globalen Solareinstrahlungen höher sind.

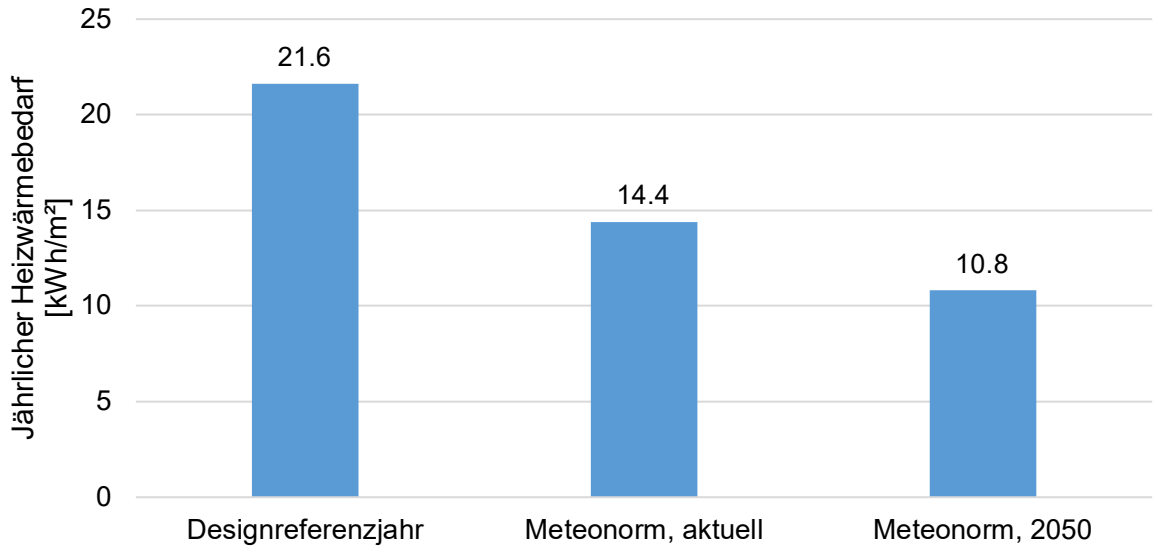


Abbildung 19: Vergleich der simulierten Wetterdaten mit dem Designreferenzjahr [SIA Merkblatt 2028].

4.1.2 Heiz- und Kühlbedarf bei idealem System

In einem ersten Schritt wird ein ideales Heiz- und Kühlsystem angenommen, welches zu jedem Zeitpunkt ideale Komforttemperaturen garantiert. Der Heizwärme- und Klimakältebedarf wird für die sieben Referenzgebäude für die zehn vordefinierten Szenarien (Kapitel 3.1.4) betrachtet. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 20dargestellt. Die unterschiedlichen Farben

beziehen sich auf unterschiedliche Kombinationen (Szenarien) von passiven Wärmeschutzmassnahmen.

Im «Szenario 1» (blaue Balken in Abbildung 20) werden alle verfügbaren passiven Wärmeschutzmassnahmen angewendet (mit Nachtauskühlung, mit Sonnenschutz, mit Aussenluftkühlung). Werden nur die blauen Balken betrachtet, wird deutlich, dass der Heizwärmebedarf (nach rechts gerichtete Balken in Abbildung 20) wie erwartet stark vom Gebäudetyp abhängt und in Zukunft (2050) abnimmt. Der Klimakältebedarf (nach links gerichtete Balken in Abbildung 20) hängt ebenfalls vom Fensteranteil und Gebäudetyp ab und nimmt in Zukunft zu. Der Kühlbedarf erreicht für Altbauten nur wenige Prozent des Heizbedarfs.

Grundsätzlich erhöht sich der Klimakältebedarf der untersuchten Gebäude mit der Reduktion sommerlicher Wärmeschutzmassnahmen («Szenario 1» bis «Szenario 5» in Abbildung 20). Im Fall der Gebäude «SPF-Referenz MuKEn saniert», «SPF-Referenz Bestand» und «SPF-Referenz Altbau» ist der Klimakältebedarf beim «Szenario 3» grösser als beim «Szenario 4», was mit höheren Infiltrationsraten der Gebäude verbunden ist: die Zurückstellung der Aussenluftkühlung hat einen kleinen Einfluss auf den Klimakältebedarf, weil ein grosser Teil der Abkühlung durch die Infiltration gegeben ist.

Für Neubauten (z.B. «SPF-Referenz Neubau KWL») liegt der Klimakältebedarf mit Anwendung aller passiven Wärmeschutzmassahmen bei ca. 1 % (aktuell) und 17 % (2050) des Heizwärmebedarfs. Werden nun die passiven Wärmeschutzmassnahmen reduziert, bleibt der Heizwärmebedarf fast unverändert, der Klimakältebedarf steigt jedoch an. Im Extremfall («Szenario 5», orange Balken, keine Fensteröffnung, kein Wärmeschutz) ist der Klimakältebedarf für Neubauten schon jetzt ähnlich hoch wie der Heizwärmebedarf. In Zukunft ist der Klimakältebedarf ohne Wärmeschutzmassnahmen um den Faktor 2 grösser als der Heizwärmebedarf.

Für Bestandbauten (z.B. «SPF-Referenz Bestand») bleibt der Klimakältebedarf für die Klimadaten «Meteonorm Aktuell» bei 1-4 % des Heizwärmebedarfs. Für die Klimadaten «Meteonorm 2050» beträgt der Klimakältebedarf bis 14 % des Heizwärmebedarfs. Diese tieferen relativen Werte werden durch den geringen Kühlbedarf, aber vor allem auch durch den hohen Heizwärmebedarf begründet.

Es ist zu beachten, dass in Abbildung 20 nur der Heizwärmebedarf (ohne Brauchwarmwasser) berücksichtigt wird. Der spezifischen Brauchwarmwasserbedarf erhöht die den spezifischen Gesamtwärmebedarf um 15 bis 20 kWh/m^2 für alle betrachteten Gebäudetypen. Der genaue Wert ist abhängig von der Personenbelegung.

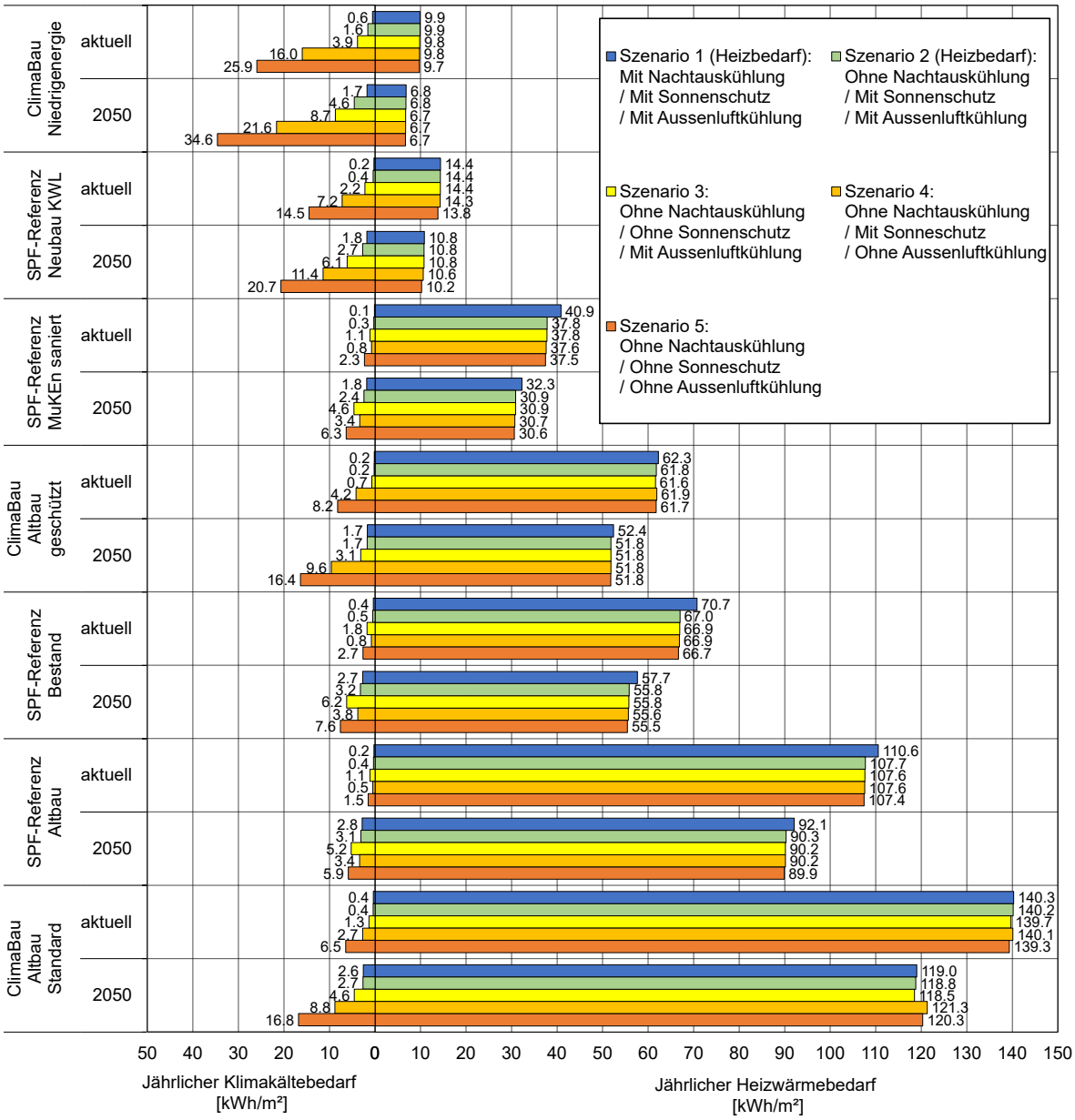


Abbildung 20: Simulationsergebnisse für ein ideales Heiz- und Kühlsystem mit Wärmeschutzmassnahmen und extremen Szenarien. Wärmebedarf nur für Raumheizung.

In Abbildung 20 wurden die Simulationsergebnisse der Szenarien mit einem idealen Heiz- und Kühlsystem dargestellt. Nun wird der Einfluss der unterschiedlichen Heiz- und Kühlsysteme auf die aufzuwendende Kühlenergie und die entstehenden Überhitzungsstunden untersucht.

4.1.3 Abhängigkeit der aufzuwendenden Kühlenergie

Jedes der aufgeführten Kühlsysteme dient dazu, die Temperaturen im Raum innerhalb eines angenehmen Bereichs zu halten (Kapitel 3.1.1). In Abbildung 21werden die Klimakältebedarfswerte unterschiedlicher Abgabesysteme für ausgewählte Szenarien des «SPF Referenz Neubau KWL» Gebäudes miteinander verglichen. Beim «idealen System»

(blaue Balken inAbbildung 21) wird zu jedem Zeitpunkt genau die Energiemenge abgeführt, die zur Einhaltung der Temperaturobergrenze nötig ist. Die aufzuwendende Energie für Kühlen ist daher minimal. Beim System «Heiz-/Kühldeckensegel» (orange Balken) und beim System «Bodenkühlung mit Zuluftkühlung» (graue Balken) ist die aufzuwendende Energie leicht erhöht. Zusätzlich werden auch die Werte für ein System «Bodenkühlung mit Aussenluftvorkühlung und -entfeuchtung» nach Kriesi[4] angegeben (gelbe Balken). Diese Variante entzieht die Energie auch aus der Aussenluft, wodurch die abgeführte Kühlenergie, welche zur Regeneration eingesetzt werden kann, wesentlich höher ist.

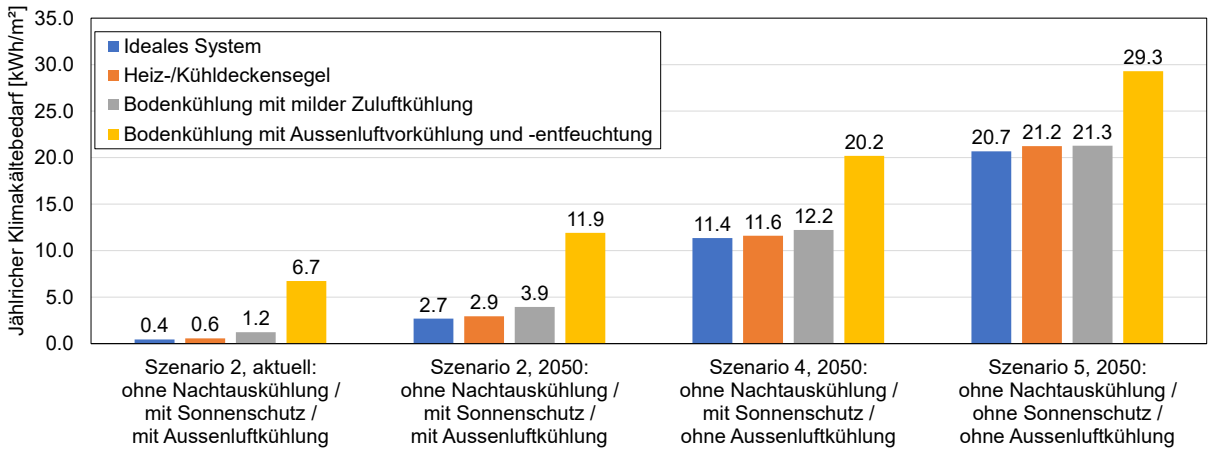


Abbildung 21: Jährlicher Kühlbedarf bei den vordefinierten HLK-Systemen für das Gebäude «SPF-Referenz-Neubau KWL»

4.1.4 Abhängigkeit des Komforts vom Kühlsystem

Der Komfort im Sommer wird durch die Anzahl der Überhitzungsstunden quantifiziert. In allen betrachteten Systemen kann der Komfort zu jeder Zeit eingehalten werden. Die empfundene Raumtemperatur ist zu jedem Zeitpunkt < 26.5. °C (Abbildung 22). Die Anzahl der Stunden in den verschiedenen Temperaturintervallen < 26.5 °C variiert jedoch. Das «ideale System» mit seiner perfekten Regelung hält sich an heissen Sommertagen sehr genau an die Grenztemperatur von 26.5°C und es treten daher mehr Stunden im Bereich 25.5 °C und 26.5 °C auf. Die anderen Systeme mit ihrer intrinsischen Trägheit und realistischen Regelung entziehen dem Raum zeitweise mehr Wärme als nötig wäre und es treten dadurch vermehrt tiefere Temperaturen auf. Dadurch wird mehr Energie zum Kühlen benötigt (Abbildung 21 im vorherigen Kapitel). Um die Raumtemperaturen bei Systemen mit Fussbodenkühlung unterhalb der Grenztemperatur zu halten, bräuchte es fürs «Szenario 5, 2050» eine Aktivierung des Sonnenschutzes bei 26 °C.

Die Auswertung der tagesmittleren Raumluftfeuchte für die gleichen Simulationsszenarien ist in Abbildung 23 dargestellt. Hier kann festgestellt werden, dass die HLK-Systeme «Ideales System», «Heiz-/Kühldeckensegel» und «Bodenkühlung mit Zuluftkühlung» für mehrere Tage (30 bis 60 je nach System und Simulationsszenario) eine höhere tagesmittlere Raumluftfeuchte (bis 75 %) aufweisen. Der Grund dafür liegt am Mangel der Zuluftentfeuchtung bei diesen Systemen. Im Fall des HLK-Systems «Bodenkühlung mit Aussenluftvorkühlung und -entfeuchtung» lässt sich die tagesmittlere Raumluftfeuchte im Sommerhalbjahr unter 60 % reduzieren. Bei diesem System sind jedoch einzelne Tage mit der

tagesmittleren Raumluftfeuchte über 60 % für «Szenario 2, aktuell» und «Szenario 2, 2050» vorhanden. Der Grund dafür ist, dass in den Szenarien die den Nutzern auch Fensterlüftung erlaubt ist (siehe Kapitel 3.1.4), was die feuchte Aussenluft ohne Abkühlung in den Raum lässt.

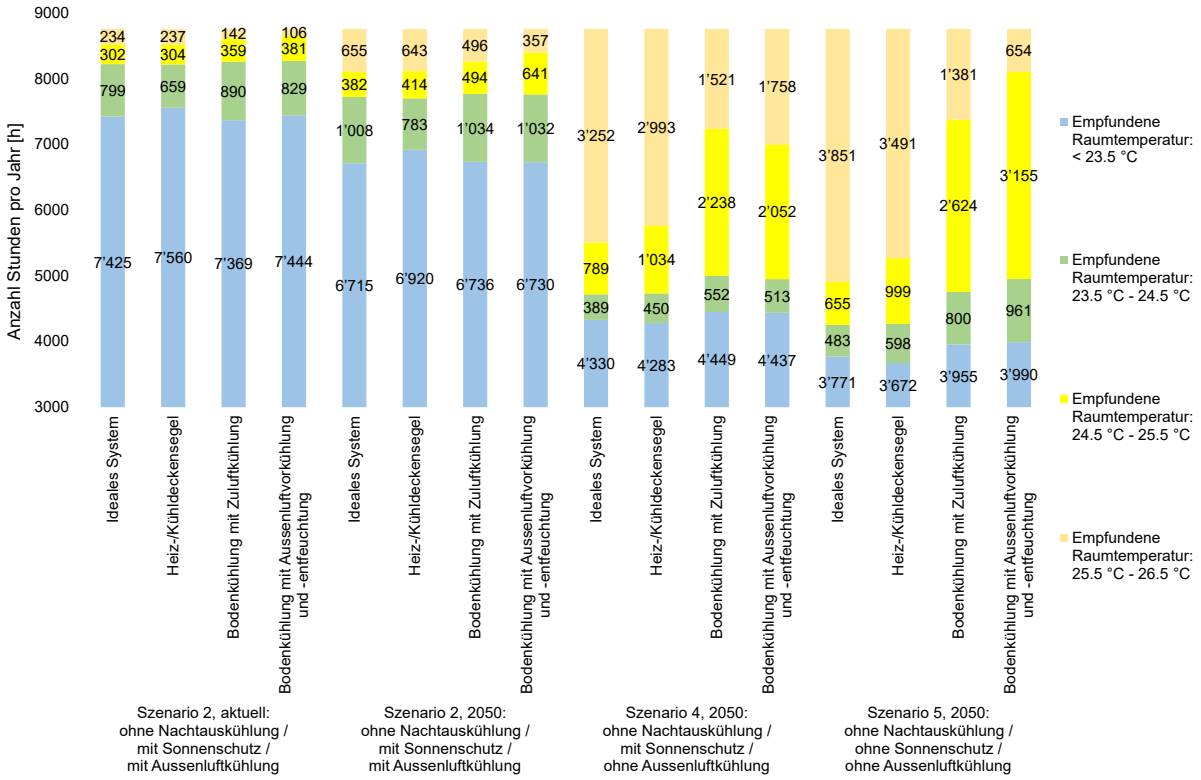


Abbildung 22: Anzahl der Überhitzungsstunden pro Jahr bei den vordefinierten HLK-Systemen für das Gebäude «SPF-Referenz-Neubau KWL».

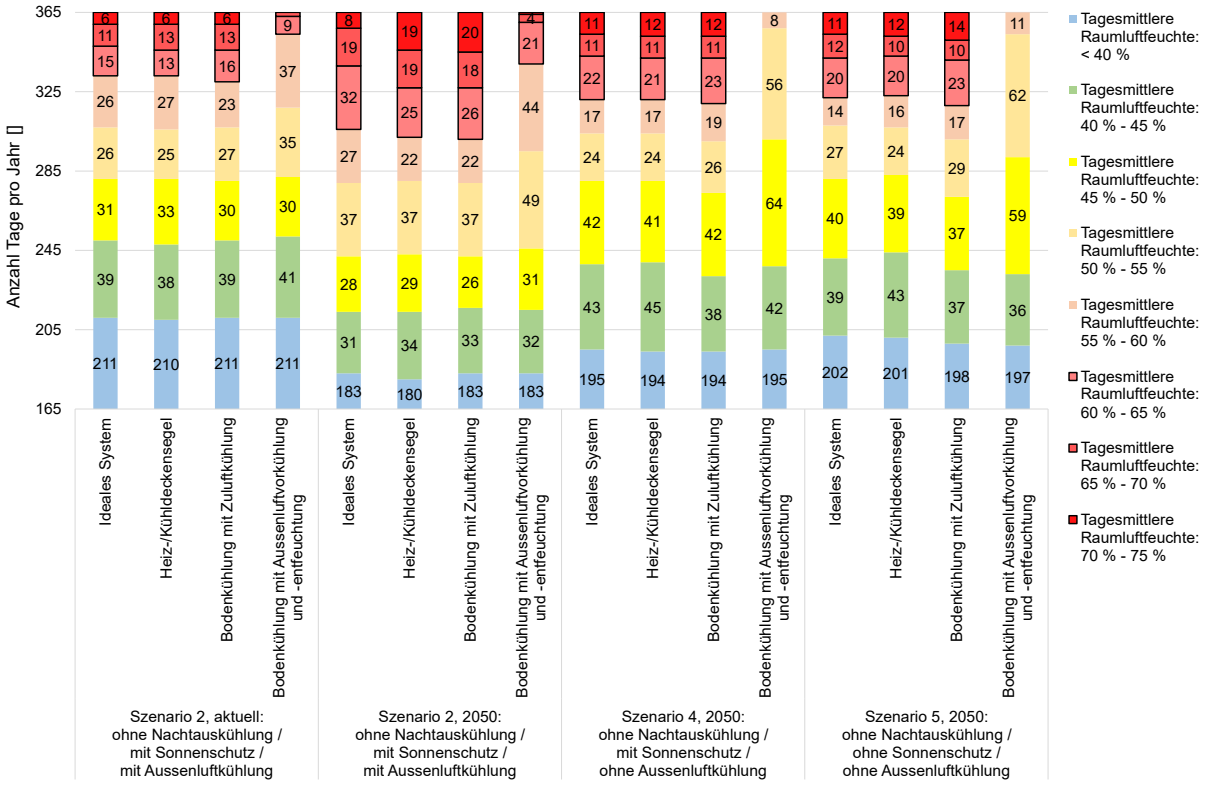


Abbildung 23: Anzahl der Tage pro Jahr je nach tagesmittlerer Raumluftfeuchte bei den vordefinierten HLK-Systemen für das Gebäude "SPF-Referenz-Neubau KWL".

4.1.5 Abhängigkeit des Heiz- und Kühlbedarfs von den internen Lasten

Im Merkblatt SIA 2024:2015[11] werden spezifische Leistungen und Energien für die Kategorien «Standerdwert», «Zielwert» und «Bestand» angegeben, wobei hier grundsätzlich die Standardwerte verwendet wurden. Um die Sensitivität des Heiz- und Kühlbedarfs gegenüber variablem Nutzerverhalten und internen Lasten zu prüfen, wurde für ausgewählte Konfigurationen mit zusätzlichen internen Lasten simuliert. Zusätzlich zum «Standardwert» der SIA 2024 wurden auch die Verluste von «Zielwert» und «Bestandwert» verwendet (Abbildung 22). In den Szenarien mit erhöhtem Kühlbedarf (4 und 5) ist auch der Einfluss der internen Lasten auf den Kühlbedarf erhöht und kann den Kühlbedarf um bis zu 40 verändern.

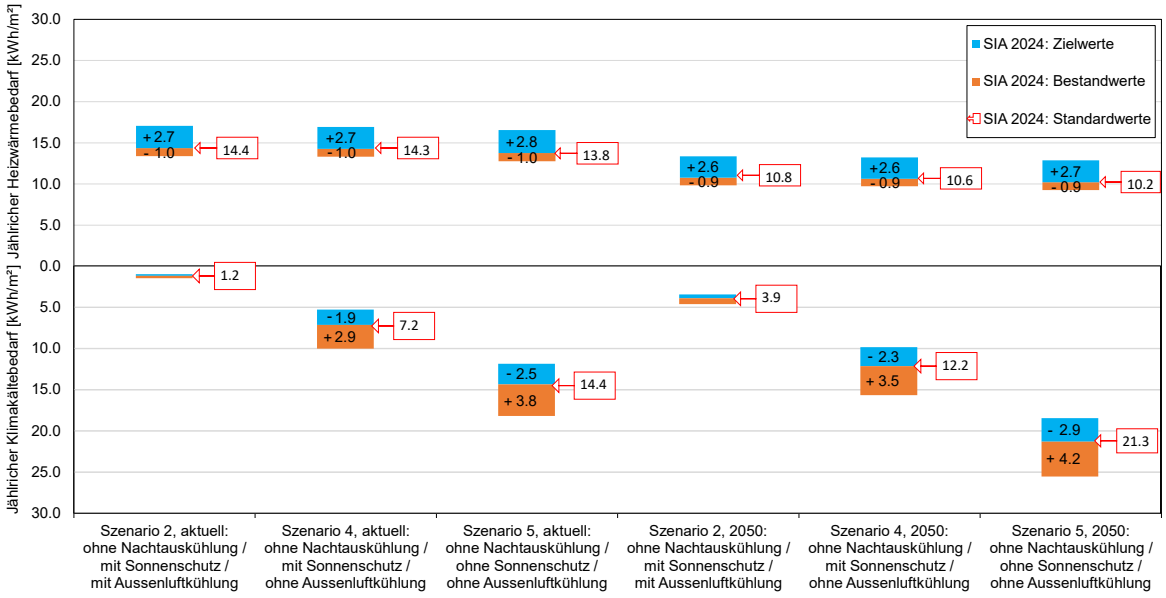


Abbildung 24: Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Kühl- und Wärmebedarf.

Gemäss der Abbildung 24 ändert sich der Heizwärmebedarf mit der Änderung der internen Lasten innerhalb von -7 % bis +19 % für Klimadaten «Meteonorm aktuell» und innerhalb von -9 % bis 26 % für Klimadaten «Meteonorm 2050» gegenüber dem Bedarf mit internen Lasten nach «Standardwerten». Der Einfluss von internen Lasten auf den Klimakältebedarf ist vom Szenario der sommerlichen Wärmeschutzmassnahmen abhängig, aber bleibt zwischen -26 % bis 40 %.

4.2 Ergebnisse Wärmeerzeugung

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den durchgeführten Systemsimulationen gemäss Kapitel 3.2.1 ausgewiesen. Die detaillierten Polysun-Simulationen wurden nicht für alle Gebäudetypen, mit zum Teil ähnlichen Wärme- und Kühlbedarfen, sondern nur für die beiden Gebäude «SPF-Referenz Neubau KWL» und «SPF-Referenz Bestand» durchgeführt. Durch die Variation der Wärmeschutzmassnahmen und der Klimaszenarien konnte mit diesen beiden Gebäudetypen eine grosse Bandbreite an Kühlbedarfen und Regenerationsgraden abgedeckt werden. Sämtliche Energiebilanzen im nachfolgenden Kapitel beziehen sich auf den Endenergiebedarf der jeweiligen Gebäude und Szenarien.

4.2.1 Energiebilanzierung Wärme- und Kältebedarf

Wie Abbildung 25 zu entnehmen ist, zeigt sich für Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL im «Szenario 2, aktuell» in den Wintermonaten ein höherer Wärmebedarf als im «Szenario 5, 2050». Der Kältebedarf bei Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen steigt in den Sommermonaten für den Monat Juli von rund 600 kWh aktuell auf über 6’000 kWh in 2050 an.

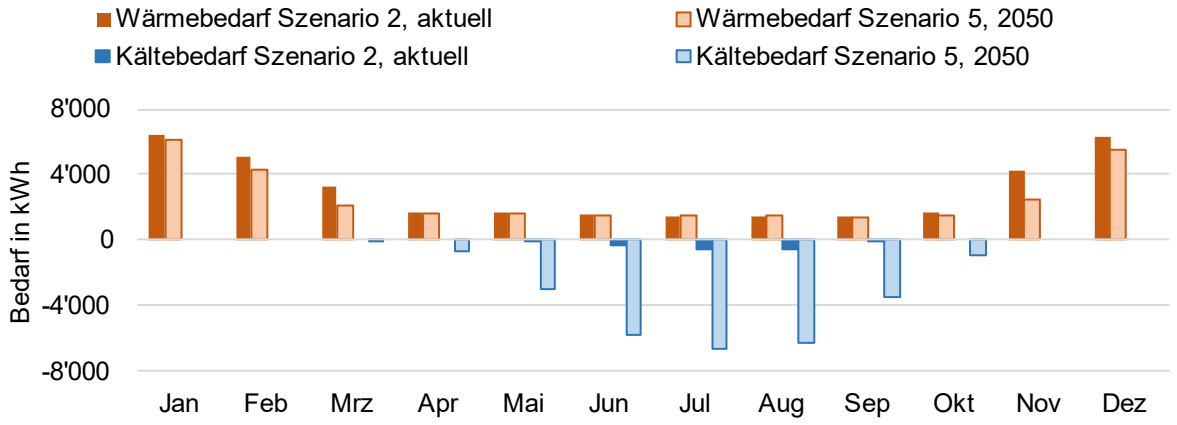


Abbildung 25: Abbildung des Heizwärme- (positiv) und Kältebedarfes (negativ) für das Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL im «Szenario 2, aktuell» und im «Szenario 5, 2050» als Monatsbilanz.

Für das Gebäude SPF-Referenz Bestand (Abbildung 26) zeigt sich ein differenziertes Bild. Es dominiert von der Gesamt-Energiemenge der Wärmebedarf gegenüber dem Kältebedarf. Zwar steigt der Kältebedarf im Monat Juli auch von 300 kWh auf 5’000 kWh, bleibt jedoch in Relation zum Wärmebedarf viel kleiner. Aus der Betrachtung der Relation von Wärme- zu Kältebedarf kann auch für die Zukunft ein wesentlich kleineres Regenerationspotential bei diesem Gebäudetyp prognostiziert werden, so lange keine umfassende wärmetechnische Sanierung (Wärmedämmung Hülle) realisiert werden kann.

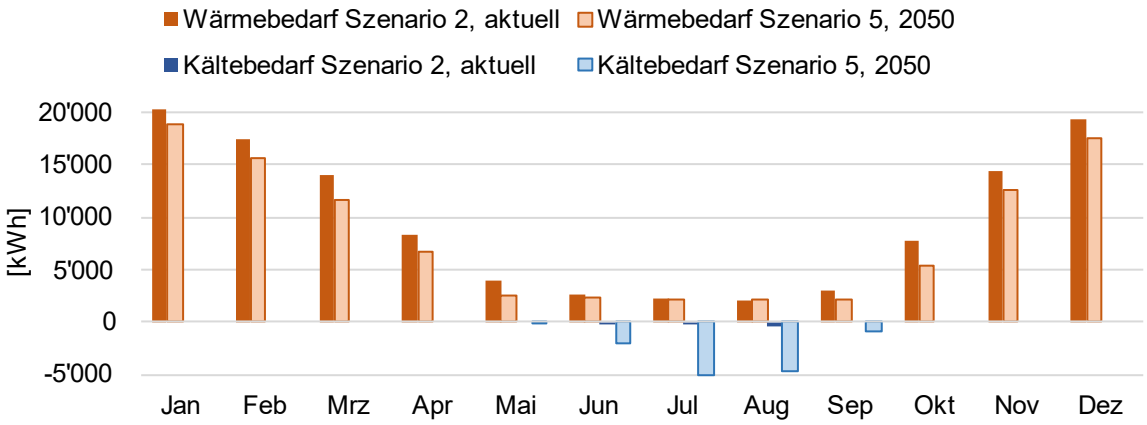


Abbildung 26: Abbildung des Heizwärme und Kältebedarfes für das Gebäude SPF-Referenz Bestand im «Szenario 2, aktuell» und «Szenario 5, 2050» als Monatsbilanzen.

4.2.1 Temperaturen in den Erdwärmesonden

Die Abbildung 27 zeigt Kennwerte zu den Temperaturen im Erdsondenkreislauf im «Szenario 5, 2050» (hoher Kältebedarf) für das Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL. Da der grösste Anteil der entzogenen Wärmeenergie jeweils in den Sommermonaten regeneriert wird, zeigt sich bezüglich der mittleren Erdsondentemperatur (Mittelwert zwischen Ein- und Austritt) auch über 50 Jahre kein Absinken der Erdsondentemperatur. Die Erdsonde wird in den Sommermonaten mit Temperaturen von bis zu 34.5 °C (Maximalwert) beladen. Im Winter fällt der EWS-Austritt auf minimal 1.3 °C. Diese Temperatur liegt also fast 3 K über der nach SIA 384/6[2] zulässigen Minimaltemperatur von -1.5 °C. Die Betriebstemperaturen der Erdsonden wurden (mit Ausnahme vom Mittelwert) zur besseren Übersicht nur für das 50. Simulationsjahr abgebildet.

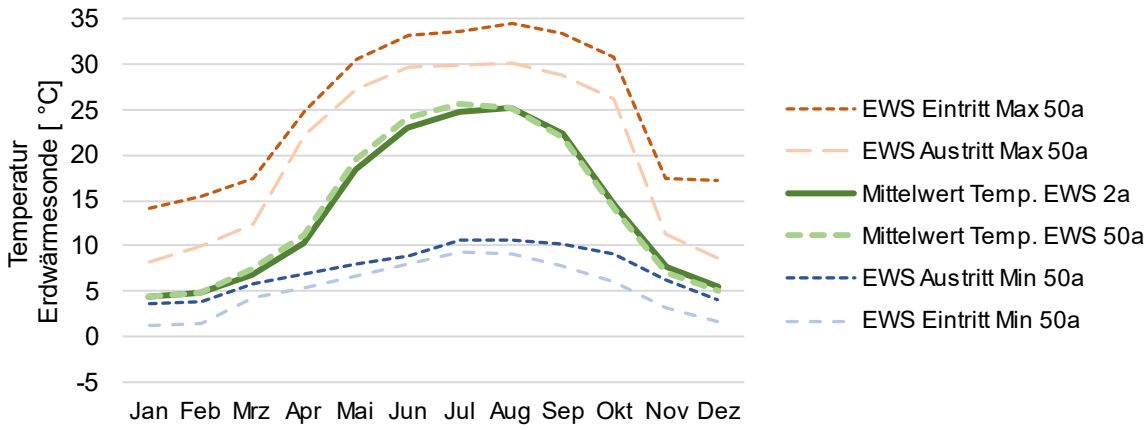


Abbildung 27: Kennwerte der Erdsondentemperaturen für das «Szenario 5, 2050» Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL. (2a = Ergebnisse im zweiten Simulationsjahr, 50a = Ergebnisse im 50. Simulationsjahr).

Für das «Szenario 2, aktuell» (tiefer Kältebedarf,Abbildung 28) zeigt sich über die Betrachtung von 50 Betriebsjahren eine Auskühlung des Erdreiches, resp. eine Absenkung der Mittleren

Erdsondentemperatur. Die Mittlere Erdsondentemperatur (Jahresmittel) fällt über 50 Simulationsjahre um rund 2.3 K ab. Die maximale Regenerationstemperatur im Sommer erreicht 25.8 °C und ist somit wesentlich tiefer als im Szenario 5, 2050.

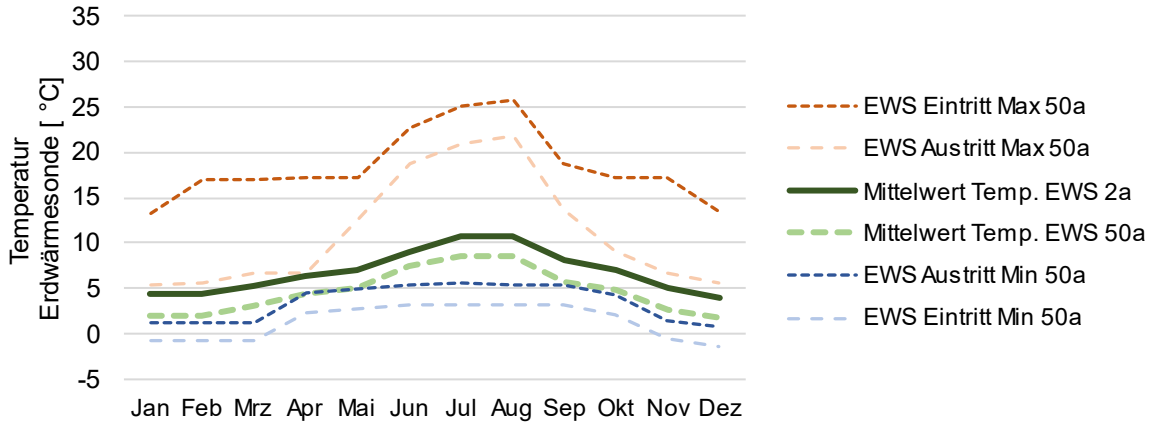


Abbildung 28: Kennwerte der Erdsondentemperaturen für das «Szenario 2, aktuell» Gebäude SPF Referenz-Neubau KWL. (2a = Ergebnisse im zweiten Simulationsjahr, 50a = Ergebnisse im 50. Simulationsjahr).

In Abbildung 29 und Abbildung 30 sind die Temperaturen im Erdsondenkreislauf für das Gebäude SPF-Referenz Bestand abgebildet. Wie in Abbildung 26 ersichtlich, ist bei diesem Gebäude der Kältebedarf im Vergleich zum Wärmebedarf auch unter Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen viel kleiner. Da in diesem Gebäude der Regenerationsgrad tiefer ist, zeigt sich in Abbildung 29 für «Szenario 5, 2050» ein Absinken der mittleren Erdsondentemperatur. Da die maximale Erdsondentemperatur im Sommer auf nur wenig mehr als 20 °C steigt, wäre zu prüfen, ob der Kältebedarf auch über ein Freecooling zur Verfügung gestellt werden könnte.

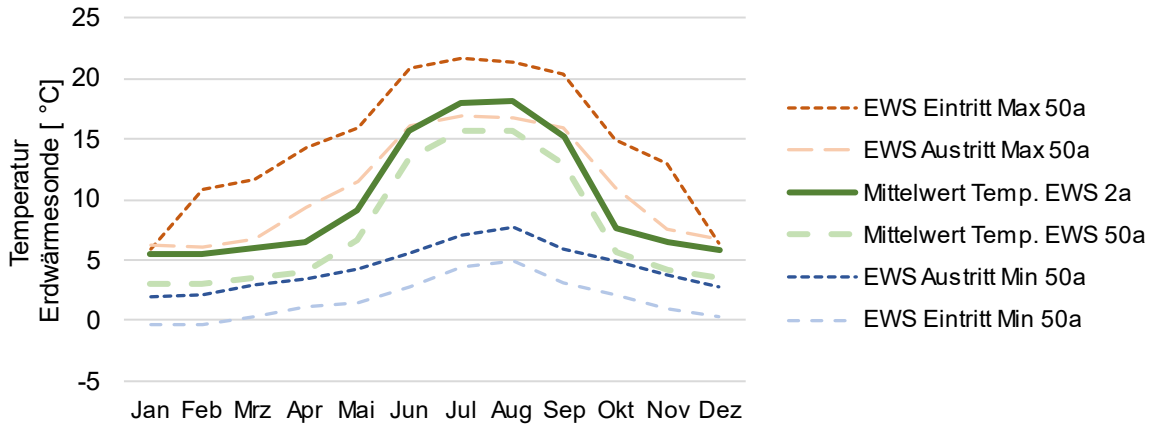


Abbildung 29: Kennwerte der Erdsondentemperaturen für das «Szenario 5, 2050» Gebäude SPF-Referenz Bestand. (2a = Ergebnisse im zweiten Simulationsjahr, 50a = Ergebnisse im 50. Simulationsjahr).

Im «Szenario 2 aktuell» zeigt sich für das Gebäude SPF Referenz Bestand, dass die Maximale Erdsondentemperatur bis auf 16.6 °C ansteigt (Abbildung 30). Der Regenerationsgrad in

diesem Szenario beträgt lediglich 1 %. Entsprechend läuft das Gerät zur aktiven Kühlung nur während weniger Stunden im Jahr. In diesem Fall wäre es vermutlich die einfachere Lösung, die Regeneration der Erdsonde über ein Freecooling zu lösen. Die nach SIA 384/6[2] zulässigen minimale Sondenmitteltemperatur von -1.5 °C wird in diesem Szenario annähernd erreicht.

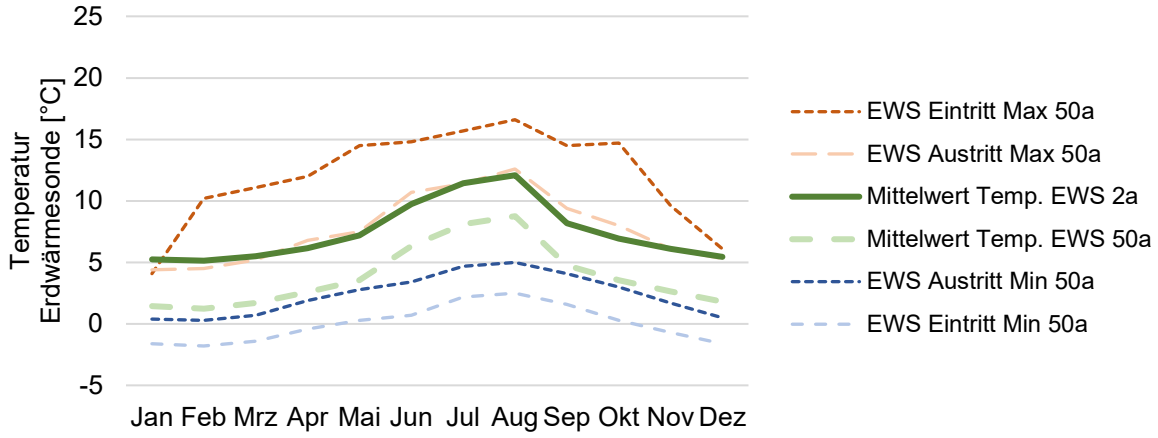


Abbildung 30: Kennwerte der Erdsondentemperaturen für das «Szenario 2, aktuell» Gebäude SPF Referenz Bestand. (2a = Ergebnisse im zweiten Simulationsjahr, 50a = Ergebnisse im 50. Simulationsjahr).

4.2.1 Jahresarbeitszahl und Regenerationsgrad

Neben der Energiebilanzierung und den Temperaturbetrachtungen gemäss vorhergehenden Abbildungen können aus den Simulationen auch Ergebnisse bezüglich der Monats- und Jahresarbeitszahl im Heiz- und Kühlbetrieb ausgewertet werden. Nachfolgend werden die Ergebnisse aus der Simulation des Gebäude SPF-Referenz KWL und des Gebäude SPF-Referenz Bestand visualisiert.

Für das Gebäude «SPF-Referenz KWL» im «Szenario 5, 2050» werden Monatsarbeitszahlen im Heizbetrieb (MAZ Heizen 2a) zwischen 4.19 bis 5.29 erreicht. Die Monatsarbeitszahlen sind in den Sommermonaten tiefer. Unter der Berücksichtigung, dass im Sommer vorwiegend Warmwasser auf höherem Temperaturniveau bereitgestellt wird, scheint dies plausibel. Die Arbeitszahlen im Kühlbetrieb im 2. Simulationsjahr (MAZ Kühlen 2a) sinken im Verlauf des Regenerationsbetriebes von 7.11 auf 5.10. Diese Reduktion der Arbeitszahl ist wohl ein Resultat des Anstiegs der Temperaturen in den Wärmesonden.

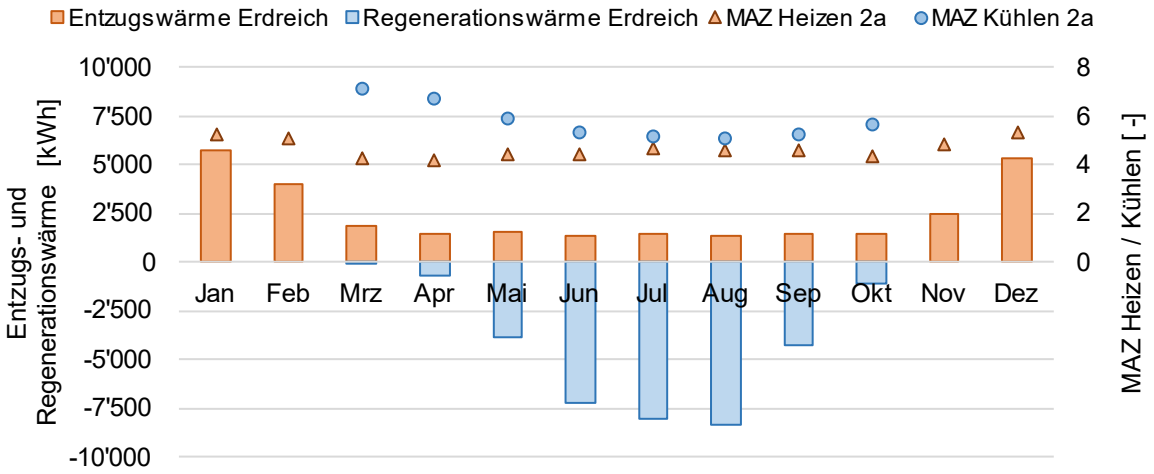


Abbildung 31: Effektive Entzugswärme / Regenerationswärme im Erdreich für das SPF-Referenz Neubau KWL im «Szenario 5, 2050» sowie die zugehörigen MAZ (Monatsarbeitszahl) Heizen/Kühlen im zweiten Simulationsjahr (2a).

Für das Gebäude «SPF-Referenz Altbau» im «Szenario 5, 2050» werden gemäss Abbildung 32 Monatsarbeitszahlen im Heizbetrieb (MAZ Heizen 2a) zwischen 4.19 bis 3.8 erreicht. Die Jahresarbeitszahlen sind in den Sommermonaten tiefer, unter der Berücksichtigung, dass im Sommer vorwiegend Warmwasser auf höherem Temperaturniveau bereitgestellt wird, scheint dies plausibel. Die Arbeitszahlen im Kühlbetrieb im 2. Simulationsjahr (MAZ Kühlen 2a) sinken im Verlauf des Regenerationsbetriebes von 7.0. auf 6.8. Im Gegensatz zum vorhergehenden Szenario wird hier jedoch wesentlich weniger Energie regeneriert.

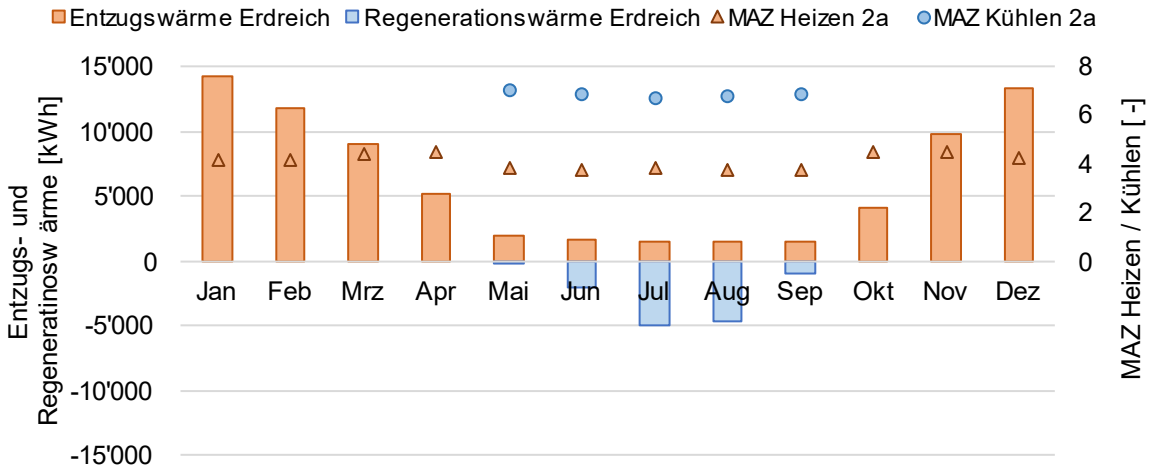


Abbildung 32: Effektive Entzugswärme / Regenerationswärme im Erdreich für SPF-Referenz Bestand im «Szenario 5, 2050» sowie die zugehörigen MAZ Werte (Montatsarbeitszahlen) Heizen/Kühlen im zweiten Simulationsjahr (2a).

Eine Übersicht der Jahresarbeitszahlen für Heizen und Kühlen, der Entzugs- und Regenerationsenergie der Erdwärmesonde sowie dem Regenerationsgrad für alle im Detail simulierten Szenarien kann Abbildung 33 und Abbildung 34 entnommen werden.

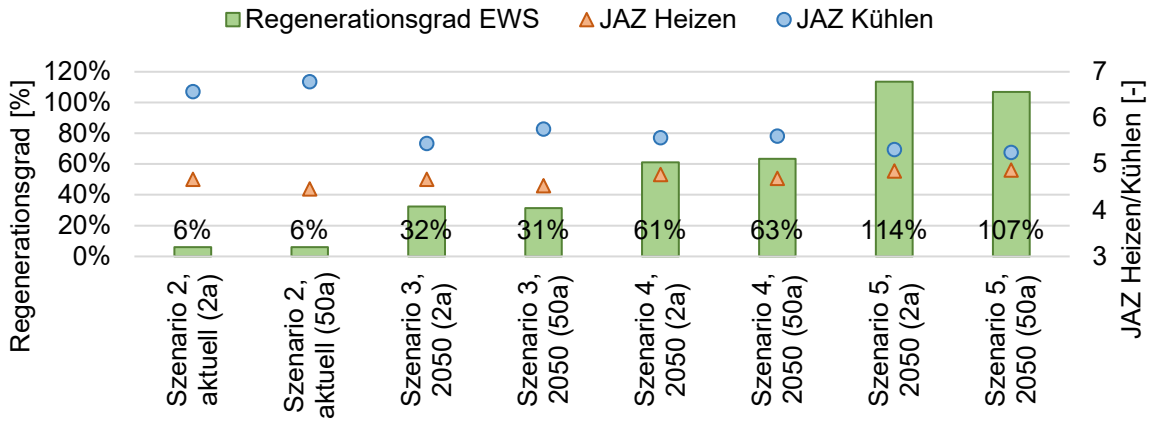


Abbildung 33: Regenerationsgrad SPF-Referenz Neubau KWL für alle betrachteten Szenarien. (2a = Ergebnisse im zweiten Simulationsjahr, 50a = Ergebnisse im 50. Simulationsjahr).

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass im untersuchten Neubau (SPF-Referenz Neubau KWL) durch den Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen der Regenerationsgrad über aktive Kühlung sehr hoch ist und im Maximalfall («Szenario 5, 2050») bis zu 114 % betragen kann. Im Bestandesgebäude (SPF-Referenz Bestand) ist das Potential wesentlich geringer. Auch beim Verzicht auf alle betrachteten passiven Wärmeschutzmassnahmen beträgt der Regenerationsgrad hier maximal 17 %. Es zeigt sich hier (SPF-Referenz Bestand, Szenario 5), dass sich die JAZ heizen leicht verschlechtert im Jahr 50, dafür die JAZ Kühlen leicht verbessert. Für das Jahr 2 und Jahr 50 scheinen sich die Effekte aufzuheben und es ergeben sich die gleichen Regenerationsgrade von jeweils 17%.

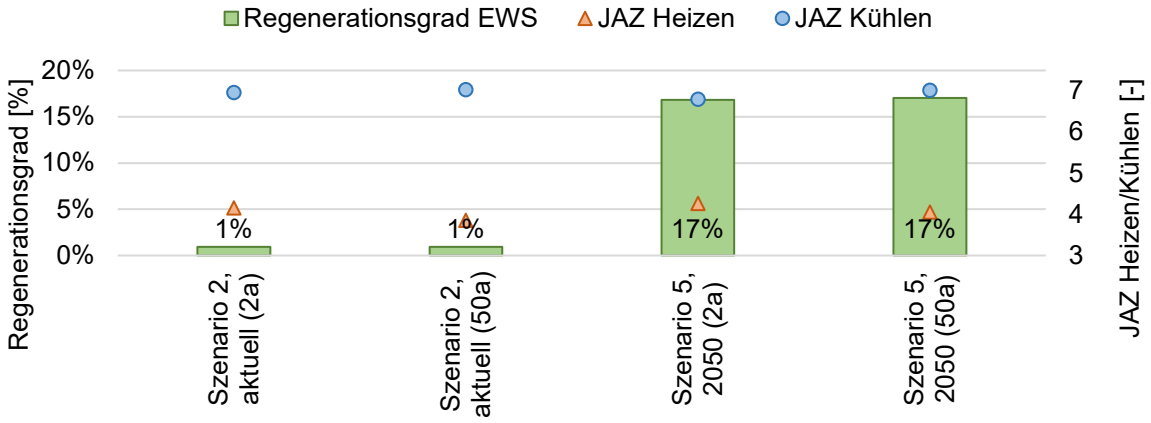


Abbildung 34: Regenerationsgrad SPF-Referenz Bestand alle Szenarien. (2a = Ergebnisse im zweiten Simulationsjahr, 50a = Ergebnisse im 50. Simulationsjahr).

4.3 Ergebnisse Quartieranalysen

Nachfolgendem Kapitel können die Resultate der Auswertung zum Kältebedarf und des Eigenstrombedarfes in den untersuchten Quartieren entnommen werden. Sämtliche Energiebilanzen im nachfolgenden Kapitel beziehen sich auf den Nutzenergiebedarf der jeweiligen Gebäude und Szenarien.

Mithilfe der in Kapitel 3.3.1 definierten Methodik wurde jedem Gebäude im Quartier ein Referenzgebäude zugeordnet. Der Abbildung 35 kann eine unter Verwendung von ArcGIS 10.6 aufbereitete Visualisierung des resultierenden Kältebedarfes für das «Szenario 2, aktuell» für ein Teilgebiet des Untersuchungsgebietes Hottingen entnommen werden. Wie in der Karte ersichtlich, wird jedem Gebäude im Quartier basierend auf der Energiekennzahl Heizen ein Kältebedarf zugeordnet werden.

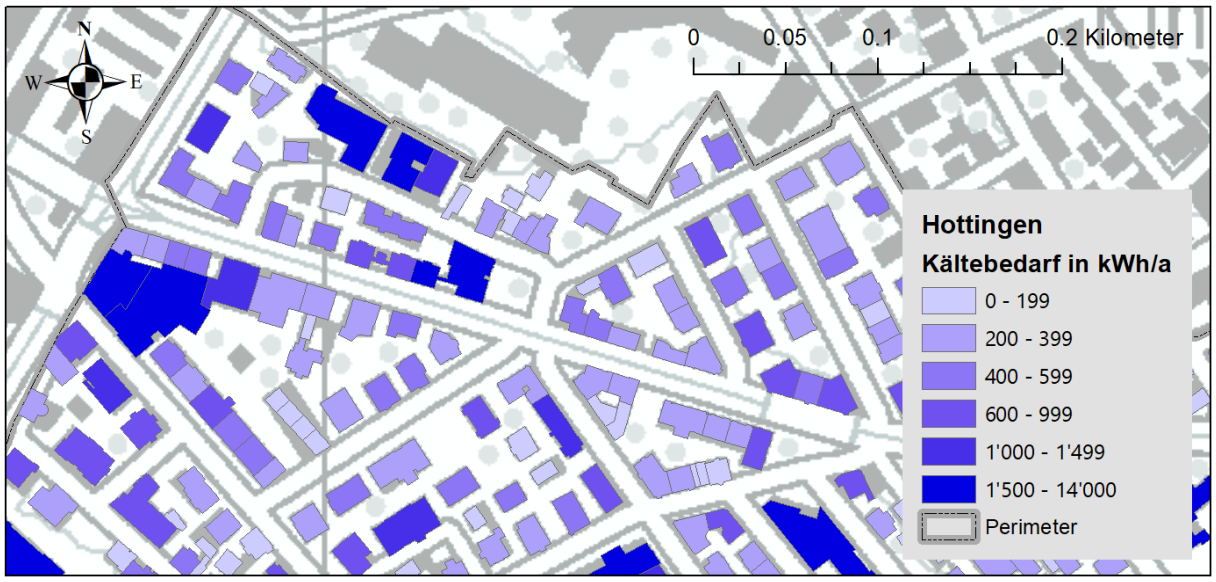


Abbildung 35: Ausschnitt Untersuchungsgebiet Hottingen, Kältebedarf 2020, Szenario 2, aktuell.

In der nachfolgende Tabelle 12 werden die aufsummierten Werte des Kältebedarfes auf Quartierebene ausgewiesen. Wie zu erwarten, zeigen sich für das «Szenario 5, 2050» bei welchem auf passive Wärmeschutzmassnahmen verzichtet wurde, wesentlich höhere Bedarfswerte als im «Szenario 2, aktuell». Den höchsten Kältebedarf im aktuellen Zustand wie auch im Szenario 2050 weist das Gebiet Hottingen aus. Da dies auch das (flächenmässig) grösste untersuchte Gebiet ist, scheint dies plausibel. Die tiefsten Bedarfszahlen ergeben sich für das (flächenmässig) kleinste untersuchte Gebiet Käferholz.

Tabelle 12: Übersicht Kältebedarf Szenario 2, aktuell und 5, 2050 auf Quartierebene.

		Binz	Hottingen	Käferholz	Südquartier
Kältebedarf Szenario 2, aktuell	MWh	288	480	30	195
Kältebedarf Szenario 5, 2050	MWh	1’537	13’572	771	3’582

Mit der Auswertung des Kühlbedarfes gemäss Kapitel 3.1 und der Überschussproduktion aus dem möglichen PV-Produktionspotential gemäss Kapitel 3.2 ist es möglich, auf Stundenwertbasis eine Gegenüberstellung von Produktion und Verbrauch auf Quartierebene zu tätigen.

Der Tabelle 13 kann eine Gegenüberstellung der relevanten Kennwerte in Bezug auf den Eigendeckungsgrad mit lokal produziertem PV-Strom für das betrachtete «Szenario 2, aktuell» entnommen werden. Der höchste Deckungsgrad durch direkt lokal erzeugten PV-Strom zeigt sich für das RJ Südquartier mit 88 % und der tiefste Wert für das Gebiet Käferholz mit 83 %. Wird in der Auswertung auch der Haushaltsstrom berücksichtigt, sinkt der Deckungsgrad um 6-10 Prozentpunkte.

Tabelle 13: Auswertung der Kennzahlen zu Produktion und PV-Deckungsgrad mit und ohne Haushaltsstrom (HS) für alle betrachteten Quartiere im «Szenario 2, aktuell».

		Binz	Hottingen	Käferholz	RJ Südquartier
Produktion PV	MWh	25'450	40'535	3’364	20’541
Nutzenergiebedarf Kühlen	MWh	44	73	4	30
Deckungsgrad PV ohne HS	%	85	81	83	88
Bedarf Haushaltsstrom (HS)	MWh	3'309	11'931	920	3’833
Deckungsgrad PV inkl. HS	%	77	71	72	82

Der Tabelle 14 kann eine Gegenüberstellung der relevanten Kennwerte für das betrachtete «Szenario 5, 2050» entnommen werden. Der höchste Deckungsgrad durch direkt lokal erzeugten PV-Strom zeigt sich für das RJ Südquartier mit 80 % und der tiefste Wert für das Gebiet Käferholz mit 71 %. Der ausgewiesene Kühlbedarf ist in diesem Szenario um ein Vielfaches höher als im Szenario 2, aktuell. Wird in der Auswertung auch der Haushaltsstrom berücksichtigt, sinkt der Deckungsgrad um 5-10 Prozentpunkte.

Tabelle 14: Auswertung der Kennzahlen zu Produktion und PV-Deckungsgrad mit und ohne Haushaltsstrom (HS) für alle betrachteten Quartiere im «Szenario 5, 2050».

		Binz	Hottingen	Käferholz	RJ Südquartier
Produktion PV	MWh	25'450	40'535	3’364	20’541
Bedarf Kühlen	MWh	1’537	2’073	118	547
Deckungsgrad PV ohne HS	%	77	72	71	80
Bedarf Haushaltsstrom (HS)	MWh	3'309	11'931	920	3’833
Deckungsgrad PV inkl. HS	%	70	62	62	75

In der Ausarbeitung werden für Produktion PV und Bedarf Haushaltsstrom für die Jahre 2020 und 2050 die gleichen Werte angenommen. Der Kältebedarf, wie auch der zugehörige Netzbezug aufgrund von zusätzlichem Kühlbedarf, ist abhängig vom Szenario, wie in Kapitel 3.3.1 ausgeführt, unterschiedlich.

Eine graphische Darstellung der Verläufe dieser Kennwerte für drei Sommertage für ein Simulationsszenario wird in Abbildung 36 ausgewiesen. Wie daraus ersichtlich ist, liegt in den Tagesstunden die Produktion aus den PV-Anlagen um ein Vielfaches über dem notwendigen Bedarf zur Kühlung (Skalierung Primär- und Sekundärachse beachten). Jedoch zeigt sich, dass auch in den Abend- und Nachtstunden Kältebedarf anfallen kann. Aus diesem Grund können in dieser vereinfachten Betrachtung je nach Szenario noch 12-29 % des Elektrizitätsbedarfs für Kühlung (ohne Speicher, ohne Berücksichtigung Haushaltsstrom) nicht durch lokalen PV-Strom gedeckt werden. Durch den Einsatz von Kältespeichern, der Aktivierung der Gebäudemasse oder einer optimierten Regelung könnte die Deckungsrate wohl zusätzlich erhöht werden.

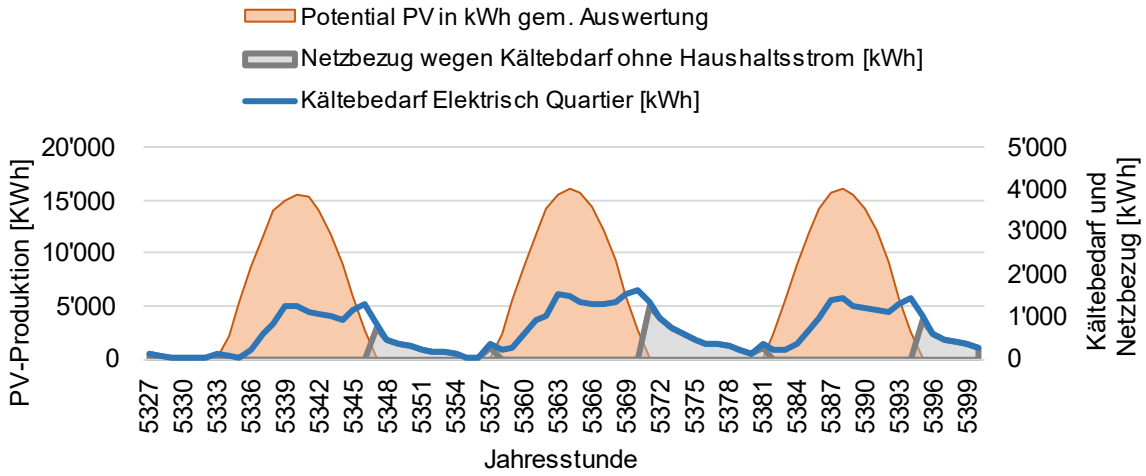


Abbildung 36: Auszug PV-Potential (Primärachse), Kältebedarf (Sekundärachse) und Netzbezug durch Kältebedarf (Sekundärachse) im Untersuchungsgebiet Binz «Szenario 5, 2050» für drei Beispieltage im Sommer.

4.4 Ergebnisse nachbarschaftliche Beeinflussung

4.4.1 Auskühlung mit regelmässigem Raster

Mit der in 3.4.1 erläuterten Methodik für sehr grosse regelmässige Sondenfelder, kann die Höhe der nachbarschaftlichen Auskühlung für unterschiedliche Entzugsdichten ausgerechnet werden. In der SIA 384/6[2] wird die Abhängigkeit der nachbarschaftlichen Auskühlung nach 50 Jahren von der Entzugsdichte im Quartier ebenfalls gegeben, ohne dabei auf Unterschiede aufgrund von verschiedenen Bohrtiefen einzugehen. Die in der SIA 384/6 gegebenen Werte wurden mit zwei Programmen (EWS und EED) mit einer gewissen Abweichung hergeleitet[34]. Die Berechnung mit EWS/hetag basiert auf einem regelmässigen Feld mit 48 Sonden à 200 m Tiefe, wobei für geringere Entzugsdichten einzelne Sonden des Feldes entfernt wurden. Mit dem angepassten semianalytischen Modell können sehr grosse Sondenfelder effizient berechnet werden, wobei auch der Einfluss von sehr vielen weit entfernten Sonden mit einbezogen wird. In Abbildung 37 wird die nachbarschaftliche Auskühlung nach 50 Jahren aus dem semianalytischen Modell (41x41=1681 Sonden) mit den Werten der SIA 384/6 verglichen (Parameter und Annahmen in Kapitel 3.4.1). Wenn deutlich mehr Sonden

berücksichtigt werden, zeigt sich eine etwas stärkere nachbarschaftliche Beeinflussung als in der SIA-Norm ausgewiesen wird. Für das regelmässige Feld mit 48 Sonden, wird mit dem semianalytischen Modell und mit EWS/hetag nahezu derselbe Wert berechnet (siehe: grünes und blaues Kreuz in Abbildung 37).

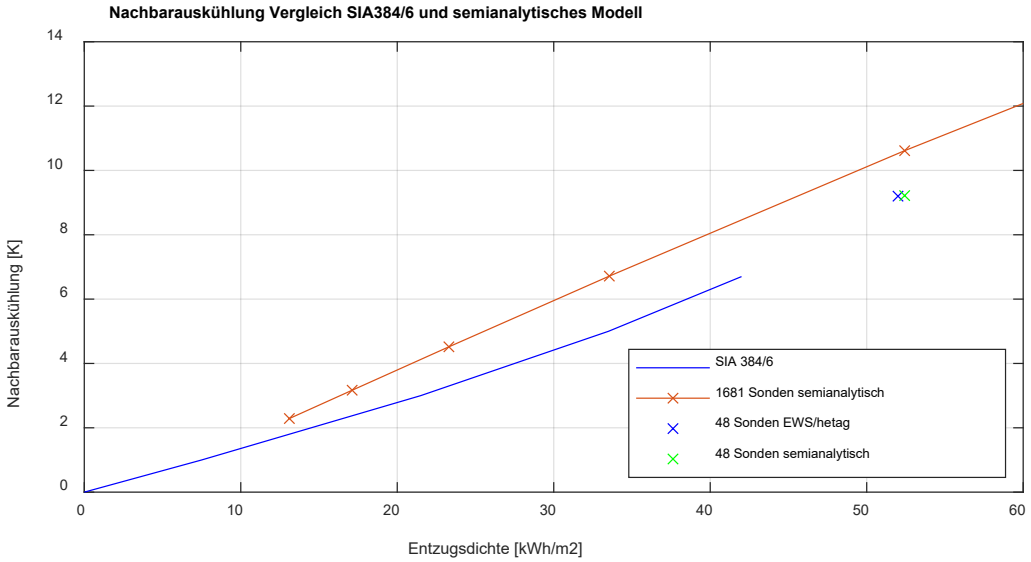


Abbildung 37: Vergleich Nachbarauskühlung nach SIA 384/6:2021 und berechnet mit dem semianalytischen Modell.

Eine Berechnung der Nachbarauskühlung mit anderen Sondenlängen wird in Abbildung 38 gezeigt. Bei kurzen Sonden ist die nachbarschaftliche Auskühlung deutlich stärker ausgeprägt. Bei einer Bohrtiefenbeschränkung auf 100 m muss also bereits ab einer flächenspezifischen Entzugsdichte von ca. 16 kWh/m^2 mit einer kritischen nachbarschaftlichen Auskühlung von mehr als 5 K (Schwellenwert ab welchem die SIA 384/6[2] Regeneration verlangt) gerechnet werden.

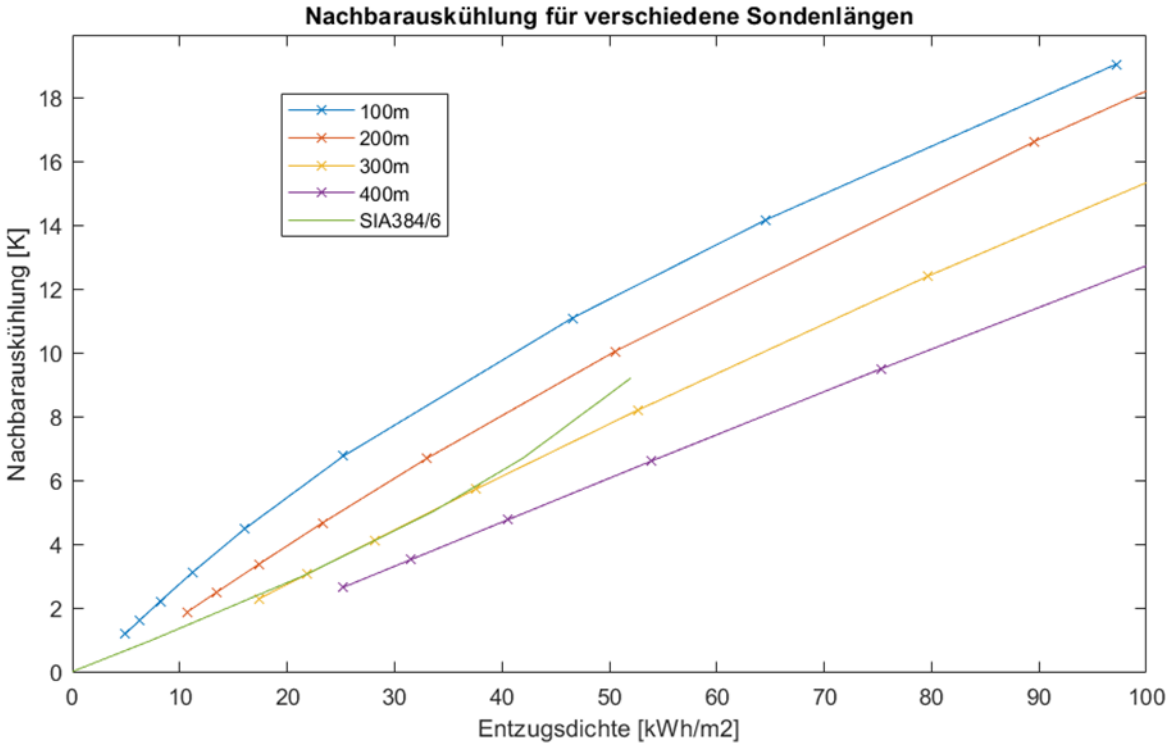


Abbildung 38: Vergleich Nachbarauskühlung nach 50 Jahren für unterschiedliche Sondenlängen, berechnet mit dem semianalytischen Modell.

Durch die Nachbarauskühlung nimmt die Temperatur in Untergrund ab und es können nur noch kleinere Entzugsleistungen erreicht werden, resp. es müssen längere oder mehr Sonden erstellt werden (Methodik und Formeln in Kapitel 3.4.1). Die Abnahme der spezifischen Entzugsleistung verhält sich dabei in einer ersten Näherung umgekehrt proportional zur benötigten Sondenlänge. Daher kann an Stelle der abnehmenden spezifischen Entzugsleistung auch die nötige Sondenverlängerung als Faktor angegeben werden. In den folgenden Grafiken in Abbildung 39 wird diese Sondenverlängerung als Funktion der flächenspezifischen Entzugsdichte in der Umgebung für unterschiedliche Sondenlängen angegeben. Wenn schon alleine durch die nachbarschaftliche Auskühlung die minimale Sondentemperatur von -1.5 °C angenähert oder gar überschritten wird (ab ca. 10-15 °C, je nach Standort und Sondenlänge), kann die nachbarschaftliche Auskühlung nicht mehr mit mehr Sondenmeter kompensiert werden. Die Sondenverlängerung steigt dabei sehr stark (Richtung unendlich) an und kann nicht mehr definiert werden. Bei einer Bohrtiefenbeschränkung auf 100 m geschieht dies bereits ab einer Entzugsdichte von ca. 25 kWh/m^2.

Diese Betrachtung wurde auch für unterschiedliche Regenerationsgrade in der Umgebung durchgeführt und jeweils in einem Diagramm dargestellt, wobei sich die im Diagramm angegebenen Entzugsdichten auf den ursprünglichen Wert ohne Regeneration beziehen. Effekte wie die Erhöhung der Durchschnittstemperatur bei längeren Sonden durch den geothermischen Gradienten werden nicht in diese Betrachtung mit einbezogen. Diese Grafiken können dazu verwendet werden, um typische Zusatzkosten aufgrund der nachbarschaftlichen Beeinflussung abzuschätzen.

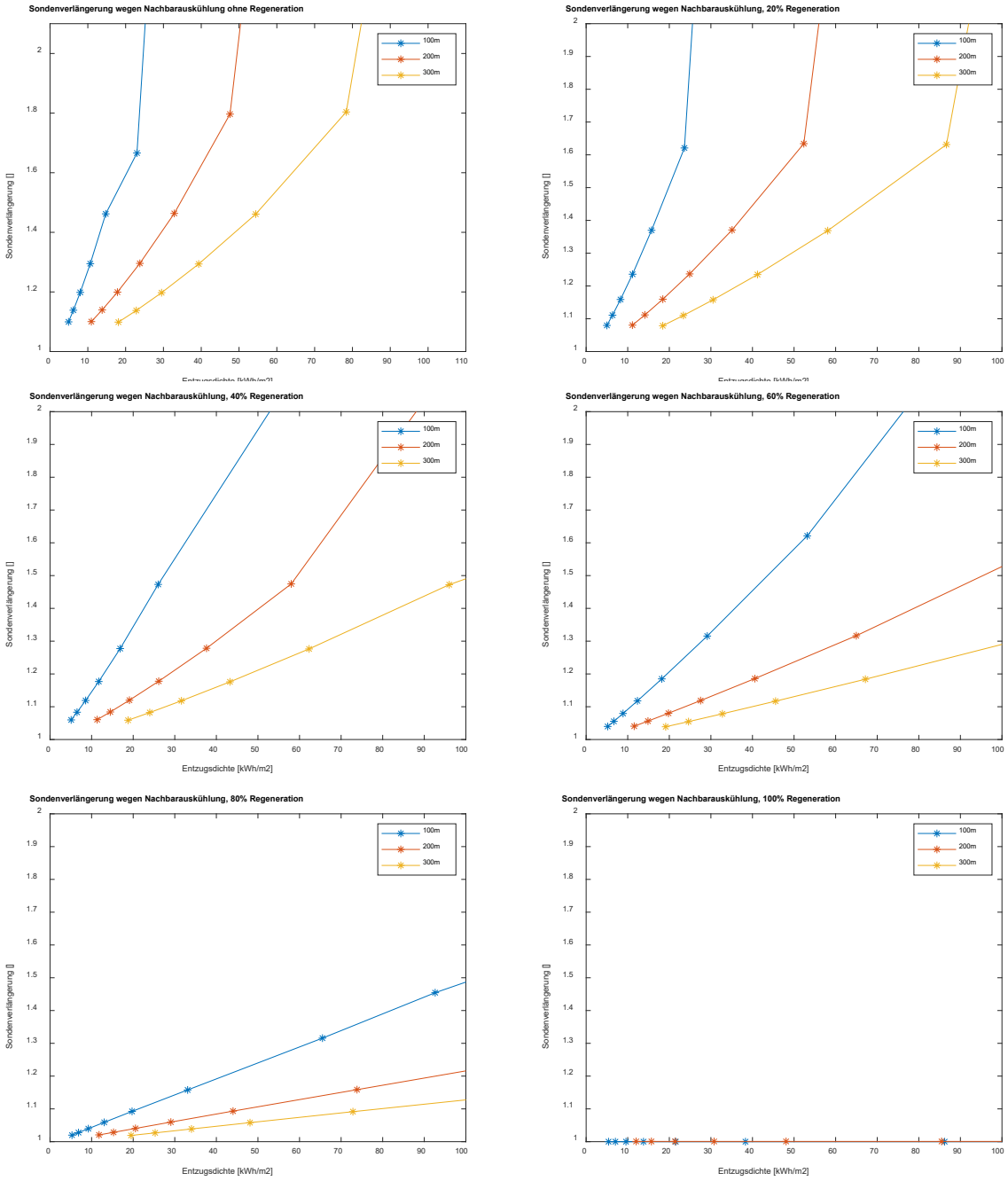


Abbildung 39: Sondenverlängerung aufgrund der nachbarschaftlichen Beeinflussung als Funktion der flächenspezifischen Entzugsdichte und für unterschiedliche Regenerationsgrade, bezogen auf die Entzugsdichte ohne Regeneration.

4.4.2 Auskühlung in den Beispielquartieren

Um die mögliche gegenseitige Beeinflussung von EWS in Quartieren abzuschätzen, wurden die Zürcher Quartiere Käferholz, Hottingen und Binz sowie das Südquartier von Rapperswil-Jona betrachtet. Als Maximalszenario wurde angenommen, dass die ganze Wärme- und

Kälteversorgung auf Wärmepumpen mit Erdwärmesonden umgestellt wird. Mit der oben beschriebenen Methode wurde der Effekt der nachbarschaftlichen Beeinflussung für alle Quartiere berechnet. In Abbildung 40 wird dieser Nachbareffekt für jede Parzelle, resp. jedes referenzierte Gebäude, und für das regelmässige umgebende Raster im Quartier Binz dargestellt. Die jeweiligen Abbildungen für die anderen Quartiere sind im Annex gegeben. Die Farbskala gibt die Auskühlung nach 50 Betriebsjahren mit dem Wärmebedarf von 2050 wieder. Dabei wird lediglich der "Nachbareffekt" wiedergegeben, aber noch nicht der auskühlende Effekt einer Einzelanlage auf sich selber. Der Effekt der Auskühlung einer Anlage «auf sich selber» ist bei Anlagen welche aus einer Einzelsonde bestehen gering, hängt aber bei Anlagen welche selber bereits aus Sondenfeldern bestehen sehr stark von der Feldkonfiguration ab und kann daher hier nicht in einer generalisierten Form aufgezeigt werden. Dazu müsste für jede Anlage eine individuelles Sondenfeld ausgelegt werden. Alleine durch den Nachbareffekt würden die meisten Anlagen bei einem vollständigen Umstieg der Wärmeversorgung auf Erdwärmesonden eine nachbarschaftliche Auskühlung von deutlich mehr als 5 K erfahren. Ab 5 K Auskühlung wird nach SIA 384/6[2] eine Regeneration vorgeschrieben, und im Bereich von 1-5 K muss die nachbarschaftliche Beeinflussung berücksichtigt werden (längere Auslegung der Sonden oder Regeneration). Das hier hypothetisch berechnete Maximalszenario könnte also nicht umgesetzt werden.

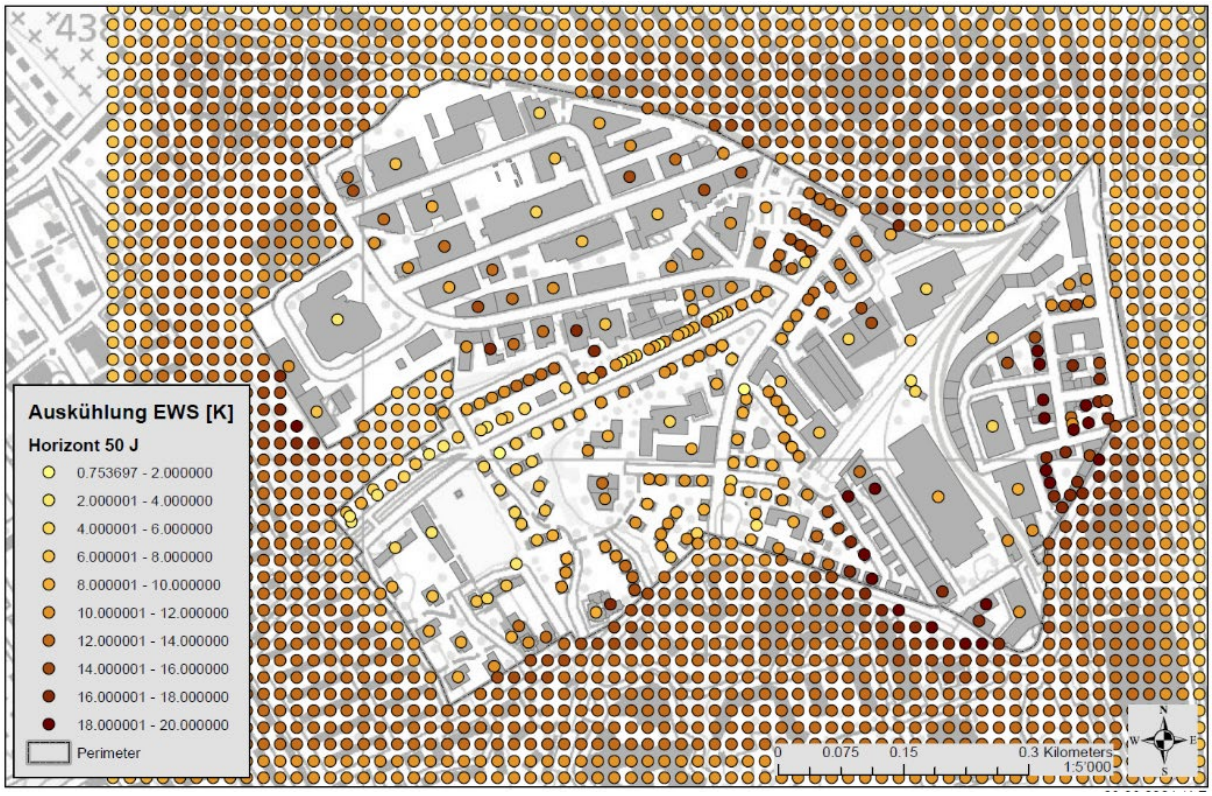


Abbildung 40: Binz: Nachbareffekt nach 50 Jahren unter der Annahme, dass alle Gebäude mit EWS beheizt werden.

In Abbildung 41 wird die Verteilung dieser Nachbareffekte nach 50 Betriebsjahren als Balkendiagramm dargestellt, sowohl für den aktuellen Wärmebedarf als auch für den

prädiktiven Wärmebedarf von 2050. Auch hier wird lediglich die Auskühlung durch Nachbarsonden gezeigt. Dabei wird deutlich, dass die nachbarschaftliche Auskühlung von Objekt zu Objekt sehr stark variiert. Einige Parzellen erfahren fast keine nachbarschaftliche Auskühlung. Andererseits gibt es Parzellen, bei denen eine unrealistische nachbarschaftliche Auskühlung von mehr als 15 K berechnet wird.

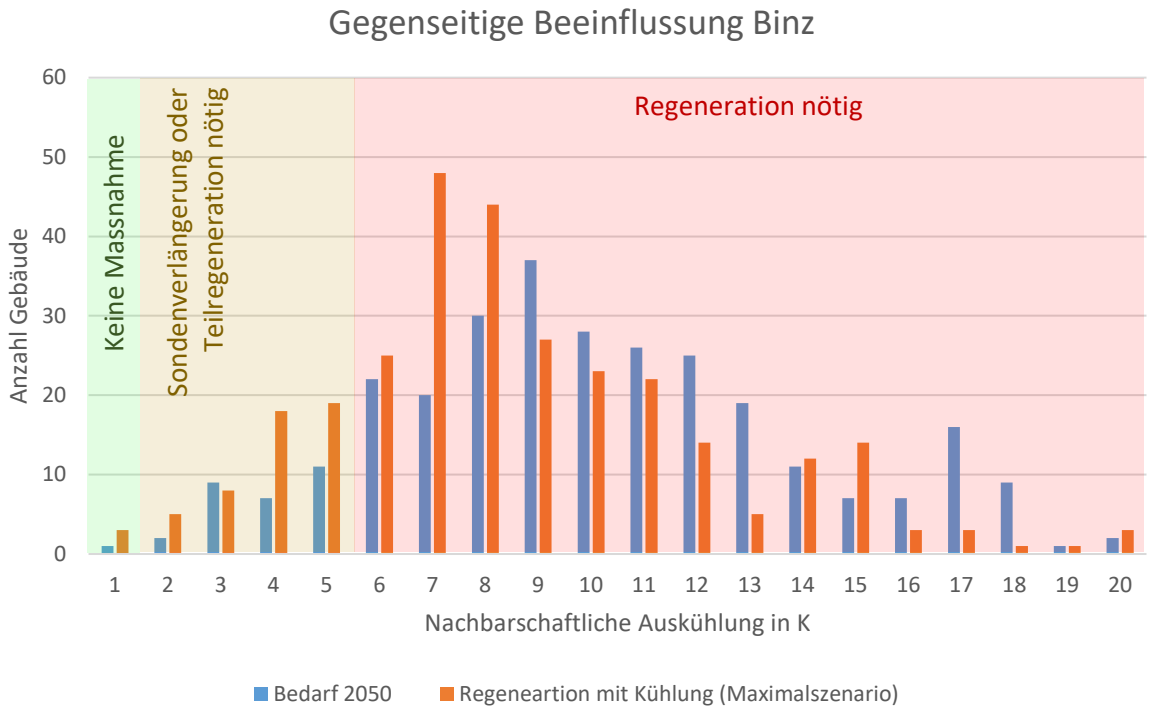


Abbildung 41:Verteilung des nachbarschaftlichen Einflusses im Untersuchungsgebiet Binz nach 50 Betriebsjahren unter der Annahme, dass der gesamte Bedarf durch Erdwärmesonden gedeckt und nicht regeneriert wird.

4.4.3 Effekt von Regeneration durch aktive Kühlung

Wie in den Potenzialanalysen gezeigt wurde, sind in den meisten Quartieren älteren Gebäude mit beschränktem Kühlbedarf dominant. In Abbildung 42 bis Abbildung 45 wird die Verteilung der nachbarschaftlichen Auskühlung in wissenschaftlichen Box-Plots zusammengefasst, wobei die Mittelwerte, die 25.-75. Perzentilen, die Maximalwerte sowie Ausreisser dargestellt werden. Somit kann das Szenario ohne Regeneration mit unterschiedlichen Szenarien der Regeneration durch aktive Kühlung (siehe Kapitel 3.1.4) verglichen werden. Dabei zeigen sich für die unterschiedlichen Quartiere sehr unterschiedliche Resultate.

Im Quartier Binz (Abbildung 42) könnte eine Regeneration durch aktive Gebäudekühlung das Problem der gegenseitigen Beeinflussung nicht aufheben, wenn die ganze Wärmeversorgung auf EWS-Wärmepumpen umgestellt würde. Beim maximalen «Szenario 5» (ohne Nachtauskühlung und ohne Verschattung) würde die nachbarschaftliche Auskühlung ca. halbiert, es bliebe aber eine mittlere nachbarschaftliche Auskühlung von fast 5 K bestehen. Bei einigen Objekten würde aber auch eine nachbarschaftliche Erwärmung auftreten (negative Werte in Abbildung 42).

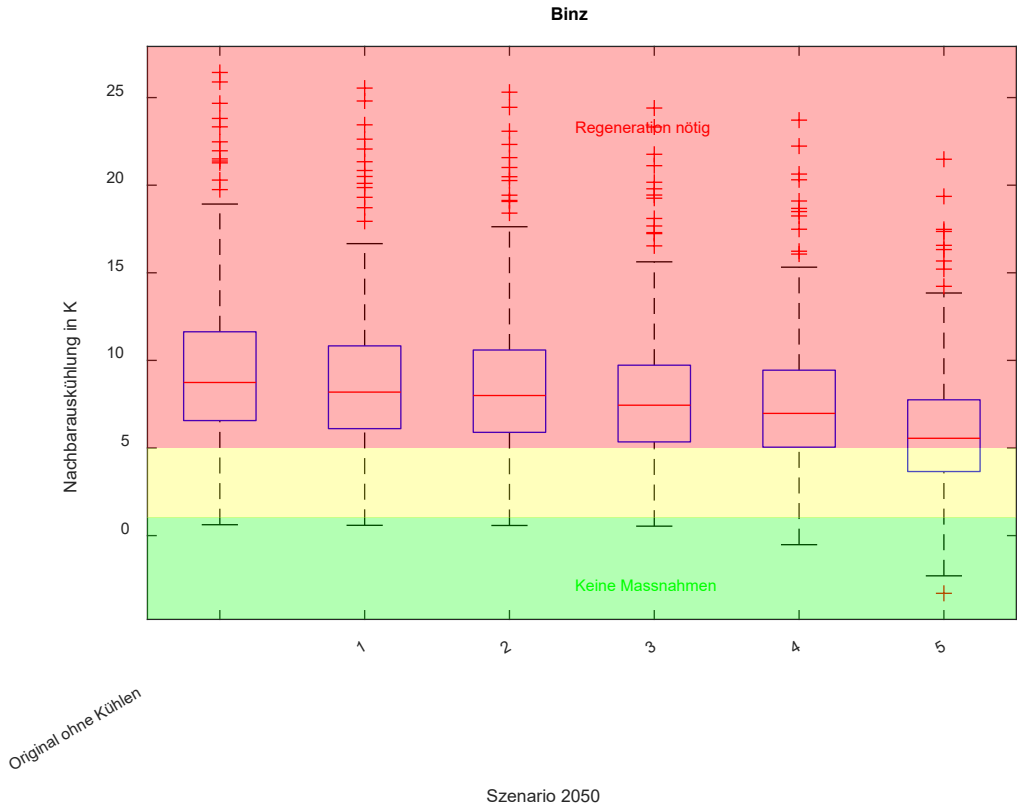


Abbildung 42: Einfluss unterschiedlicher Kühlszenarien auf die Regeneration und somit auf die nachbarschaftliche Auskühlung im Quartier Binz. Es werden der Mittelwert (rote Linie), die 25. bis 75. Perzentile (blaue Box), der Datenbereich ohne Ausreisser (schwarze Striche) und die Ausreisser (rote Kreuze) dargestellt.

Im Quartier Hottingen (Abbildung 43) mit einer hohen Bedarfsdichte auch für 2050 wäre der Nachbareffekt sehr hoch, und könnte mit Regeneration durch aktive Kühlung nicht deutlich verringert werden. In diesem Quartier wäre ein grossflächiger Umstieg auf eine EWS Wärmeversorgung nur in Kombination mit anderen Regenerationsmassnahmen, oder stärkerer Modernisierung der Gebäude gegenüber den hier verwendeten Annahmen der Stadt Zürich möglich.

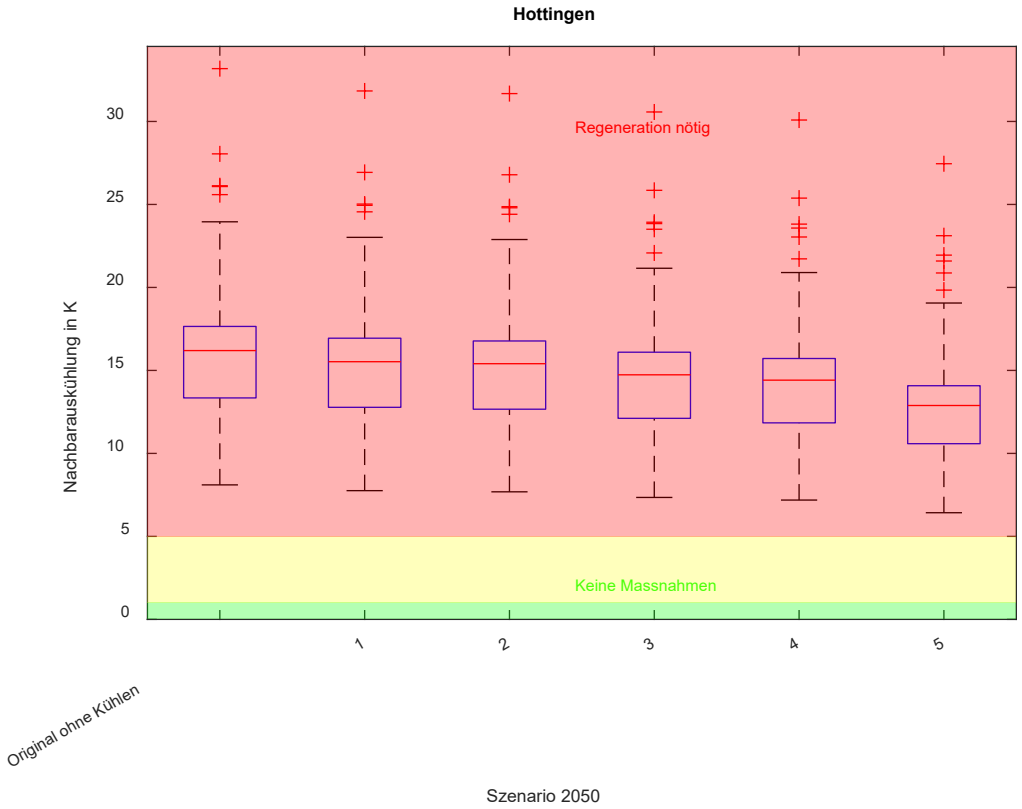


Abbildung 43: Einfluss unterschiedlicher Kühlszenarien auf die Regeneration und somit auf die nachbarschaftliche Auskühlung im Quartier Hottingen. Eswerden der Mittelwert (rote Linie), die 25. bis 75. Perzentile (blaue Box), der Datenbereich ohne Ausreisser (schwarze Striche) und die Ausreisser (rote Kreuze) dargestellt.

Das Quartier Käferholz (Abbildung 44) weist eine deutlich geringere Entzugsdichte und einen moderneren Gebäudepark auf. Daher wäre die Nachbarschaftliche Auskühlung nach 50 Jahren auch ohne Regeneration im Durchschnitt leicht unter 5 K, auch wenn die gesamte Wärmeversorgung auf EWS-Wärmepumpen wechseln würde. Eine Regeneration durch aktive Kühlung könnte die nachbarschaftliche Auskühlung nochmals deutlich verringern. Diese läge mit dem Maximalszenario (5) nur noch wenig über der Grenze von 1 K, unter der keine Massnahmen mehr nötig sind. In diesem Quartier würde ein vollständiger Umstieg auf eine EWS Wärmeversorgung mit aktiver Kühlung also nur kleine Sondenverlängerungen wegen gegenseitiger Beeinflussung benötigen.

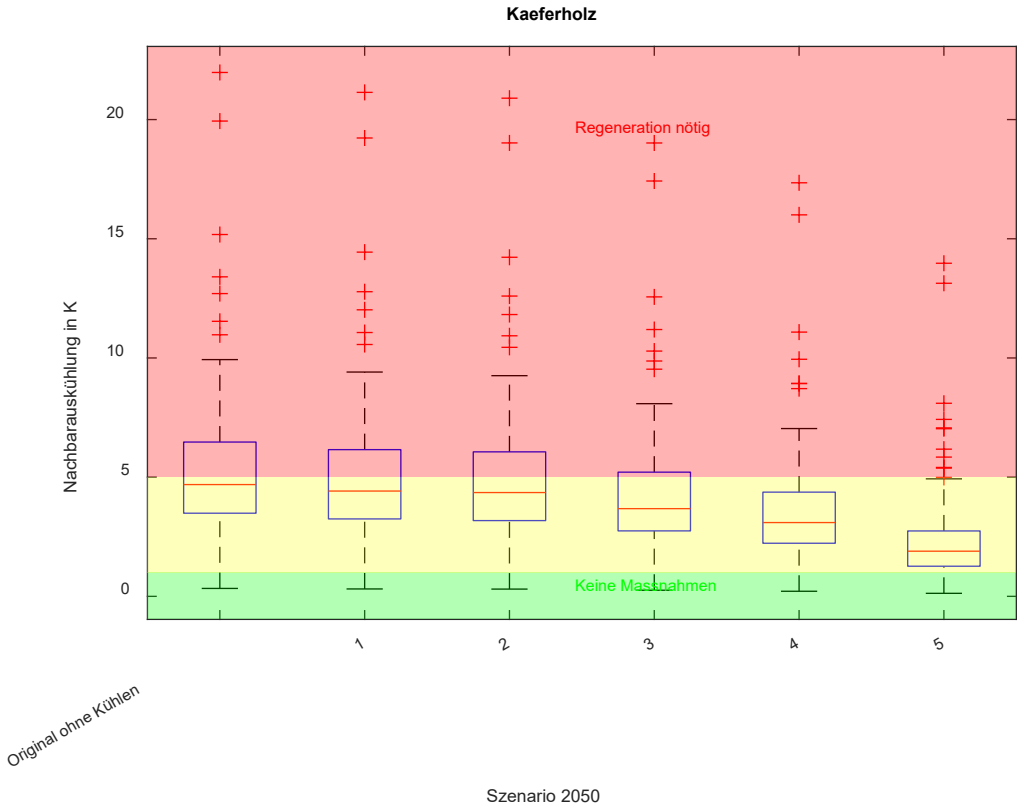


Abbildung 44: Einfluss unterschiedlicher Kühlszenarien auf die Regeneration und somit auf die nachbarschaftliche Auskühlung im Quartier Käferholz. Es werden der Mittelwert (rote Linie), die 25. bis 75. Perzentile (blaue Box), der Datenbereich ohne Ausreisser (schwarze Striche) und die Ausreisser (rote Kreuze) dargestellt.

Das analysierte Südquartier in Rapperswil Jona weist eine ähnlich Entzugsdichte wir das Quartier Käferholz auf, diese wird aber mit einem kleineren Gebäudebestand mit höherem spezifischen Wärmebedarf erreicht. Daher kann die nachbarschaftliche Auskühlung durch eine Regeneration mit aktiver Kühlung weniger stark vermindert werden als in Käferholz (Abbildung 45

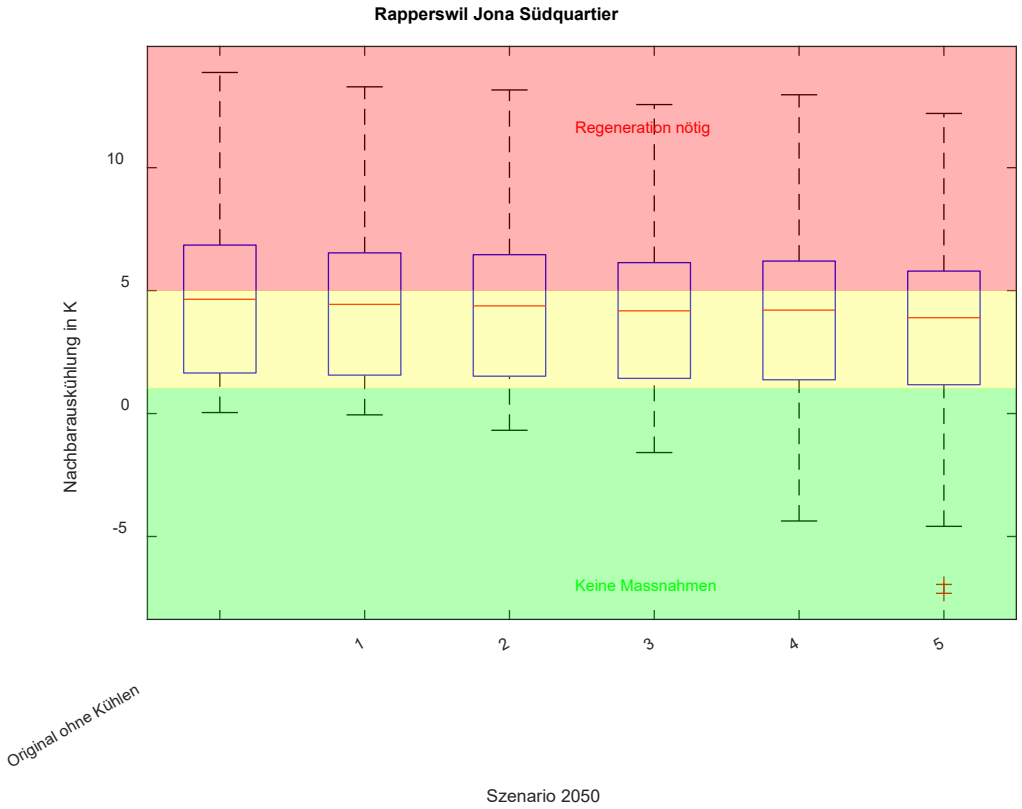


Abbildung 45: Einfluss unterschiedlicher Kühlszenarien auf die Regeneration und somit auf die nachbarschaftliche Auskühlung im Quartier Rapperswil Jona Südquartier. Es werden der Mittelwert (rote Linie), die 25. bis 75. Perzentile (blaue Box), der Datenbereich ohne Ausreisser (schwarze Striche) und die Ausreisser (rote Kreuze) dargestellt.

Die Analyse zeigt also, dass die Regeneration mit aktiver Kühlung nur bei einem modernen Gebäudebestand die nachbarschaftliche Auskühlung entscheidend vermindern kann. Daher wurde ein weiteres hypothetisches Szenario eingeführt, bei dem der Wärmebedarf aller Gebäude mit dem spezifischen Bedarf des *SPF-Referenz Neubau KWL* Gebäudes ersetzt wurde. Der Warmwasserbedarf wurde dabei nicht verändert. Dadurch vermindert sich der Wärmebedarf und somit die nachbarschaftliche Auskühlung signifikant (siehe Abbildung 46). Im dichtesten Quartier Hottingen würde die nachbarschaftliche Auskühlung auch ohne Regeneration im Durchschnitt noch ca. bei 5 K liegen, bei den anderen Quartieren darunter. Mit Regeneration durch aktive Kühlung könnte die nachbarschaftliche Auskühlung bei den Quartieren mit gutem Neubaustandard stark vermindert werden. Beim maximalen «Szenario 5» läge diese bei allen Quartieren unter einem Kelvin und je nach Anteil des Warmwasserbedarfs sogar im negativen Bereich (Langzeiterwärmung).

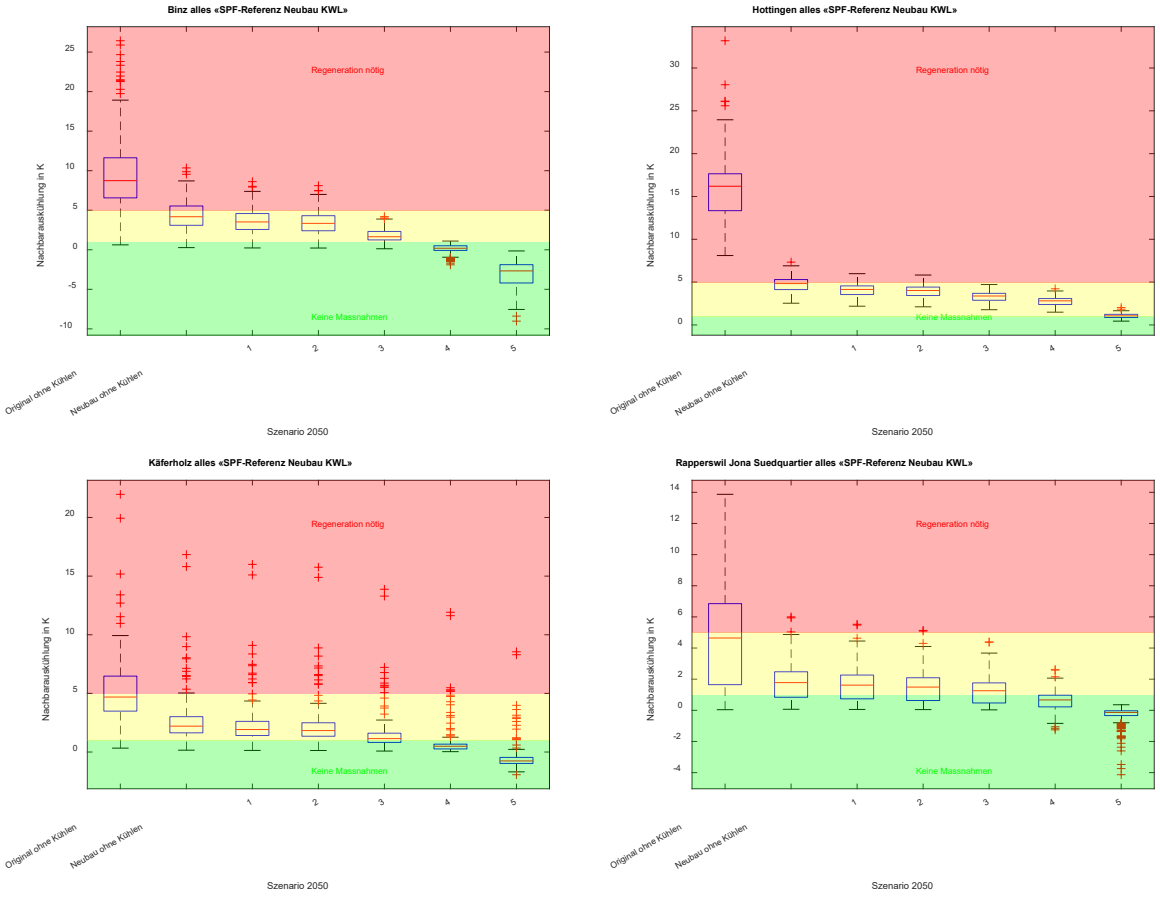


Abbildung 46: Einfluss unterschiedlicher Kühlszenarien auf die Regeneration und somit auf die nachbarschaftliche Auskühlung, wenn bei allen Gebäuden mit den Kennwerten des «SPF-Referenz Neubau KWL» Gebäudes gerechnet wird.

Für das Quartier Hottingen hat die Stadt Zürich eine Studie für die zukünftige Wärmeversorgung durchgeführt[35]. Dabei wurde parzellenscharf, d.h. für jedes Gebäude/Parzelle abgeschätzt, wie dieses in Zukunft versorgt werden könnte. Das Potenzial von EWS-Anlagen wurde dabei sowohl durch technische Beschränkungen wie z.B. unterirdische Bauten und durch existierende oder zukünftige Wärmenetze eingeschränkt. Jeder Parzelle wurde in erster Priorität eine Wärmequelle zugeordnet. Als Alternative wurde immer auch eine andere Wärmequelle in zweiter Priorität ergänzt. Somit konnten für das Quartier Hottingen zwei weitere Szenarien ausgewertet werden.

1. Nur die Anlagen werden umgesetzt, welche in erster Priorität mit EWS-Wärmepumpen beheizt werden sollen (158 von 1470).
2. Alle Anlagen werden umgesetzt, welche in erster oder zweiter Priorität mit einer EWS-Wärmepumpe versorgt werden sollen (1181 von 1470).

Durch die Konkurrenz mit Wärmenetzen und die technischen Hindernisse werden deutlich weniger EWS-Wärmepumpen vorgesehen, wodurch sich auch die nachbarschaftliche Beeinflussung deutlich vermindert. Dies wird in Abbildung 47 für Priorität 1 und in Abbildung 48 für Priorität 1 & 2 dargestellt. Es wurden nur ca. 10 % der Gebäude in erster Priorität EWS-WP Anlagen zugewiesen, daher ist es nicht erstaunlich, dass dabei auch nur eine geringe

gegenseitige Beeinflussung auftreten würde. Bei einer nachbarschaftlichen Auskühlung von weniger als 1 K könnten die meisten Anlagen ohne zusätzliche Massnahmen umgesetzt werden.

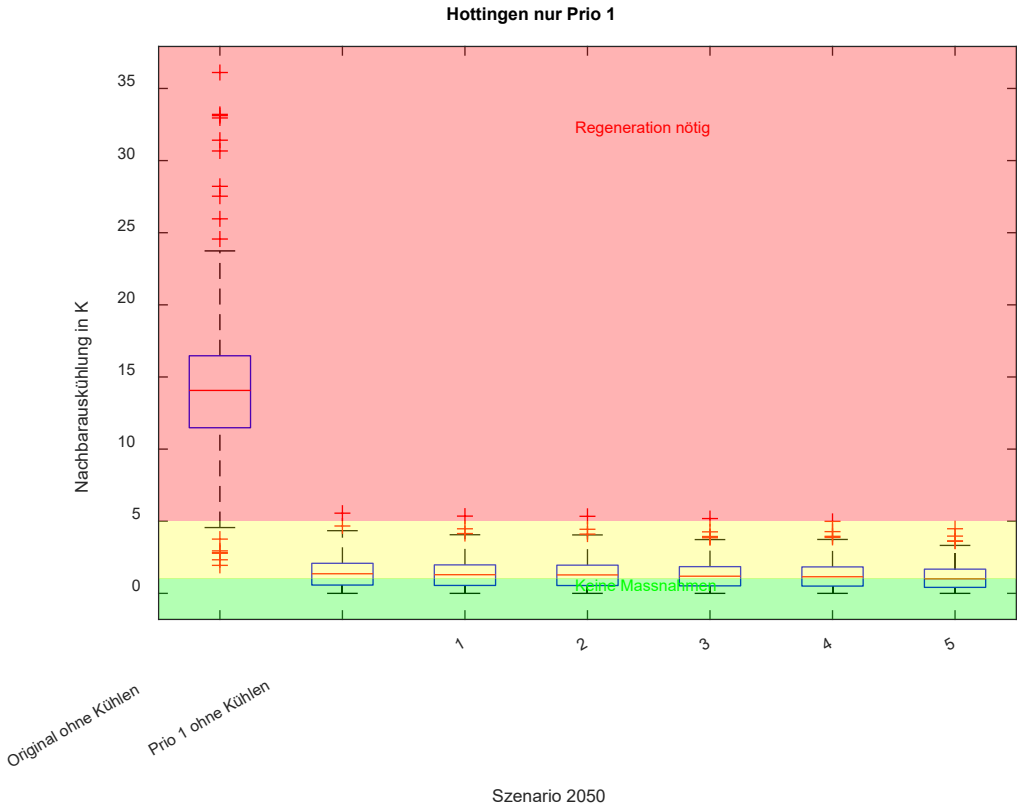


Abbildung 47: Gegenseitige Beeinflussung im Quartier Hottingen nach 50 Betriebsjahren, unter der Annahme, dass alle Anlagen mit Priorität 1 für EWS-WP umgesetzt werden.

Wenn auch alle Anlagen mit EWS in zweiter Priorität umgesetzt würden, wäre von einer verminderten nachbarschaftlichen Auskühlung auszugehen, die aber im Durchschnitt immer noch über 5 K läge. Aufgrund des Gebäudebestandes wäre auch hier von einer Regeneration durch aktive Kühlung kein entscheidender Rückgang der Auskühlung zu erwarten.

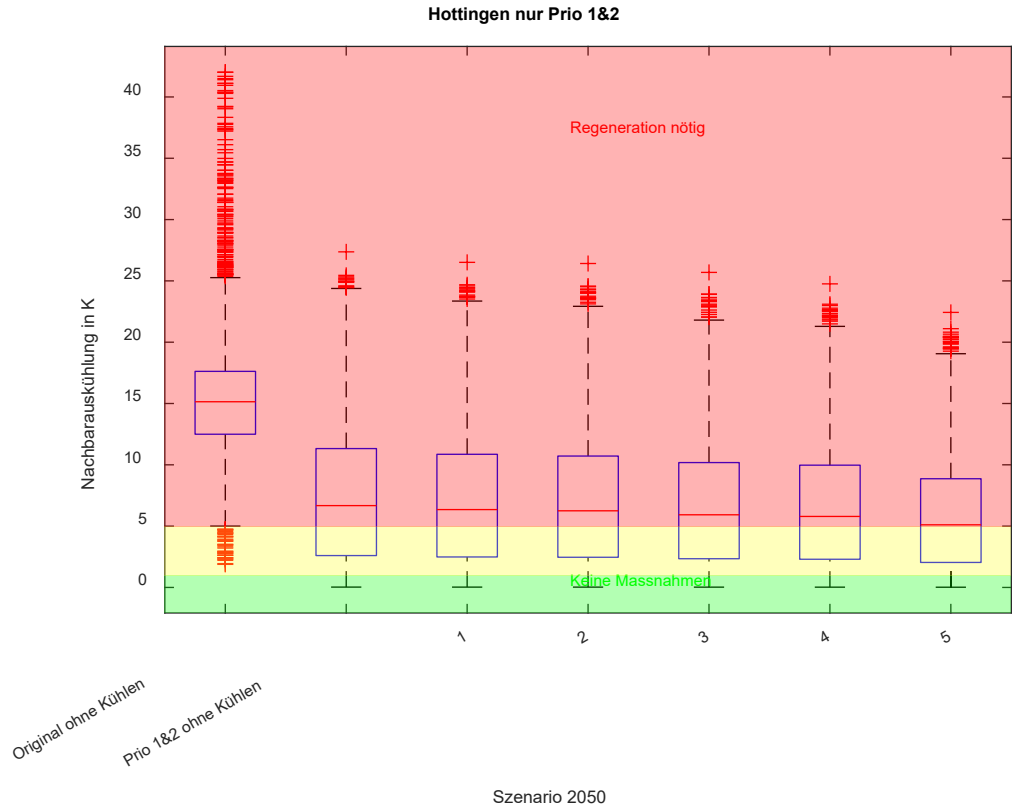


Abbildung 48: Gegenseitige Beeinflussung im Quartier Hottingen nach 50 Betriebsjahren, unter der Annahme, dass alle Anlagen mit Priorität 1 & 2 für EWS-WP umgesetzt werden.

4.5 Ergebnisse Wirtschaftlichkeit und Kosten

In den vorhergehenden Kapiteln wurde gezeigt, dass hohe Regenerationsraten durch die Abwärme aus der Gebäudekühlung nur bei Neubauten möglich ist. Bei Alt- und Bestandsbauten ist der Kühlbedarf im Verhältnis zum Heizbedarf zu gering. Deswegen konzentrieren wir uns bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Neubauten.

Die Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit und Kosten werden wie folgt dargestellt:

- Zuerst werden die möglichen Einsparungen abgeschätzt. Diese enthalten:
    - Verzicht auf die Automatisierung von passiven sommerlichen Wärmeschutzmassnahmen
    - Verkürzung von Sonden im EWS-Feld für den Fall einer aktiven Gebäudekühlung
- Detaillierter Kostenvergleich für die im Kapitel 2.5 vordefinierten Kühlszenarien
- Gegenüberstellung der Kosten und Einsparungen mit dem Hinweis auf die räumliche Behaglichkeit sowie Regenerationsgrade

4.5.1 Mögliche Einsparungen mit dem Verzicht auf Automatisierung

Das Referenzgebäude «SPF-Referenz Neubau KWL» besitzt 56 Fenster. Werden Fenster und Jalousien in einer Smart-Home Lösung vollständig automatisiert, fallen pro Fenster 700 CHF an (siehe Kapitel 3.5.5) plus Initialkosten in der Höhe von 5'000 CHF. Die Automatisierung der Fensteröffnung und der Jalousien kann im SPF Referenzgebäude mit folgenden Kosten (Tabelle 16) realisiert werden:

Tabelle 15: Zusammenfassung der Kosten für eine automatisierte Verschattung und Fensterlüftung.

Initialkosten Montage, Sensoren, Steuerung und Programmierung	5’000
Motorisierung und Datenpunkte für alle Fenster	22’400
Datenpunkte für alle Jalousien	16’800
Summe	**44’200**

Somit sind mit der Automatisierung (44’200 CHF) wesentlich höhere Kosten verbunden als mit der aktiven Kühlung (≈ 34'000 CHF). Hier ist zu beachten, dass bei den Jalousien nur die Automatisierung betrachtet wird und nicht der Preis für die Jalousien selbst. Würde auf externe Jalousien verzichtet werden, und z.B. einfache innenliegende Blenden angebracht werden, könnten Kosten eingespart werden, mit denen sich die aktive Kühlung realisieren liesse. Diese Thematik wird in der Diskussion nochmals behandelt.

4.5.1 Mögliche Einsparungen bei den Sondenmetern

Gemäss Tabelle in Annex D wurde das Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL mit 2 × 220 = 440 Sondenmetern ausgelegt. Diese Anzahl von Sondenmetern geht davon aus, dass keine nachbarschaftliche Beeinflussung des Erdreichs existiert. Dies ist dann der Fall, wenn entweder keine Nachbarsonden existieren oder nur Nachbarsonden existieren, welche vollständig regeneriert werden. In beiden Fällen ist die Netto-Entzugsdichte aus dem Erdreich null.

Existieren Nachbarsonden und werden diese nicht vollständig regeneriert, so kann eine Entzugsdichte aus dem Erdreich berechnet werden. Je grösser die Entzugsdichte, desto länger müssen die Erdsonden ausgelegt werden (oder alternativ desto mehr müssen sie regeneriert werden).

Gemäss den Ergebnissen des Kapitels 4.4.3 (Abbildung 44) braucht es keine Sondenverlängerung im Fall eines Referenzgebäudes «SPF-Referenz Neubau KWL» im «Szenario 5, 2050», da die Nachbarauskühlung für meisten Gebäude in Quartieren weniger als 1 K beträgt.

Bei passiver Kühlung wird hier von einem Regenerationsgrad von 20 % ausgegangen (10 % bis 30 % gemäss suissetec Merkblatt[32]). Im Fall einer Entzugsdichte von 53-55 kWh/m² braucht es eine Sondenverglängerung von 65 % - 80 % (sieheAbbildung 49).(Abbildung 49).

Diese Sondenverlängerung von **286 m** (Sondenverlängerung von 65 %) kann man im Fall aktiver Gebäudekühlung einsparen. Bei 68 CHF pro Sondenmeter können **19’448 CHF** realisiert werden.

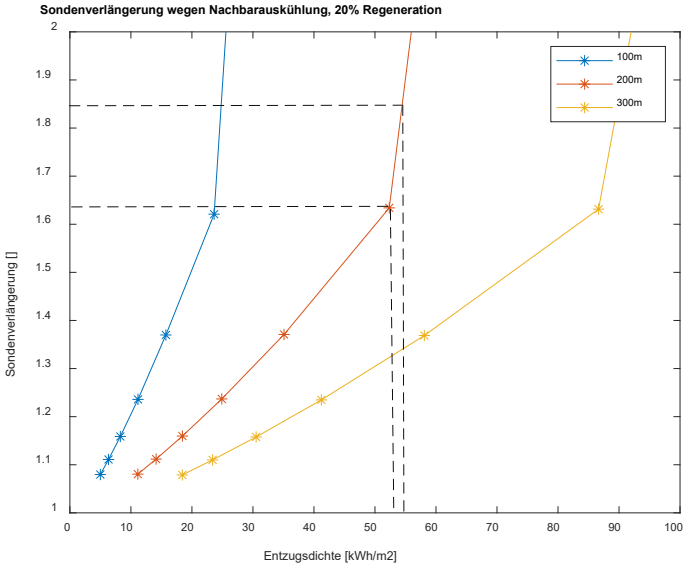


Abbildung 49: Eine Sondenverlängerung von 60-85 % wird bei einem Regenerationsgrad von 20 % (typisch für «Freecooling») bei nachbarschaftlichen Entzugsdichten von ca. 55 kWh/m^2 nötig. Weitere ähnliche Grafiken in Abbildung 41.

4.5.2 Detaillierter Kostenvergleich

Die Kostenberechnung erfolgt nach der im Kapitel 2.5 vorgegebenen Methodologie und nach den im Kapitel 3.4 aufgelisteten Kostengrundlagen und ist in der Tabelle 16 dargestellt. Die Kosten für aktive Kühlung werden für das Referenzgebäude «SPF-Referenz Neubau KWL» im «Szenario 5, 2050» abgeschätzt.

Die Investitionskosten für die Wärmepumpe zum Heizen bleiben für alle betrachtete Kühlszenarien gleich und beinhalten **21’400 CHF**. Um ein Fussbodenheizungssystem hydraulisch zum Kühlen einzubinden, werden zusätzlich **8’000 CHF** für alle betrachtete Szenarien pauschal veranschlagt.

Tabelle 16: Ergebnisse der Kostenberechnung. Legende: grüne Farbe – tiefere Investitions- und Betriebskosten, gelbe / orange Farbe – mittlere Investitions- und Betriebskosten, rote Farbe – hohe Investitions- und Betriebskosten

Kostenart			Betrachtete Kühlszenarien			
			Passive Fussboden-kühlung	Aktive Fussbodenkühlung mit Zuluftkühlung		
				Variante (i) *Reversible Wärmepumpe*	***Variante (ii)*** *Externe hydraulische Umschaltung*	***Variante (iii)*** *Separate Wärmepumpe zum Kühlen*
Investitions-kosten	**Wärmepumpenkosten**	Kosten Wärmepumpe zum Heizen	21'400	21'400	21'400	21'400
		Umbau der Wärmepumpe für reversiblen Betrieb	-	642	-	-
		Hydraulische Umschaltung der Wärmepumpe für die Fussbodenkühlung	-	-	5'000	-
		Separate Wärmepumpe für die Fussbodenkühlung	-	-	-	19'463
	Kältespeicher		-	6'000	6'000	6'000
	Kühlregister in der Lüftungsanlage		-	2'420	2'420	2'420
	Umbau der Fussbodensysteme für die Fussbodenkühlung		8'000	8'000	8'000	8'000
	Zwischensumme		**29'400**	**38'462**	**42'820**	**57'283**
Betriebs-kosten über 20 Jahre	Stromkosten Heizen		39333	42611	39333	39333
	Stromkosten Kühlen		4778	15430	15430	15430
	Zwischensumme		**44'111**	**58'041**	**54'763**	**54'763**
Gesamtsumme			**73'511**	**96'503**	**97'583**	**112'046**

Der Stromverbrauch über 20 Jahre der Förderpumpen wird ist im Kühlszenario «Passive Fussbodenkühlung» ersichtlich und beträgt **4'778 CHF** (239 CHF/a), was den Bericht RegenOpt[18] entspricht.

Im Fall von aktiver Kühlung sind noch weitere **2'420 CHF** für die Installation und Einbindung der Kühlregister nötig (Kapitel 3.5.1). Der Kältespeicher mit einem Volumen von 1000 l kostet **6'000 CHF** (siehe Kapitel 3.5.3). Dieses Volumen sichert bei einer Kälteleistung von 17 kW die Kälteversorgung für eine halbe Stunde und entkoppelt die Wärmepumpe vom Fussbodensystem. Die elektrische Energie der Wärmepumpe zum Kühlen beträgt betragt pro Jahr 5'016 kWh. Diese wurde aus der Regenerationsenergie von **31'600 kWh** und einer Jahresarbeitszahl Kühlen von 5.3 ermittelt. Mit einem Strompreis (Mischung aus PV-Eigenproduktion) von 13 Rp/kWh (Kapitel 3.5.7) ergeben sich damit jährliche Stromkosten in der Höhe von 652 CHF. Zum Vergleich betragen die jährlichen Heizkosten 2'131 CHF. Auf 20 Jahre gerechnet betragen die Stromkosten zum Kühlen zusammen mit dem Stromverbrauch der Förderpumpe **15'430 CHF**.

Für die hydraulische Einbindung der aktiven Kühlung gibt es drei unterschiedliche Ausführungsvarianten, die sich in den Kosten unterscheiden. Weitere Unterschiede bei der

Inbetriebnahme sowie der Verfügbarkeit auf dem Markt werden in Annex F ausführlich diskutiert. Die drei Varianten sind:

i. Reversible Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen

   Hier wird innerhalb der Wärmepumpe die Fliessrichtung des Kältemittelkreises mittels 4-Weg-Ventil gedreht. Dadurch erhöht sich der Druckverlust im Kältemittelkreis, der Stromverbrauch des Kompressors steigt und der COP der Wärmepumpe sinkt. Die COP-Reduktion führt zu den für die Heizung **zusätzlichen Stromkosten von 3'278 CHF über 20 Jahre**. **Die Investitionskosten** für den Umbau einer Wärmepumpe für den reversiblen Betrieb sind gegenüber zusätzlichen Betriebskosten deutlich kleiner und entspricht etwa 3 % des Gesamtpreises, hier also **642 CHF**.

ii. Externe hydraulische Umschaltung

   Für die externe hydraulische Umschaltung sind keine Einbussen der Effizienz beim Heizen zu erwarten. Für die Realisierung dieser hydraulischen Einbindung und deren Regelung werden **5'000 CHF** angenommen (Kapitel 3.5.5).

iii. Separate Wärmepumpe zum Kühlen

   Werden zwei separate Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen verwendet, kann die Wärmepumpe zum Kühlen (Kühlleistung Verdampfer 18 kW (siehe Annex D für Gebäude «SPF-Referenz Neubau KWL»), Heizleistung Kondensator 21 kW) für das hier gewählte Gebäude etwas kleiner dimensioniert werden als die Wärmepumpe zum Heizen (Heizleistung 26 kW). Die Kosten für die Wärmepumpe zum Kühlen betragen jedoch immer noch ca. **19'463 CHF**.

Insgesamt liegen die Investitions- und Betriebskosten über 20 Jahre für die Heizung und **passive Kühlung** am tiefsten und betragen **73'511 CHF** (Kühlszenario «Passive Fussbodenkühlung»).

Das Kühlszenario «**Aktive Fussbodenkühlung mit Zuluftkühlung**» mit einer reversiblen Wärmepumpe - *Ausführungsvariante (i)* - oder mit einer Standardwärmepumpe mit externer hydraulischer Umschaltung - *Ausführungsvariante (ii)* - veranschlagen entsprechend **96'503 CHF** und **97'583 CHF**, was **31-33 % teurer als die Heizung mit passiver Kühlung ist**.

Die Ausführungsvariante (iii) mit **zwei separaten Wärmepumpen** weist die höchsten Investitions- und Betriebskosten über 20 Jahre auf und kostet **112'046 CHF,** was **52.4 % teurer als die Heizung mit passiver Kühlung ist.**

4.5.3 Gegenüberstellung der Kosten und Einsparungen

In der Tabelle 17 ist der Vergleich von Kosten, Einsparungen, Regenerationsgrade und räumlicher Behaglichkeit dargestellt.

Gemäss Investitions- und Betriebskosten bleibt die passive Kühlung günstiger als aktive Kühlung. Die Ausführungsvariante der aktiven Kühlung mit zwei separaten Wärmepumpen ist die teuerste Variante. Mit der Berücksichtigung von der Sondenverlängerung lässt sich die Kostendifferenz zwischen passiver und aktiver Kühlung reduzieren. Diese Differenz beträgt **3'544 CHF** (**3.8 %** im Vergleich zur passiven Kühlung).

Um die räumliche Behaglichkeit im Fall einer passiven Kühlung zu gewährleisten, sind die passiven sommerlichen Wärmeschutzmassnahmen nötig. Die vollständige Automatisierung von solchen Massnahmen benötigt **44'200 CHF** (Tabelle 15), was das Kühlszenario «Passive Fussbodenkühlung» im Vergleich zur aktiven Kühlung teurer macht – **40'656 CHF** (**42 %** im Vergleich zum aktiven Kühlszenario mit der reversiblen Wärmepumpe).

Im Gegenteil zu höheren Kosten leistet die aktive Fussbodenkühlung mit Zuluftkühlung einen höheren Regenerationsgrad des EWS-Feldes (100 % gegen 20 % im Fall einer passiven Kühlung gemäss suissetec Merkblatt[32]) sowie auch eine bessere räumliche Behaglichkeit (keine Überhitzungsstunden gegen 130 Überhitzungsstunden pro Jahr gemäss ResCool[9]).

Tabelle 17: Vergleich von Kosten, Einsparungen, Regenerationsgrade und räumlicher Behaglichkeit. Legende: grüne Farbe – tiefere Kosten / höhere Regenerationsgrade / tiefere Anzahl Überstunden, gelbe / orange Farbe – mittlere Kosten, rote Farbe – hohe Kosten / tiefere Regenerationsgrade / hohe Anzahl Überstunden

	Betrachtete Kühlszenarien			
	Passive Fussboden-kühlung	**Aktive Fussbodenkühlung mit Zuluftkühlung**		
		Variante (i) *Reversible Wärmepumpe*	***Variante (ii)*** *Externe hydraulische Umschaltung*	***Variante (iii)*** *Separate Wärmepumpe zum Kühlen*
Investitions- und Betriebskosten [CHF]	73'511	96'503	97'583	112'046
Kosten der Sondenverlängerung [CHF]	19448	-	-	-
Zwischensumme	92'959	96'503	97'583	112'046
Automatisierung von passiven sommerlichen Wärmschutzmassnahmen [CHF]	44'200	-	-	-
Gesamtsumme [CHF]	137'159	96'503	97'583	112'046
Regenerationsgrade [%]	20	100	100	100
Anzahl Überhitzungsstunden pro Jahr []	130	0	0	0

5 Bewertung der Ergebnisse

5.1 Diskussion Heiz- und Kühlbedarf

Der Wärme- und Kältebedarf und damit implizit der mögliche Regenerationsgrad durch Kühl-Abwärme sind extrem abhängig vom Gebäudetyp. Die Hauptaspekte sind hierbei die Wärmedämmung und Luftdichtigkeit des Gebäudes sowie der Fensteranteil. Ein schlecht wärmegedämmtes Gebäude mit geringem Fensteranteil (z.B. «SPF Referenz Altbau») hat durch die schlechte Dämmung und die geringen solaren Gewinne einen hohen Heizwärmebedarf im Winter. Für den Kühlbedarf im Sommer sind hauptsächlich die solaren Einträge über die Fenster relevant. Ein Altbau mit geringem Fensteranteil (Tabelle 3) hat weniger solare Einträge und dadurch einen kleineren spezifischen Kühlbedarf als ein Neubau. Infolgedessen haben nur bei den Referenzgebäuden «ClimaBau Niedrigenergie» und «SPF-Referenz Neubau KWL» der Heizwärme- und Klimakältebedarf eine ähnliche Grössenordnung. Bei allen anderen Gebäuden ist das Verhältnis aus Klimakälte- zu Heizwärmebedarf kleiner als 30 %, auch bei den extremen Szenarien, d.h. Verzicht auf alle passiven Wärmeschutzmassnahmen im Jahr 2050.

Relevante Regenerationsraten können also nur bei Neubauten erreicht werden. Für das Gebäude «SPF-Referenz Neubau KWL» liegt der jährliche spezifische Wärmebedarf zwischen 10.2 und 14.4 kWh/m², der Kühlbedarf zwischen 0.2 und 21.3 kWh/m². Der aktuelle Heizwärmebedarf dieses Gebäudes wird in der Studie ImmoGap[7] mit 82.2 MJ/m² gegeben (entsprechend 22.8 kWh/m^2). Die Simulationsergebnisse fürs Designreferenzjahr korrelieren gut mit den Kennzahlen des BFE-Projekts «ImmoGap» (siehe Kapitel 4.1.1). Der jährliche Heizwärmebedarf für die Wetterdaten «Meteonorm, aktuell» ist 33 % tiefer und für die Wetterdaten «Meteonorm, 2050» 50 % tiefer im Vergleich zum Designreferenzjahr. Dieses Phänomen ist mit höheren Aussenlufttemperaturen und grösseren Solareinträgen (Abbildung 2 und Abbildung 3) erklärbar.

Der Klimakältebedarf hängt stark vom Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen ab. Je mehr Sonneneinstrahlung zugelassen wird, desto höher wird der Klimakältebedarf und desto höher wird folglich auch der Regenerationsgrad. Ob der Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen vom Nutzer akzeptiert wird, ist fraglich und es fehlen dementsprechende Studien. Studien zum Performance Gap[7,36,37] fokussieren bezüglich Nutzerverhalten (Position der Jalousien, Fensteröffnung) auf die Heizperiode. Die Ergebnisse aus der Heizperiode können aber nicht auf die Kühlperiode im Sommer übertragen werden. Wie die Nutzer auf den Verzicht von passiven Wärmeschutzmassnahmen reagieren, kann daher zum momentanen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden.

Die Untersuchungen zum Komfort, d.h. der Anzahl der im Sommer anfallenden Überhitzungsstunden zeigen, dass für das Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL der Komfort für alle betrachteten Systeme, auch für Extremszenarios, gewährleistet werden kann. Das Fussbodenystem und die Kühldeckensegel wurden auch in der Studie ResCool[9] bezüglich Überhitzungsstunden für einen Neubau untersucht. Allerdings wurden dort anderen Annahmen als in dieser Studie getroffen: Es wurde das pessimistischere Klimaszenario RCP8.5 (hier RCP4.5) angenommen und das Jahr 2060 untersucht (hier 2050). Für das Jahr 2060 wurde sowohl ein Medianjahr als auch ein heisses Jahr angenommen (hier nur

Medianjahr) und unterschiedliche Grenztemperaturen gewählt - für Wohnzimmer (26 °C) und Schlafzimmer (24 °C) (hier Grenztemperatur 26.5 °C). Ausserdem wurde in ResCool konsequent für alle Kühlsysteme Sonnenschutz und Fensterlüftung eingesetzt. In ResCool erzeugt das Kühldeckensegel (Wohnzimmer, Medianjahr 2060) ca. 30 Überhitzungsstunden und das Fussbodensystem ca. 110 Überhitzungsstunden (Abb. 12 des ResCool Berichtes). Wird auf Sonnenschutz und Fensterlüftung verzichtet, kann das Fussbodensystem den Komfort nicht mehr gewährleisten. Daher wurde in dieser Studie das Fussbodensystem auch in Kombination mit einer Zuluftkühlung über die Lüftungsanlage betrachtet. Für den Neubau wird in ResCool unter den eben genannten Annahmen und mit Fensterlüftung ein spezifischer Klimakältebedarf zwischen 4 und 5 kWh/m²/a prognostiziert. Diese Situation ist am ehesten mit «Szenario 1, 2050» vergleichbar, für welche ein spezifischer Kühlbedarf von 1.8 kWh/m²/a prognostiziert. wird. Die Werte sind in ähnlicher Grössenordnung und Unterschiede basieren auf den oben genannten unterschiedlichen Randbedingungen (z.B. wärmeres Jahr in ResCool).

5.2 Diskussion Wärmeerzeugung

Mit der vorgestellten Methode zur Gebäude-Simulation in IDA-ICE und der Gebäudetechnik-Simulation in Polysun konnte das Gesamtenergiesystem abgebildet werden. Die Schnittstelle zur Übergabe von Wärme- und Kältebedarfsdateien aus IDA-ICE zu Polysun funktionierte durchwegs gut. Die benötigten Energiemengen für Heizen und Kühlen konnten in allen untersuchten Szenarien zur Verfügung gestellt werden.

Allenfalls kritisch zu betrachten ist die implementierte Vorrangschaltung für die Warmwasserproduktion. In den Zeitfenstern (während der Warmwasserladung) kann die Wärmepumpe bei der gewählten Hydraulik (Umschaltbetrieb) keine Wärme resp. Kälte zur Raumheizung / Raumkühlung zur Verfügung stellen. Der Einsatz der Pufferspeicher federt diesen Effekt ab, vermindern die Unterdeckung jedoch nicht vollumfänglich. Die Rückkopplungseffekte auf die Gebäudesimulation durch die Unterdeckung werden mit der hier angewendeten Kombination von IDA-ICE und Polysun nicht abgebildet. Die Abweichungen waren gering und haben keinen Einfluss auf die grundsätzliche Aussage der Resultate. Für künftige Projekte kann überlegt werden, den Warmwasserbedarf entweder über IDA-ICE mitzusimulieren, oder ein System mit paralleler Warmwasserladung zu betrachten.

Die maximalen Temperaturen, welche bei der Regeneration in den Erdwärmesonden erreicht werden, hängen massgeblich vom relativen Kältebedarf ab. Wird, wie im Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL «Szenario 5, 2050» aufgezeigt, ein hoher Anteil der Energiemenge regeneriert, steigen die Temperaturen in den Erdsonden auf bis knapp unter 30 °C an. Weil für die Gebäudekühlung mit Eintrittstemperaturen von 18 °C gerechnet wurden, wäre eine passive Nutzung (Freecooling) vermutlich nicht oder nur sehr begrenzt in den Übergangszeiten möglich. Die Grenzen der passiven Kühlung wurden aber in dieser Arbeit nicht im Detail untersucht. Mit sinkendem Regenerationsgrad sinkt die maximale Temperatur in den Erdwärmesonden und erreicht wie im SPF-Referenz Neubau KWL «Szenario 2, aktuell» lediglich noch 16.6°C. In diesem Fall wäre auch eine passive Nutzung (Freecooling) möglich.

In Bezug auf die Langzeiteffekte in den Erdsonden, resp. einer langfristigen Auskühlung, zeigt sich, dass bei hohen Regenerationsgraden auch in der Betrachtung über 50 Jahre keine Auskühlung im Erdreich stattfindet. In den Simulationen mit Regenerationsgraden über 100 %

zeigt sich sogar in wenigen Monaten ein leichter Anstieg der mittleren Temperaturen in den Erdwärmesonde.

Bezüglich der Arbeitszahlen der Wärmepumpe (im Bericht auf Monatsbasis untersucht) zeigt sich ein interessanter Effekt. Werden im Gebäude sehr hohe Regenerationsgrade ausgewiesen, steigt auch die (mittlere) Erdsondentemperatur im Verlauf des Sommers an. Da in der Simulation der Kältespeicher jedoch auf konstante Temperaturen gehalten wird (15°C), sinkt die Arbeitszahl im Kühlbetrieb im Verlauf des Sommers. Eine sehr hohe Regeneration führt somit aufgrund der höheren Temperaturspreizungen über dem Kältekreislauf zu einem ineffizienteren Betrieb und zu einem Absinken der Leistungszahl im Kühlbetrieb. Im Extremszenario (SPF-Referenz Neubau KWL «Szenario 5, 2050») sank die Monatsarbeitszahl von 7.11 auf 5.10 ab.

5.3 Diskussion Quartieranalysen

Die erarbeitete Methodik zur Auswertung des Kältebedarfes auf Quartierebene liefert Daten zum gebäudescharfen Kältebedarf für die untersuchten Szenarien für alle Gebäude in den Quartieren. Die erhaltenen Kennwerte (besonders die gebäudescharfen Werte) sind jedoch mit Vorsicht zu verwenden. Die Herleitung des Kältebedarfs basiert lediglich auf einer Klassifizierung andhand der Energiekennzahl des Heizwärmebedarfes (in Kapitel 3.1.1 vorgestellt). In den realen Quartieren ist davon auszugehen, dass die Bandbreite an Gebäuden, deren unterschiedliche Nutzungsansprüche, Fensteranteile und Orientierungen mit den sieben vorgestellten Gebäuden nicht vollumfänglich abgebildet wird.

Die Auswertung der PV-Potentiale basierend auf einer Klassifizierung der Dachflächen nach Orientierung und Neigung gestützt auf dynamische Polysun-Simulationen, liefert zuverlässige Resultate in Form von Produktionswerten auf Stundenwertbasis. Eine gewisse Unsicherheit bei der Potentialauswertung zeigt sich bezüglich der Effizienz der eingesetzten PV-Module, besonders für den Horizont bis 2050. In der Ausarbeitung wurde von einem heute erhältlichen Modul mit einem Wirkungsgrad von 19.2 % ausgegangen.

In der Auswertung werden sämtlichen gut bis sehr gut geeigneten Dachflächen entsprechende PV-Installationen zugewiesen. Die Auswertung zeigt, dass dadurch in der Gesamtbilanz wesentlich mehr lokaler Strom produziert werden könnte, als durch die Wärmepumpen zur aktiven Kühlung benötigt wird. Eine Vollbelegung sämtlicher geeigneter Dachflächen sowie die Installation einer aktiven Kühlung in allen Gebäuden ist vermutlich nur schwer realisierbar. Eine "Studie zur Bestimmung des PV Potentials innerhalb des Zürcher Stadtgebiets"[38] weist für das Gebiet Hottingen unter Berücksichtigung von ökologischen und denkmalpflegerischen Aspekten ein Potential von 14 GWh aus, während in diesem Bericht von 40 GWh bei Vollbelegung ausgegangen wird. Die Studie trifft zum einen deutlich konservativere Annahmen zur Effizienz und dem Ertrag von PV Anlagen. Zum anderen werden Pauschalabzüge (40% für Aufbauten, 35% für Statik und 30 % für Dachbegrünungen) und weitere Abzüge eingeführt. Weil die aktive Kühlung von Wohngebäuden (noch) keinen Stand der Technik darstellt, können auch keine techno-ökonomischen Grenzen zur Beschränkung des Potenzials festgelegt werden. Verglichen werden daher sowohl für die PV- Produktion als auch für die aktive Kühlung Maximalszenarien, und es ist weder beim Kühlbedarf noch beim PV-Potenzial davon auszugehen, dass dies Maximalszenarien vollumfänglich umgesetzt werden. Ferner ist zu erwähnen, dass in der weiteren Betrachtung nur vom Haushaltsstrom und nur vom

momentanen Elektrizitätsbedarf ausgegangen wird. Eine gesteigerte Nachfrage wie Bsp. durch den vermehrten Einsatz von E-Mobilität oder Strombedarf für Gewerbe oder Industrie ist nicht berücksichtigt.

Neben der Bilanzbetrachtung ist es auch von Interesse zu prüfen, ob die produzierte Elektrizität der PV-Anlagen auch zeitgleich mit dem Wärmepumpenverbrauch zur Kühlanwendung anfällt. In diesem Fall ist keine Zwischenspeicherung der elektrischen Energie oder der Kälteenergie notwendig. Auch hier stimmen die ersten Ergebnisse auf Basis der Stundenwertauswertung sehr positiv. Die Gleichzeitigkeit von Bedarf und Produktion liegt für die betrachteten Szenarien bei 62 - 82 %. Diese hohen Werte könnten durch intelligente Anlagesteuerung oder zusätzliche Kältespeicher voraussichtlich noch massgeblich erhöht werden.

5.4 Diskussion gegenseitige Beeinflussung

Mit dem hier vorgestellten semianalytischen Sondenmodell kann die nachbarschaftliche Beeinflussung für sehr grosse Sondenfelder berechnet werden. Dadurch können viele, auch weit entfernten Sonden, in die Berechnung von Nachbareffekten mit einbezogen werden. Im Vergleich zu den Werten, welche in der SIA 384/6 gegeben werden, wurde dadurch ein etwas stärkerer Nachbareffekt vorausgesagt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Unterschiede ausschliesslich auf die Betrachtung zusätzlicher Sonden und nicht auf Abweichungen der verwendeten Modelle zurückzuführen sind. Eine Berechnung mit lediglich 48 Sonden (gleich wie zur Ermittlung der Werte der SIA 384/6) weist eine sehr gute Übereinstimmung auf und zeigt somit, dass sowohl die hier verwendeten Annahmen als auch die Modelle mit den Ansätzen anderer Autoren vergleichbar sind.

Die Auswertungen von Beispielquartieren zeigen, dass bei einer vollständigen Umstellung auf eine EWS-Wärmeversorgung ohne Regeneration die nachbarschaftliche Beeinflussung zu einer hohen zusätzlichen Auskühlung in den betrachteten Quartieren führen würde. Für einen Grossteil der Anlagen in den analysierten Quartieren würde diese nach 50 Betriebsjahren mehr als 5 K betragen (ab dieser Grenze wird in der neuen SIA 384/6 (2021) eine Regeneration vorgeschrieben). Die hohen Werte passen zu Erkenntnissen aus früheren Studien. Zum Vergleich: In der Studie RegenOpt[18] wurde von einer Entzugsdichte von ca. 35 kWh/m^2 ausgegangen, was zu einer zusätzlichen Auskühlung durch Nachbarsonden von ca. 7 K geführt hat. Bei einer Jahresarbeitszahl von 3 entspricht dies einem Wärmebedarf von ca. 53 kWh/m^2. Wie in Tabelle 17 gezeigt wird, liegt dieser Wert also etwas höher als im Südquartier von Rapperswil-Jona, aber deutlich unter den Zürcher Quartieren. Daher ist auch zu erwarten, dass die nachbarschaftliche Beeinflussung ohne Regeneration in den Zürcher Quartieren höher als bei RegenOpt ausfallen würde.

Tabelle 18: Wichtigste Kennzahlen der vier untersuchten Quartiere.

	Binz	Hottingen	Käferholz	Südquartier
Perimeterfläche in km^2	0.50	1.17	0.11	0.90
Wohnfläche (EBF) in m^2	683'000	1'259'000	64'000	309'000
Bedarf Heizen in MWh (ca.)	38'000	118'000	5'800	19'250
Bedarf Warmwasser in MWh (ca.)	6'000	19'000	1'100	6'400
Bedarf / Perimeterfläche (kWh/m^2)	**90**	**120**	**60**	**28**

Diese hohen Werte verdeutlichen, dass es sich dabei um Maximalszenarien handelt, welche in der Praxis so vermutlich nicht realisiert werden. Zum einen fordert die SIA 384/6 eine Berücksichtigung von Nachbareffekten und Massnahmen gegen die nachbarschaftliche Auskühlung. Zum anderen können aus praktischen Gründen nicht bei allen Gebäuden EWS installiert werden. Dies wurde im Quartier Hottingen untersucht. Wenn alle möglichen EWS umgesetzt würden (ca. 80 %), wäre die nachbarschaftliche Auskühlung im Mittel immer noch deutlich höher als 5 K und eine grossflächige Umsetzung von Regenerationsmassnahmen wäre nötig. Wenn nur die EWS Anlagen realisiert würden, welche sich nicht für einen Wärmeverbund eignen und in erster Priorität mit EWS versorgt werden sollen (lediglich ca. 10 % der Gebäude) bleibt die nachbarschaftliche Auskühlung meist unkritisch.

Wie auch bereits in den Betrachtungen zu den einzelnen Gebäudetypen gezeigt, kann bei den betrachteten Gebieten mit vielen Bestandsgebäuden die aktive Gebäudekühlung nur zu einem beschränkten Teil zur Sondenregeneration beitragen. Die gegenseitige Auskühlung würde auch bei einer flächendeckenden Umsetzung von aktiver Gebäudekühlung noch bei den meisten Gebäuden mehr als 5 K betragen. Nur im Quartier Käferholz mit einem energieeffizienten Gebäudebestand, oder wenn in fiktiven Szenarien alle Gebäude der anderen Quartiere mit Neubauten ersetzt oder weitestgehend thermisch saniert werden, kann die Regeneration durch aktive Kühlung der nachbarschaftlichen Auskühlung von EWS in einem relevanten Mass entgegengewirken. Dies aber nur, wenn auf passive Wärmeschutzmassnahmen verzichtet wird.

5.5 Diskussion Wirtschaftlichkeit und Kosten

In Kapitel 4.5 wurden eine passive Kühlung sowie verschiedene hydraulische Einbindungen der aktiven Kühlung bezüglich der Kosten für das Referenzgebäude «SPF Referenz Neubau KWL» ermittelt. Dabei war die Realisierung einer passiven Kühlung am günstigsten, die Ausführung aktiver Kühlung über eine reversible Wärmepumpe war ähnlich teuer wie die externe hydraulische Umschaltung. Die zusätzliche Wärmepumpe zum Kühlen war hingegen deutlich teurer.

Abgesehen von den Kosten sind jedoch noch Sondenverlängerung, Regenerationsgrade und räumliche Behaglichkeit zu beachten. Die wirtschaftliche Attraktivität der aktiven Gebäudekühlung steigt, falls es eine Sondenverlängerung wegen der nachbarschaftliche Auskühlung braucht. In dem Fall sind die effektiven Summen der Investitions- und Betriebskosten passiver und aktiver Gebäudekühlung ähnlich.

Um die räumliche Behaglichkeit im Sommer zu gewährleisten, sind passive sommerliche Wärmeschutzmassnahmen (Sonnenschutz, Nachtauskühlung, Fensterlüftung während des Tages) notwendig. Die Automatisierung derselben ist aber nicht obligatorisch. Die entstehenden Zusatzkosten der Automatisierung im Fall von passiver Gebäudekühlung sind deswegen fiktiv.

Im Falle einer aktiven Kühlung kann - im Gegensatz zur passiven Kühlung – kann auch bei einem Verzicht auf sommerliche Wärmeschutzmassnahmen eine moderate Raumtemperatur < 26.5 °C eingehalten werden. Die Nutzerakzeptanz des vollständigen Verzichts auf solche Massnahmen ist jedoch fraglich und braucht zusätzliche Untersuchungen. Wahrscheinlich ist ein Teilverzicht realistisch.

Die Studien RegenOpt[18] und ein suissetec Merkblatt[32] geben eine Übersicht über alternative Regenerationsmethoden inklusive Kostenabschätzung. Im Folgenden werden nur Investitionskosten berücksichtigt. Da die Investitionskosten bei alternativen Regenerationsmethoden, wie z.B. Sonnenkollektoren, von der Höhe der Regenerationsenergie abhängen, werden die Investitionskosten im Folgenden mit der jährlichen regenerierten Energiemenge normiert. Abbildung 50 zeigt die so normierten Investitionskosten als Funktion des Regenerationsgrads. Jeder Datenpunkt bezieht sich auf einer Zeile von Tabelle 18 und kann über das Kürzel zugeordnet werden. Die Kosten für die in diesem Bericht näher untersuchten Szenarien (rote Punkte mit Kürzel AK) für aktive Kühlung (immer auf das Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL bezogen) liegen im Kostenbereich der alternativen Regenerationsmethoden. Je höher der Regenerationsgrad, desto tiefer sind die normierten Kosten. Das liegt daran, dass mit gleichem Aufwand mehr Regenerationswärme erzeugt werden kann, indem auf passive Wärmeschutzmassnahmen verzichtet wird. Des Weiteren ist zu beachten, dass im Gegensatz zu alternativen Regenerationsmethoden bei aktiver Kühlung die Investitionskosten weitgehend unabhängig von der Gebäudegrösse sind, da lediglich in der Heizzentrale Veränderungen nötig sind. Dies bedeutet, dass bei grösseren Gebäuden bei ähnlichem Aufwand mehr Regenerationswärme in das Erdreich eingespeist werden kann und die normierten Investitionskosten (rote Punkte in Abbildung 50) weiter sinken. Bei kleineren Gebäuden als dem hier betrachteten Referenzgebäude ist das Gegenteil der Fall.

Auffallend ist weiterhin, dass die normierten Investitionskosten für passive Kühlung (Index PK in Abbildung 50) weit auseinander liegen. Im suissetec Merkblatt[32] und in dieser Studie wurde die gleiche Pauschale für den Umbau eines bestehenden Fussbodensystems zur Kühlung von 8'000 CHF angenommen. Da das betrachtete Gebäude im suissetec Merkblatt[32] mit 200 m^2 Energiebezugsfläche sehr viel kleiner ist als das hier betrachtetet Gebäude «SPF-Refenz Neubau KWL» mit 1'205 m^2 Energiebezugsfläche, wird bei suissetec weniger Regenerationswärme erzeugt und die normierten Investitionskosten sind daher höher. In RegenOpt[18] werden für die Realisierung von passiver Kühlung lediglich 2'500 CHF Materialkosten veranschlagt, bei einem ähnliche grossen Gebäude wie in dieser Studie (1'200 m^2 Energiebezugsfläche). Entsprechend sind die normierten Investitionskosten in der RegenOpt[18] Studie am tiefsten.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass vor allem bei grossen Gebäuden die Regeneration über aktive Kühlung ökonomisch attraktiv sein kann, da viel Regenerationswärme mit wenig Aufwand erzeugt wird. Zusätzlich - und dies wird beim Betrachten von Regenerationsgraden

und Kosten oft vernachlässigt - wird durch aktive Kühlung, im Gegensatz zu alternativen Regenerationsmethoden, der Komfort im Gebäude erhöht. Alternative Regenerationsmethoden reduzieren durch das Einspeisen von Wärme in die Erdsonden im Sommer die Möglichkeit zur passiven Kühlung. Des Weiteren ist zu betrachten, dass bei diesem Kostenvergleich die Kosteneinsparung durch den Verzicht auf Automatisierung nicht mitbetrachtet wurde.

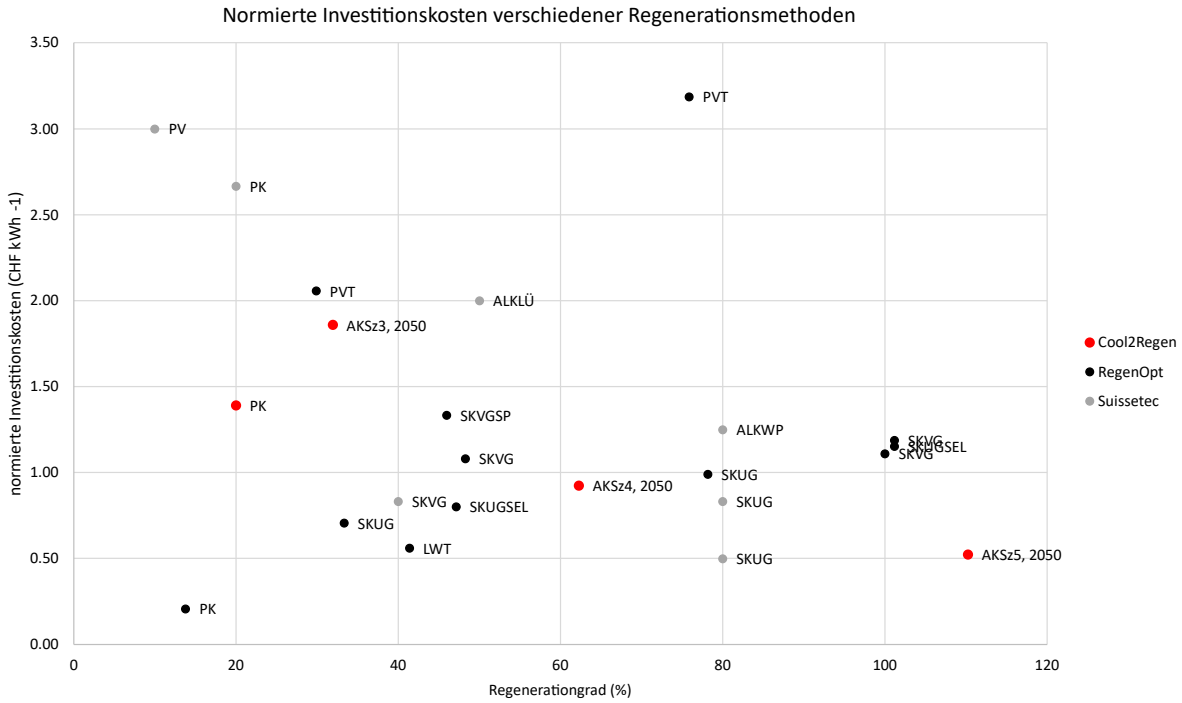


Abbildung 50: Investitionskosten verschiedener Regenerationsmethoden pro kWh Regenerationsenergie. Die Kennzeichnungen zu jedem Punkte sind in Tabelle 18 näher beschreiben.

Tabelle 19: Investitionskosten relative zur jährlichen Regenerationsenergie. Datengrundlage und Abkürzungen für Abbildung 52.

			Entzugsenergie	Regenerationsenergie	Regenerationsgrad	Investitionskosten	normierte Investitionskosten
			(MWh a^{-1})	(MWh a^{-1})	(%)	(CHF)	(CHF kWh^{-1})
	Regenerationsmethode	Kürzel in Grafik					
Cool2Regen	Passive Kühlung[1]	PK	29	6	**20**	8'000	**1.39**
	Aktive Kühlung Szenario 3, 2050	AKSz3, 2050	29	9	**32**	17'062	**1.86**
	Aktive Kühlung Szenario 4, 2050	AKSz4, 2050	30	18	**62**	17'062	**0.93**
	Aktive Kühlung Szenario 5, 2050	AKSz5, 2050	30	33	**110**	17'062	**0.52**
RegenOpt	Geo-cooling	PK	87	12	**14**	2'500	**0.21**
	LWT (60kW)	LWT	87	36	**41**	20'220	**0.56**
	Verglaste Kollektoren	SKVG	87	42	**48**	45'400	**1.08**
	Verglast inkl. Solarspeicher	SKVGSP	87	40	**46**	53'400	**1.34**
	Unverglaste, selektive Kollektoren	SKUGSEL	87	41	**47**	32'900	**0.80**
	Unverglaste Kollektoren	SKUG	87	29	**33**	20'500	**0.71**
	PVT Kollektoren (a	PVT	87	26	**30**	53'500	**2.06**
	Verglast (100 %)	SKVG	87	87	**100**	96'630	**1.11**
	Verglaste (100 %) inkl Solarpeicher	SKVG	87	88	**101**	104'630	**1.19**
Suissetec[2]	Unverglaste, selektive (100 %)	SKUGSEL	87	88	**101**	101'500	**1.15**
	Unverglaste (260 m2)	SKUG	87	68	**78**	67'330	**0.99**
	PVT (260 m2)	PVT	87	66	**76**	210'330	**3.19**
	Raumkühlung mit Fussbodenheizung	PK	15	3	**20**	8'000	**2.67**
	Sonnenkollektor verglast, Fläche 20 m2	SKVG	15	6	**40**	5'000	**0.83**
	Sonnenkollektor unverglast, Dach, Garten	SKUG	15	12	**80**	6'000	**0.50**
	Sonnenkollektor unverglast, Gehweg	SKUG	15	12	**80**	10'000	**0.83**
	Aussenluftkühler über Wärmepumpe, 5 kW	ALKWP	15	12	**80**	15'000	**1.25**
	Aussenluftkühler über Lüftungsanlage	ALKLÜ	15	7.5	**50**	15'000	**2.00**
	Überschüsse Photovoltaik, 5kWp	PV	15	1.5	**10**	4'500	**3.00**

[1] Es wurde ein Regenerationsgrad von 20 % Prozent angenommen
[2] Es wurden mittlere Regenerationsgrade gemäss Suissetec Mekblatt[32] vorausgesetzt

5.6 Abgrenzung und nicht betrachtete Aspekte

5.6.1 Gebäudetyp

In diesem Projekt wurden die Analysen auf Wohngebäude und dabei auf Mehrfamilienhäuser fokussiert. Wie von Poppei [34] aufgezeigt wurde, ist in Einfamilienhausquartieren keine starke gegenseitige Beeinflussung zu erwarten. Daher müssen auch keine hohen Regenerationsgrade erreicht werden und passive Wärmeschutzmassnahmen, ggf. in Kombination mit passiver Kühlung über die EWS zur Komfortsteigerung, werden bei Einfamilienhäusern daher meist die bessere Wahl sein. Bürogebäude weisen grössere interne Lasten und somit auch einen höheren Kühlbedarf auf, daher können die hier gemachten Analysen nicht übertragen werden. Die Kühlung von Bürogebäuden mit EWS wurde von Pahud et al.[3] untersucht und im Geeocooling Handbook[39] zusammengefasst.

5.6.2 Grenzen der passiven Kühlung

In diesem Projekt lag der Fokus auf aktiver Kühlung, weil mit passiver Kühlung «Freecooling» nur beschränkte Regenerationsgrade erreicht werden können[40]. Passive Kühlung wird nur im Kostenvergleich miteinbezogen. Auch bei passiver Kühlung kann möglicherweise der Regenerationsgrad erhöht werden, wenn auf passive Wärmeschutzmassnahmen verzichtet wird. Hohe Regenerationsgrade konnten in diesem Projekt nur mit Systemen erreicht werden, welche im Sommer Sondentemperaturen um 30 °C erreichten, womit keine passive Kühlung mehr möglich wäre. Daher ist zu erwarten, dass eine Kombination von passiver Kühlung mit einem Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen zu Überhitzungsstunden führen würde.

5.6.1 Kühlen mit Radiatoren

In Altbauten sind Radiatoren zur Wärmeverteilung weit verbreitet. Aufgrund der kleinen Abgabeflächen und der höheren Temperaturdifferenzen sind Radiatoren nur beschränkt für die Raumkühlung einsetzbar. Wie in Kapitel 4.1 aufgezeigt wurde, besteht bei Altbauten auch mit einem idealen Abgabesystem ein geringer Kühlbedarf, der nicht zu relevanten Regenerationsgraden führen kann. Daher wurde auf eine detaillierte Betrachtung von Radiatoren zur Raumkühlung verzichtet. Die limitierte Kälteübertragung von Radiatoren würde aber das sowieso schon geringe Potenzial nochmals zusätzlich einschränken. Die aktive Kühlung kann nur bei effizienten Gebäuden mit modernem Standard zum Erreichen von relevanten Regenerationsgraden eingesetzt werden. Dabei ist mit einem sehr hohen Anteil von grossflächigen Verteilsystemen (Fussbodenheizung oder TABS) zu rechnen.

5.6.2 Kombination mit anderen Kühlmethoden

In diesem Projekt wurde die aktive Kühlung in Kombination mit dem Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen untersucht und ein Kostenvergleich mit alternativen Regenerationsmethoden durchgeführt. Es gibt auch andere, alternative Regenerations-methoden, wie z.B. die Solarthermie, mit denen hohe Regenerationsgrade erreicht werden können. Auch dabei werden im Sommer erhöhte Sondentemperaturen erreicht, welche die Möglichkeit zur passiven Kühlung einschränken[40]. Wenn auf Grund des Klimawandels ein Kühlbedarf entsteht, ist es bei bereits mit alternativen Methoden regenerierten Sonden oft nicht mehr möglich eine passive Kühlung zu realisieren, weil die Temperaturen im Sommer zu hoch

sind. Alternative Regeneration verlangt also unter Umständen nach aktiver Kühlung mit einer Wärmepumpe/Kältemaschiene um unabhängig von der Erdreichtemperatur noch eine Kühlung realisieren zu können. Unter welchen Bedingungen bei Regeneration der Erdsonden eine aktive Kühlung nötig wird, ist eine Fragestellung, welche in diesem Bericht nicht geklärt wurde.

Wird bei bestehenden Gebäuden der Wärmebedarf bereits durch Erdsonden gedeckt und wurde eine zu starke Abkühlung des Erdreichs festgestellt, kann in der Regel die Erdsondenlänge nicht mehr geändert werden. In diesem Fall sind Regeneration der Erdsonden bzw. eine Reduktion des Heizwärmebedarfs die einzigen Möglichkeiten das Abkühlen des Erdreichs zu bremsen. Auch hier ist zu beachten, dass eine passive Kühlung in Kombination mit einer anderweitigen Regeneration wegen zu hohen Erdreichtemperaturen im Sommer möglicherweise nicht möglich ist.

5.6.3 Innenliegende Blenden

Der Komplettverzicht auf äussere Verschattung durch Jalousien und stattdessen der Einsatz von innenliegenden Blenden bietet enormes Kosteneinsparpotential, welches aber in diesem Bericht nicht quantifiziert wurde. Die hier durchgeführten Simulationen deuten darauf hin, dass die Komfortbedingungen ohne aussenliegende Verschattung, dafür mit aktiver Kühlung, weitgehend eingehalten werden können. Ob ein Ersatz von aussenliegenden Jalousien mit innenliegenden Blenden aber von Nutzern akzeptiert würde, kann hier nicht beurteilt werden.

5.6.4 Kühlen zur Brauchwassererwärmung

Im Kühlbetrieb in Kombination mit einer Wärmepumpe besteht die Möglichkeit, mit der Abwärme aus der Kühlung im Sommer direkt Brauchwarmwasser zu produzieren. Dies erfordert jedoch eine zusätzliche externe Umschaltung, da Heizkreis (Fussbodensystem) und Brauchwarmwasserkreis im Heizfall beide an den Kondensator der Wärmepumpe gekoppelt sind. Ein zusätzlicher Wärmeübertrager wäre nötig, um den Heizungskreislauf in den Solekreis und somit auf die Verdampferseite der Wäremepumpe einzubinden. Diese Einbindung wurde hier nicht näher untersucht und in den Simulationen nicht abgebildet, weil bei einer früheren Untersuchung dieser Umschaltung keine entscheidenden Effizienzgewinne aufgezeigt werden konnten und der Zusatzaufwand als nicht gerechtfertigt eingestuft wurde[41].

5.6.5 Hydraulische Einbindungen zur Kühlung des Gebäudes

In den hier durchgeführten Simulationen wurde die aktive Kühlung über eine separate Wärmepumpe realisiert. Eine detaillierte quantitative Analyse und hydraulische Simulation der unterschiedlichen Einbindungsvarianten übersteigen den Rahmen dieses Forschungsprojekts. Im Annex F werden aber die Vor- und Nachteile dieser Varianten diskutiert und miteinander verglichen.

5.6.6 Steigender Bedarf für elektrische Energie

Bei den Analysen zum Deckungsgrad des Kühlbedarfes mit lokal produzierter Solarenergie wurde der Haushaltsstrom, nicht aber der voraussichtlich steigende Bedarf von elektrischer Energie für die Elektromobilität berücksichtigt. Die Energieperspektiven 2050+ gehen für 2050 von einem Elektrizitätsbedarf für Mobilität aus, der ziemlich genau dem heutigen Bedarf der Haushalte entspricht. Dies wird die Verfügbarkeit von Solarstrom für die Gebäudekühlung in den Quartieren sicherlich vermindern. Die Energieperspektiven 2050+ gehen aber trotz stark gesteigertem Bedarf für Elektromobilität für 2050 von einer Überproduktion von Solarstrom im Sommer aus. Die potenzielle Verfügbarkeit elektrischer Speicherkapazität in Elektrofahrzeugen kann auf der anderen Seite auch dazu genutzt werden, um die Deckung des Kühlbedarf durch Solarenergie zu erhöhen.

6 Schlussfolgerungen

6.1 Heiz- und Kühlbedarf

Nur bei Niedrigenergiehäusern ähnlich dem Gebäude SPF Referenz Neubau KWL dieser Studie können durch Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen relevante Regenerationsgrade erreicht werden. Grund dafür ist der geringe Wärmebedarf durch gute Wärmedämmung und der erhöhte Kühlbedarf auf Grund eines erhöhten Fensteranteils. Werden passive Wärmeschutzmassnahmen eingehalten, bleibt der Kühlbedarf auch nach der Berücksichtigung der Klimaerwärmung gering und kann nicht zum Erreichen von relevanten Regenerationsgraden genutzt werden. Bei einem vollständigen Verzicht auf Wärmeschutzmassnahmen und nach der Berücksichtigung der Klimaerwärmung kann der Kühlbedarf bis in die Grössenordnung von ca. 20 kWh/m^2 steigen. Durch die Einbindung eines Lüftungssystems mit Aussenluftkühlung und Entfeuchtung können zusätzliche ca. 10 kWh/m^2 Energie zur Regeneration aus dem Gebäude entzogen werden. Bei Alt- und Bestandsbauten liegt der spezifische Heizbedarf deutlich über diesen Werten und zusätzlich verringert sich der Kühlbedarf gegenüber modernen Gebäuden aufgrund der kleineren Fensterflächen. Das Erreichen von relevanten Regenerationsgraden durch aktive Kühlung ist daher bei nicht sanierten Alt- und Bestandsbauten nicht möglich.

6.2 Wärmeerzeugung

Die Bereitstellung der notwendigen Kälteenergie über die Gebäudetechnische Installation scheint in den untersuchten Szenarien und mit dem eingesetzten System möglich. Es wurden im Rahmen der Ausarbeitung diverse Varianten der hydraulischen und konzeptionellen Einbindung der Regeneration vorgestellt und beschrieben. Für die detaillierte Auswertung wurde jedoch (in Rücksprache mit der Begleitgruppe) nur ein System detailliert betrachtet, welches den zu erwartenden Marktansprüchen entspricht (aktive Regeneration über Wärmepumpen mit Umkehrfunktion ‘reversibles Gerät’). Für eine detailliertere Aussage müssten voraussichtlich auch die weiteren Systeme genauer betrachtet werden. Insbesondere die technisch wenig anspruchsvolle Variante der passiven Regeneration (Freecooling) kann im Bestandesbau interessant sein, da dort die zu erwartende Kühllast wesentlich geringer ist als in Neubauten / Bauten mit Neubaucharakter.

6.3 Quartieranalyse

In den betrachteten Zukunftsszenarien kann erwartet werden, dass auf Quartierebene in den Sommermonaten die Mengen an lokal produziertem PV-Strom den Strombedarf für die aktive Gebäudekühlung deutlich übertrifft und dass eine sehr gute zeitliche Korrelation zwischen diesen Grössen besteht. Die Deckungsgrade mit dem Kältebedarf in den untersuchten Szenarien sind hoch und könnten vermutlich durch Einsatz von intelligenter Anlagesteuerung und/oder Kältespeicherung noch wesentlich optimiert werden.

6.4 Nachbarschaftliche Beeinflussung

6.4.1 Regelmässiges Raster

Das angepasste semianalytische Sondenmodell erlaubt eine Berechnung der gegenseitigen Beeinflussung von sehr vielen Sonden. Gegenüber den Berechnungen, welche für die SIA 384/6 durchgeführt wurden, können damit viel mehr, und auch weiter entfernte Sonden mit einbezogen werden. Es konnte damit aufgezeigt werden, dass die nachbarschaftliche Auskühlung mit der in der SIA 384/6[2] angegebenen Abhängigkeit zwischen Entzugsdichte und Temperaturabfall nach 50 Jahren eher unterschätzt wird. Dabei ist der Effekt vor allen bei kürzeren Sonden und somit in Gebieten mit einer Bohrtiefenbeschränkung stärker. Eine Anpassung/Ergänzung der entsprechenden Grafik ist bei der nächsten Revision der SIA384/6 zu prüfen.

6.4.2 Beispielquartiere

Die Analyse der vier Beispielquartier hat gezeigt, dass ein vollständiger Umstieg auf eine Wärmeversorgung mit EWS zu einer sehr hohen Auskühlung des Untergrundes führen würde und nicht ohne Zusatzmassnahmen umsetzbar wäre. Bei bestehenden, dicht bebauten Quartieren mit geringem Sanierungspotenzial kann diese Langzeitauskühlung nicht entscheidend durch eine Regeneration mit aktiver Kühlung verringert werden. Hier könnte nur ein partieller Umstieg auf eine Versorgung mit EWS-Wärmepumpen umgesetzt werden oder es müssen zusätzliche Regenerationstechnologien installiert werden. Bei Neubauquartieren hingegen kann die Regeneration durch aktive Kühlung der Langzeitauskühlung des Untergrundes entscheidend entgegenwirken, wenn auf passive Wärmeschutzmassnahmen verzichtet wird.

6.5 Wirtschaftlichkeit und Kosten

Für Neubauten ist aktive Kühlung in Kombination mit dem Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen eine attraktive Methode zur Regeneration von Erdsonden. Sie ist durch den geringen Materialeinsatz kostengünstiger als alternative Regenerationsmethoden und bietet zusätzlich den Service der Raumkühlung. Im Fall einer nachbarschaftlichen Auskühlung ist die Regeneration durch aktives Kühlen preislich ähnlich wie eine passive Kühlung mit Sondenverlängerung. Die Preisdifferenz zwischen Regenerationsmethoden ist von der Entzugsdichte abhängig.

Mit dem bewussten Verzicht auf die Nutzung der sommerlichen Wärmschutzmassnahmen (Sonnenschutz, Nachtauskühlung, zusätzliche Fensterlüftung) sowie auf deren Automatisierung könnten nicht nur höhere Kosten eingespart sondern auch viele

Regenerationsenergie gewonnen werden. Die Nutzerakzeptanz von diesem Verzicht ist aber fraglich und braucht eine zusätzliche Untersuchung.

Für Bestandsbauten ist der Heizwärmebedarf zu gross und der Kühlbedarf zu klein, um hohe Regenerationsgrade zu erhalten. Zusätzlich sind Alt- und Bestandsbauten häufig nicht mit Fussbodensystemen oder Kühldecken ausgestattet und eine Kühlung (aktiv oder passiv) ist daher mit hohen Investitionskosten verbunden. Dennoch kann aktive Kühlung auch für Bestandsbauten relevant werden. Dies aber nicht als alleinige Methode zum erreichen hoher Regenerationsgrade. Werden Bestandsbauten basierend auf Erdsonden geheizt, besteht die Gefahr der übermässigen Abkühlung des Erdreichs. Bei einer grossflächigen Umsetzung in einem Altbauquartier muss mit einer alternativen Methode regeneriert werde. Die meisten Methoden zum Erreichen hoher Regenerationsgrade (z.B. mit solarthermischen oder PVT-Kollektoren) sind hauptsächlich im Sommer aktiv und erreichen dabei Temperaturen um 30 °C oder mehr. Entsteht aufgrund des Klimawandels ein Bedürfnis zur Kühlung, kann diese wegen zu hohen Sondentemperaturen im Sommer möglicherweise nur noch aktiv mit Wärmepumpen gewährleistet werden. Eine aktive Kühlung muss in einer solchen Situation also «aufgrund» und nicht «mit dem Ziel» von hohen Regenerationsgraden eingeführt werden.

Dieses Projekt beschäftigte sich mit aktiver Kühlung, welche unter den oben genannten Bedingungen attraktiv und sinnvoll sein kann. Trotzdem gilt vor allem beim Gebäudebestand für viele Fälle: Falls der erwartete Kühlbedarf deutlich geringer ist als der Wärmebedarf und aufgrund der Nachbarsituation keine Regeneration des Erdreichs erforderlich ist, dann ist passive Kühlung der aktiven Kühlung vorzuziehen.

7 Ausblick

7.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die aktuell gültigen Vorschriften und Regelwerke sind so aufgebaut, dass eine aktive Kühlung von Wohngebäuden verhindert oder eingeschränkt wird, auch wenn sie nicht explizit verboten ist. Die SIA 180 verlangt sommerliche Wärmeschutzmassnahmen, welche das Einhalten des Komforts auch ohne aktive Kühlung ermöglichen. Die Grenzwerte der MuKEn 2014[42] und von Minergie beziehen sich auf den gewichteten Energiebedarf inklusive Klimatisierung, der nicht mit selber produziertem PV Strom reduziert werden kann. Wird also eine aktive Kühlung geplant, muss der zusätzliche Energieverbrauch mit anderen Massnahmen kompensiert werden.

Diese Regeln sind historisch gewachsen und berücksichtigen den steigenden Kühlbedarf durch den Klimawandel und die prognostizierte Überproduktion von Solarstrom im Sommer nicht. Sowohl in den Kantonen als auch bei Minergie waren während der Projektlaufzeit Diskussionen über Anpassungen dieser Regeln im Gange. Daher ist es wahrscheinlich, dass die aktive Kühlung von Wohngebäuden, speziell wenn diese hauptsächlich mit selber produziertem PV Strom durchgeführt wird, bei zukünftigen Anpassungen der gesetzlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen erleichtert wird.

7.2 Verzicht auf Wärmeschutzmassnahmen und Nutzerakzeptanz

Das Projekt hat aufgezeigt, dass der Verzicht auf Wärmeschutzmassnahmen den Kühlbedarf und somit das Potenzial zur Regeneration von EWS stark erhöht. Weil passive Wärmeschutzmassnahmen oft durch den Nutzer umgesetzt oder verhindert werden können, spielt das Nutzerverhalten hierfür eine entscheidende Rolle. Ob Massnahmen wie der Verzicht auf eine Verschattung oder eine Nachtauskühlung von Nutzern akzeptiert würden, kann in diesem Projekt nicht beantwortet werden. Praxisuntersuchungen haben gezeigt, dass passive Massnahmen zum Wärmeschutz von Nutzern nur bedingt umgesetzt werden und zum Beispiel Fenster auch bei hohen Temperaturen nicht verschattet, oder offengelassen werden[7]. Ein vollständiger Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen wird wohl mit realen Nutzern ebenso wenig umsetzbar, wie deren vollständige Einhaltung. Es ist aber anzunehmen, dass eine funktionierende aktive Kühlung das Bedürfnis der Bewohner zur Verschattung der Fenster oder zur Nachtauskühlung verringern wird. Weil die Umsetzung passiver Wärmeschutzmassnahmen einen sehr hohen Einfluss auf den Kühlbedarf und somit auch auf das Regenerationspotenzial und letztlich auf die Auslegung von Erdwärmesonden hat, wären hier mehr Informationen wünschenswert. Die Nutzerakzeptanz sollte daher in Folgeprojekten untersucht werden.

8 Danksagung

Das Autorenteam dankt dem Bundesamt für Energie, der Ostschweizer Fachhochschule, der Hochschule Luzern und der CTA AG für die finanzielle Unterstützung sowie den Mitgliedern der Begleitgruppe für die wertvollen Inputs zum Projekt.

9 Publikationen

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes werden am SPF Industrietag 2022, der nationalen Wärmepumpentagung 2022, dem BRENET Statusseminar 2022 und der BauSim 2022 präsentiert.

10 Literaturverzeichnis

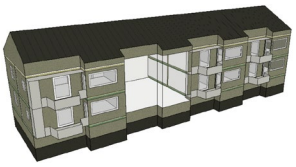
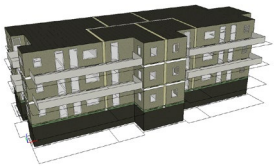
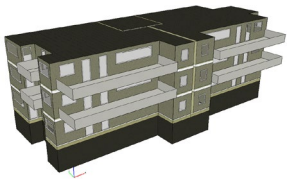
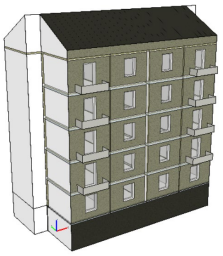
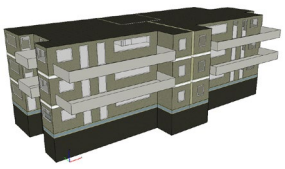
1. Jakob, M., Flury, K. & Gross, N. Energiekonzept 2050 für die Stadt Zürich – Auf dem Weg zu einer 2000-Watt-tauglichen Wärmeversorgung. (2012).
2. SIA 384/6. Erdwärmesonden. *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein* (2021).
3. Pahud, D., Belliardi, M. & Caputo, P. Geocooling potential of borehole heat exchangers' systems applied to low energy office buildings. *Renewable Energy* **45**, 197–204 (2012).
4. Kriesi, R. *Methoden der Erdsonden-Regeneration mit Sekundärnutzen oder tiefen Wärmekosten*. (2017).
5. SIA 180. Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein* (2014).
6. Settembrini, G. *et al. ClimaBau – Planen angesichts des Klimawandels*. (Bundesamt für Energie, 2017).
7. Mojic, I. *et al. ImmoGap: Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäuser*. (Bundesamt für Energie BFE, 2018).
8. *Meteonorm*. (METEOTEST, 3012 Bern).
9. Koschenz, M. *et al. ResCool: Klimaanpassung von Neu-, Umund bestehenden Wohnbauten – effiziente Kühlkonzepte*. (2021).
10. SIA 382/1. Lüftungs- und Klimaanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen. *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein* (2014).
11. SIAMB2024: SIA Merkblatt 2024:2015 Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik. 156 (2015).
12. CTA AG. Brine/Water Optiheat Inverta Economy OH I 9e to OHI 17e. (2020).
13. BFE. Sonnendach.ch - Datenmodell. (2016).
14. Molinari, D. Statistik der Schweizer Städte. (2021).
15. Nipkow, J. *Der typische Haushalt-Stromverbrauch*. (2013).
16. Portmann, M., Galvagno-Erny, D., Lorenz, P., Schacher, D. & Heinrich, R. Sonnendach.ch und Sonnenfassade.ch: Berechnung von Potenzialen in Gemeinden. (2019).
17. Cimmino, M. & Bernier, M. A semi-analytical method to generate g-functions for geothermal bore fields. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **70**, 641–650 (2014).
18. Persdorf, P., Ruesch, F. & Haller, M. *RegenOpt Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher Beeinflussung von Erdwärmesonden: energetische und ökonomische Analysen*. (2015).
19. EnergieSchweiz. *Dokumentation Solardachrechner*. (2020).
20. AWE. *EnergyGIS Wärme (NRJW) Daten*. (2017).
21. BFS. GWR Basisdatensatz, Statistische Grundlagen und Übersicht, Version 4.1. (2018).
22. Stadt Zürich. Geodatenbank EV_Stadtgebiet. (2018).
23. swisstopo. swissBUILDINGS3D 2.0. (2020).
24. Stocker, T. F. *et al. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Cambridge University Press, 2013).
25. SIA. SIA Merkblatt 2028: Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik. (2010).

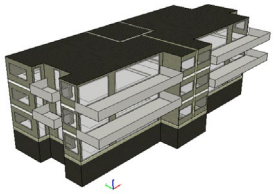
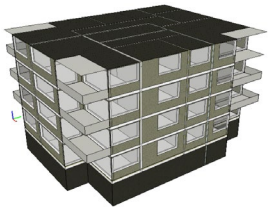
26. Paul Curschellas, R. Objektarten-Katalog OAK Wohnbauten im Vergleich. *CRB Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung* (2012).
27. Projekt Kostenklarheit, Teilprojekt Wohnbauten. *Stadt Zürich, Amt für Hochbauten und b+p baurealisation ag* (2012).
28. Kriesi, R. Merkblatt 5/2020: Erdwärmesonden: Entlastung oder Regeneration? *Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband (suissetec)* (2020).
29. *Helios Preisliste 2022*. https://www.helios.ch/de/downloads.
30. CTA AG. Preisliste 2021 Wärmepumpen-Systeme der CTA AG. (2021).
31. CTA AG. Preisliste 2021 Wärmepumpen-Systeme der CTA AG: Zubehör. (2021).
32. suissetec. suissetec-Merkblatt 'Hagelresistentes Bauen bei Spenglerarbeiten'. *HK-Gebäudetechnik* vol. 15 27 (2015).
33. pvtarif | VESE. https://www.vese.ch/pvtarif/.
34. Poppei, J. *Strategische Planung von Erdwärmesonden*. (2018).
35. Luca, B., Gregor, S. & Felix, F. Studienauftrag Wärmeversorgung Quartier Hottingen - Kurzbericht. (2021).
36. Bosshard, I., Moser, C. & Haller, M. *VenTSol - Erfassung des Benutzerverhaltens bezüglich Lüftung, Verschattung und Raumtemperatur in Abhängigkeit des Aussenklimas*. (2021).
37. Mastelic, J. *et al. Projet UserGap*. (2018).
38. Albrecht-Wilder, S., Gutschner, M., Biel, T. & Remund, J. Studie zur Bestimmung des PV Potentials innerhalb des Zürcher Stadtgebiets. (2021).
39. Pahud, D. & Belliardi, M. *Geocooling Handbook*. (2011).
40. Ruesch, F. & Haller, M. Potential and limitations of using low-temperature district heating and cooling networks for direct cooling of buildings. *Energy Procedia* **122**, 1099–1104 (2017).
41. Afjei, Th. & Huber, A. *Heizen und Kühlen mit Erdgekoppelten Wärmepumpen*. http://www.hetag.ch/download/SB_HuKeWP.pdf (2007).
42. Konferenz Kantonaler Energiedirektoren. Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEn) Ausgabe 2014, Entwurf. (2014).
43. Eskilson, P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. (Department of Mathematical Physics, University of Lund, 1987).
44. Eskilson, P. *Superposition Borehole Model - Manual for Computer Code*. (1986).
45. Cimmino, M., Bernier, M. & Adams, F. A contribution towards the determination of g-functions using the finite line source. *Applied Thermal Engineering* **51**, 401–412 (2013).

Annex A Methodik Heiz- und Kühlbedarf

A.1 Beschreibung von simulierten Gebäudemodellen

Tabelle 20: Auflistung und Beschreibung sämtlicher im Rahmen der Arbeit verwendeter Referenzgebäude.

Name	Beschreibung	Visuelle Darstellung
ClimaBau – Altbau Standard	Unsanierter Altbau aus den 70-er Jahren Fensterlüftung (CO_2-Konzentration im Winter zwischen 1100-1500 ppm) Anzahl der Wohnungen 8 Anzahl der Fenster 56 Fensteranteil 16 % Heizwärmebedarf 140 kWh/m² EBF (Energiebezugsfläche) 964 m²	
SPF-Referenz Altbau	Unsanierter Altbau Fensterlüftung (CO_2-Konzentration im Winter zwischen 600-1000 ppm) Anzahl der Wohnungen 12 Anzahl der Fenster 84 Fensteranteil 11 % Heizwärmebedarf 135 kWh/m² EBF 1164 m²	
SPF-Referenz Bestand	Bestandbau Fensterlüftung (CO_2-Konzentration im Winter zwischen 600-1000 ppm) Anzahl der Wohnungen 6 Anzahl der Fenster 72 Fensteranteil 20 % Heizwärmebedarf 80 kWh/m² EBF 1169 m²	
ClimaBau – Altbau geschützt	Sanierter Altbau Fensterlüftung (CO_2-Konzentration im Winter zwischen 1100-1500 ppm) Anzahl der Wohnungen 5 Anzahl der Fenster 50 Fensteranteil 22 % Heizwärmebedarf 60 kWh/m², EBF 924 m²	
SPF-Referenz MuKEn saniert	Sanierter Altbau Fensterlüftung (CO_2-Konzentration im Winter zwischen 600-1000 ppm), Anzahl der Wohnungen 6 Anzahl der Fenster 72 Fensteranteil 19 % Heizwärmebedarf 50 kWh/m² EBF 1205 m²	

SPF-Referenz Neubau KWL	Neubau mechanische Lüftung Anzahl der Wohnungen Anzahl der Fenster Fensteranteil Heizwärmebedarf EBF	 1 m³/h/m²), 6 54 34 % 15 kWh/m² 1205 m²	
ClimaBau – Niedrigenergie	Neubau mechanische Lüftung Anzahl der Wohnungen Anzahl der Fenster Fensteranteil Heizwärmebedarf EBF	 1 m³/h/m² 9 54 57 % 8 kWh/m² 1515 m²	

Die Simulationsmodelle 'SPF-Referenz Neubau KWL' und 'ClimaBau – Niedrigenergie' verfügen über eine mechanische Lüftungsanlage mit einem Wärmerückgewinnungsgerät (Wirkungsgrad von 80 %). Die Wärmeverluste über die Lüftung sind entsprechend reduziert. In den anderen Simulationsmodellen erfolgt der Luftaustausch durch manuelle Fensterlüftung. Jedes Referenzgebäude wurde je nach Szenario mit idealen Heiz- und Kühlsystemen ausgestattet. Die Wirksamkeit von unterschiedlichen Heiz- und Kühlsystemen in Gebäuden wird anhand des Simulationsgebäudes 'SPF-Referenz Neubau KWL' untersucht. Die Sollwerte der empfundenen Raumtemperatur wurden anhand von Figur 4 aus SIA 180:2014 «Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden»[5] (siehe Abbildung 5) definiert.

- Solltemperatur Heizung:
  21 °C (unterer Grenzwert aus Abbildung 5 plus 0.5 °C Reserve)
- Solltemperatur Kühlung:
  26 °C (oberer Grenzwert aus Abbildung 5 minus 0.5 °C Reserve)

Für die Regelung der Heiz- und Kühlsysteme werden PI-Kontroller eingesetzt.

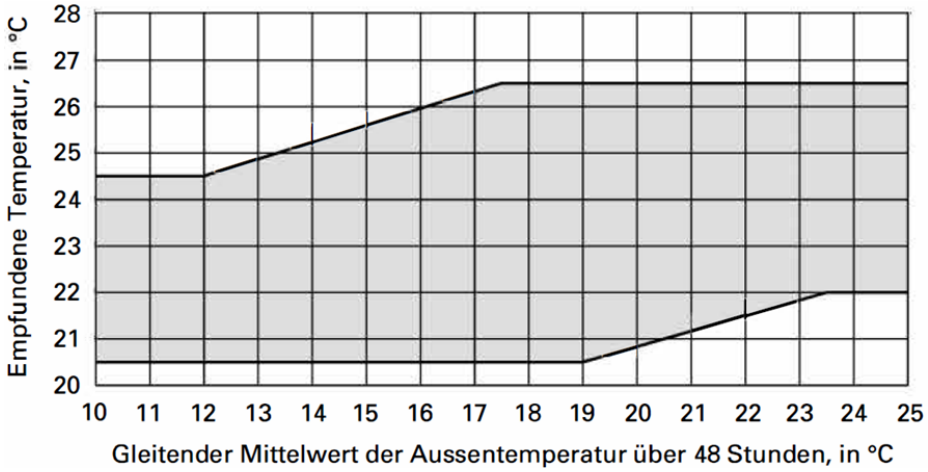


Abbildung 51: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Wohn- und Büroräumen, während diese beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet sind, je nach gleitendem Mittelwert der Aussentemperatur nach SIA 180:2014.

A.2 Heiz- und Kühlsysteme in den Gebäuden

Nachfolgend werden die Kenndaten für die Auslegung des Heiz- und Kühlsystems aufgeführt. Es gilt zu beachten, dass die Parameterstudie zu den Heiz- und Kühlsystemen nur für das Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL durchgeführt wurde. Die aufgeführten Parameter beziehen sich somit lediglich auf dieses Gebäude.

Ideales Heiz- und Kühlsystem

Beim idealen Heiz- und Kühlsystem steht die Heiz- und Kühlleistung jederzeit zur Verfügung. Damit können die gewählten Komfortbedingungen (empfundene Raumtemperatur) im Raum zu jedem Zeitpunkt in akzeptablen Grenzen eingehalten werden.

Heiz- und Kühldeckensegel

Für jede Wohnung des Simulationsmodells werden Heiz- und Kühldeckensegel unter der Decke des Raumes platziert.

Die Gesamtfläche der Kühldeckensegel beträgt ca. 80 % der verfügbaren Deckenfläche. Die Vorlauftemperaturen für den Heiz- und Kühlfall sind identisch zum Fussbodensystem (siehe unten). Die Heizleistung entspricht 42 W/m² bei einer Raumlufttemperatur von 21 °C und bei mittlerer Wassertemperatur im System von 35 °C. Die Kühlleistung beträgt 94 W/m² bei einer Raumlufttemperatur von 26 °C und bei einer Eintrittstemperatur ins System von 18 °C. Der Gesamtwassermassenstrom im Auslegefall beträgt 4.2 L/s (0.7 L/s in jedem der sechs parallelen Stränge).

Bodenkühlung mit Zuluftkühlung

Das Fussbodensystem zur Bodenkühlung entspricht einer Fussbodenheizung, welche zum Kühlen eingesetzt wird. Für jede simulierte Wohnung wurde eine Rohrleitung für das Fussbodenheizsystem im Zementestrich verlegt. Das Fussbodensystem besteht aus sechs in Parallelschaltung angeordneten Rohrsystemen, belegt ca. 80 % der verfügbaren Bodenflächen in einer Wohnung und die Verlegungstiefe beträgt 4 cm. Die Wasservorlauftemperatur

ist sowohl für den Heiz- und den Kühlfall vorgegeben. Im Heizfall ist die Wasservorlauftemperatur witterungsabhängig geführt mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 35 °C bei -8 °C Aussentemperatur. Im Kühlfall ist die Vorlauftemperatur konstant 18 °C, um Kondensatbildung zu vermeiden. Das Bodensystem wird anhand der empfundenen Raumtemperatur gesteuert. Die Auslegeleistungen für den Heiz- und Kühlfall betragen 40 W/m² und 25 W/m². Die Auslegeleistung dient der Dimensionierung des Wassermassenstroms im Fussbodenheizsystem. Der Gesamtwassermassenstrom im Auslegefall beträgt 1.8 L/s (0.3 L/s in jedem der sechs parallelen Stränge).

Die Lüftungsanlage wird mit einem konstanten Volumenstrom von 1 m³/h pro m² Nettogeschossfläche betrieben (nach SIA Merkblatt 2024[11]), um die CO_2-Konzentration in der Raumluft unter 1000 ppm einzuhalten. Die Lüftungsanlage wird so gesteuert, dass die Zulufttemperatur bei 21 °C bleibt. Im Sommerfall wird die einströmende Aussenluft mit einem Wärmerückgewinnungsgerät und nachstehenden Kühlregister abgekühlt (Abbildung 52). Im Raum mischt sich diese Zuluft mit der Raumluft.

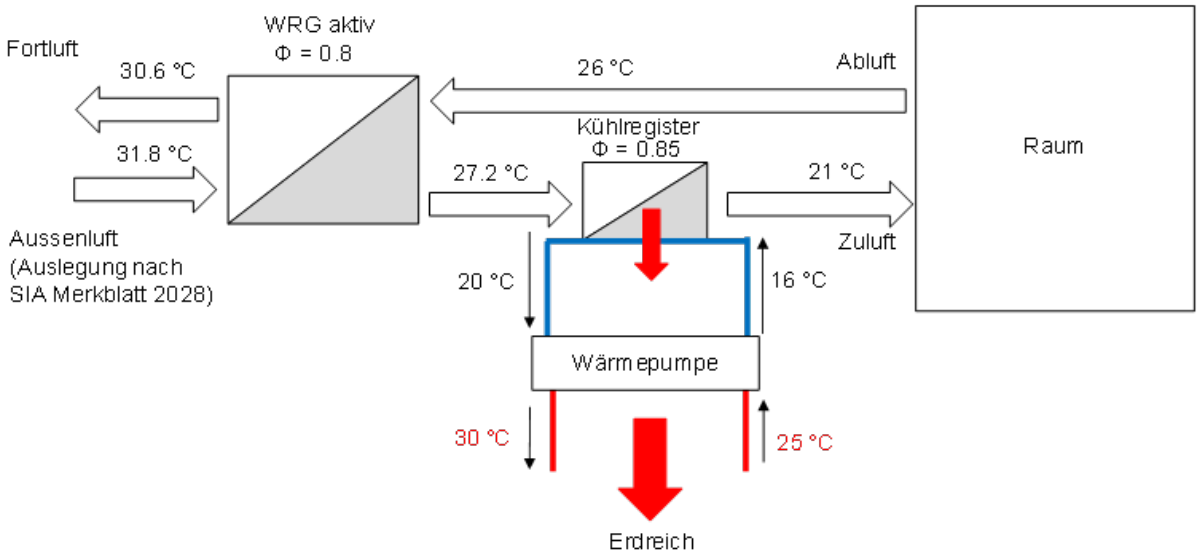


Abbildung 52: Luftvorkühlung zur Unterstützung des Bodenkühlsystems. Schematische Darstellung der für die Kühlung relevanten Komponenten ohne Ventilatoren, Klappen, Filter, Sensoren, Kältespeicher, Schalldämpfer. Temperaturangaben sind lediglich Beispiele zum besseren Verständnis. Dicke Pfeile ohne Füllung zeigen die Richtung des Luftstroms an, dünne Pfeile die Richtung des Wasser/Sole Massenstroms. Dicke rote Pfeile geben die Richtung des Wärmestroms an.

Bodenkühlung mit Aussenluftvorkühlung und -entfeuchtung

In der Systemvariante «Bodenkühlung mit Aussenluftvorkühlung und -entfeuchtung» wird warme feuchte Aussenluft vor dem Eintritt in das Wärmerückgewinnungsgerät abgekühlt und entfeuchtet (Abbildung 53), damit die Raumluftfeuchte unterhalb 60 % bleibt. In der Studie Kriesi et al. «Methoden zur Erdsondenregeneratio»[4] wurden ähnliche Systeme mit einer Luftabkühlung auf 10 °C und 5 °C untersucht. Durch die Abkühlung kondensiert ein Teil des in der Aussenluft enthaltenen Wasserdampfes und die Aussenluft wird dadurch entfeuchtet. Die durch Abkühlung und Entfeuchtung freigewordene sensible und latente Wärme wird dem Verdampferkreis der Wärmepumpe zugeführt. Auf der Kondensatorseite der Wärmepumpe wird das erhitzte Wasser zur Regeneration des Erdreichs bereitgestellt. Die abgekühlte und

entfeuchtete Aussenluft wird in einem Wärmerückgewinnungsgerät wieder auf 21 °C erwärmt und als Zuluft dem Raum zugeführt. Im gleichen Prozess wird im Wärmerückgewinnungsgerät die Abluft aus dem Raum abgekühlt und diese anschliessend wieder der Aussenluft zugeführt.

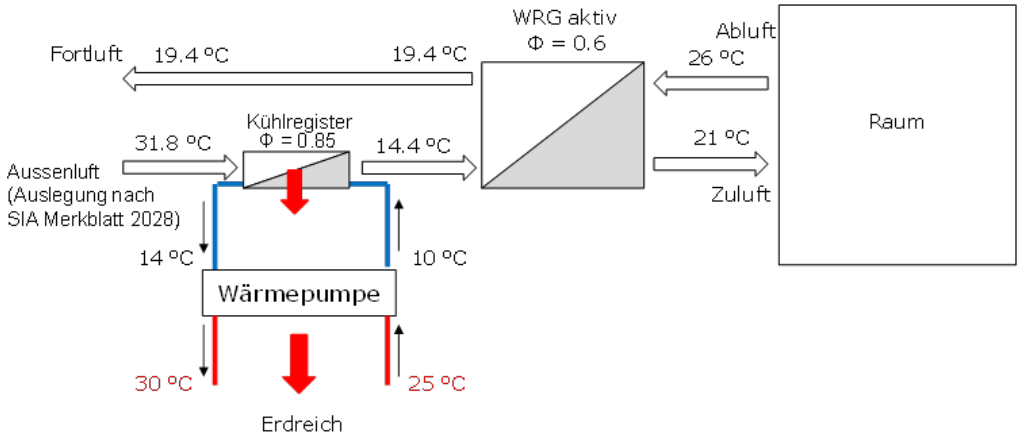


Abbildung 53: System nach Kriesi. Schematische Darstellung der für die Kühlung relevanten Komponenten. Es gelten die gleichen Anmerkungen wie in Abbildung 52.

A.3 Passive Wärmeschutzmassnahmen der Gebäude

Sonnenschutz

Die Verschattung wird geschlossen, falls die auf die Fassade einfallende Solarstrahlung mehr als 200 W/m² beträgt und die Raumtemperatur 23 °C überschreitet. Aus Sicherheitsgründen wird die Verschattung nicht geschlossen, falls die Windgeschwindigkeit 10 m/s überschreitet.

Nachtauskühlung

Die Nachtauskühlung basiert auf der beschriebenen Regelkaskade gemäss SIA 382/1:2007 und wird zwischen 21 Uhr und 7 Uhr mittels Fensterlüftung (Kippwinkel 5°) durchgeführt, falls folgende Bedienungen erfüllt sind:

- die Raumtemperatur überschreitet 23 °C
- die Aussentemperatur ist nicht kleiner als 18 °C
- die Temperaturdifferenz zwischen Raum und aussen beträgt mindestens 2 Kelvin

Aussenluftkühlung

Aussenluftkühlung wird durch Fensterlüftung während des Tages realisiert. Falls die Aussenlufttemperatur tiefer als die Raumlufttemperatur ist, gelten folgende «Thermostat»-Regeln: Ist die Raumtemperatur grösser als 23 °C, wird das Fenster geöffnet. Das Fenster bleibt dann so lange geöffnet, bis die Raumtemperatur kleiner als 22 °C ist. Dann wird das Fenster geschlossen und bleibt so lange geschlossen bis die Raumtemperatur wieder über 23 °C steigt. Damit soll die Raumtemperatur zwischen 22 °C und 23 °C gehalten werden. Falls die Aussenlufttemperatur grösser als die Raumlufttemperatur ist, werden die Fenster nur für die Reduktion der CO_2-Konzentration im Raum geöffnet, falls mechanische Lüftung nicht vorhanden ist.

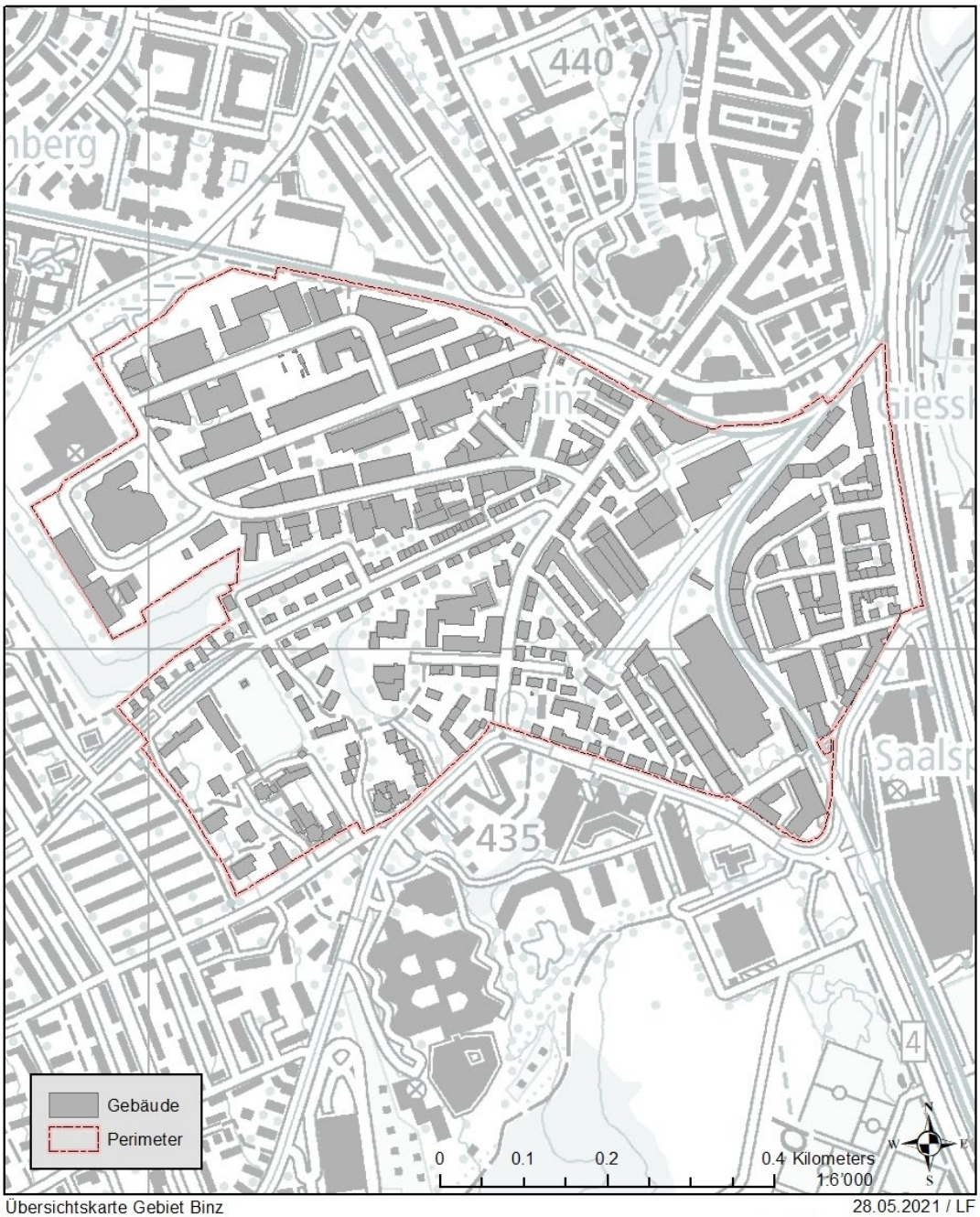
A.4 Interne Lasten

Tabelle 21: Internen Lasten in Gebäudesimulationen gemäss SIA Merkblatt 2024

		SIA Zielwerte	SIA Standardwerte	SIA Bestandwerte
Personenbelegung [m²/Person]		30 (14 Vollaststunden pro Tag)		
Beleuchtung	Leistung [W/m²]	1.7	2.7	2.7
	Jährlicher Strombedarf [kWh/m²]	2	4	4
Betriebs-einrichtungen	Leistung [W/m²]	8	8	10
	Jährlicher Strombedarf [kWh/m²]	14	14	18
Jahresgleichzeitigkeit [-]		0.8		

Annex B Quartiere

B.1 Übersicht Binz, Zürich



Übersichtskarte Gebiet Binz
Cool2Regen GIS-Auswertung
Datengrundlage

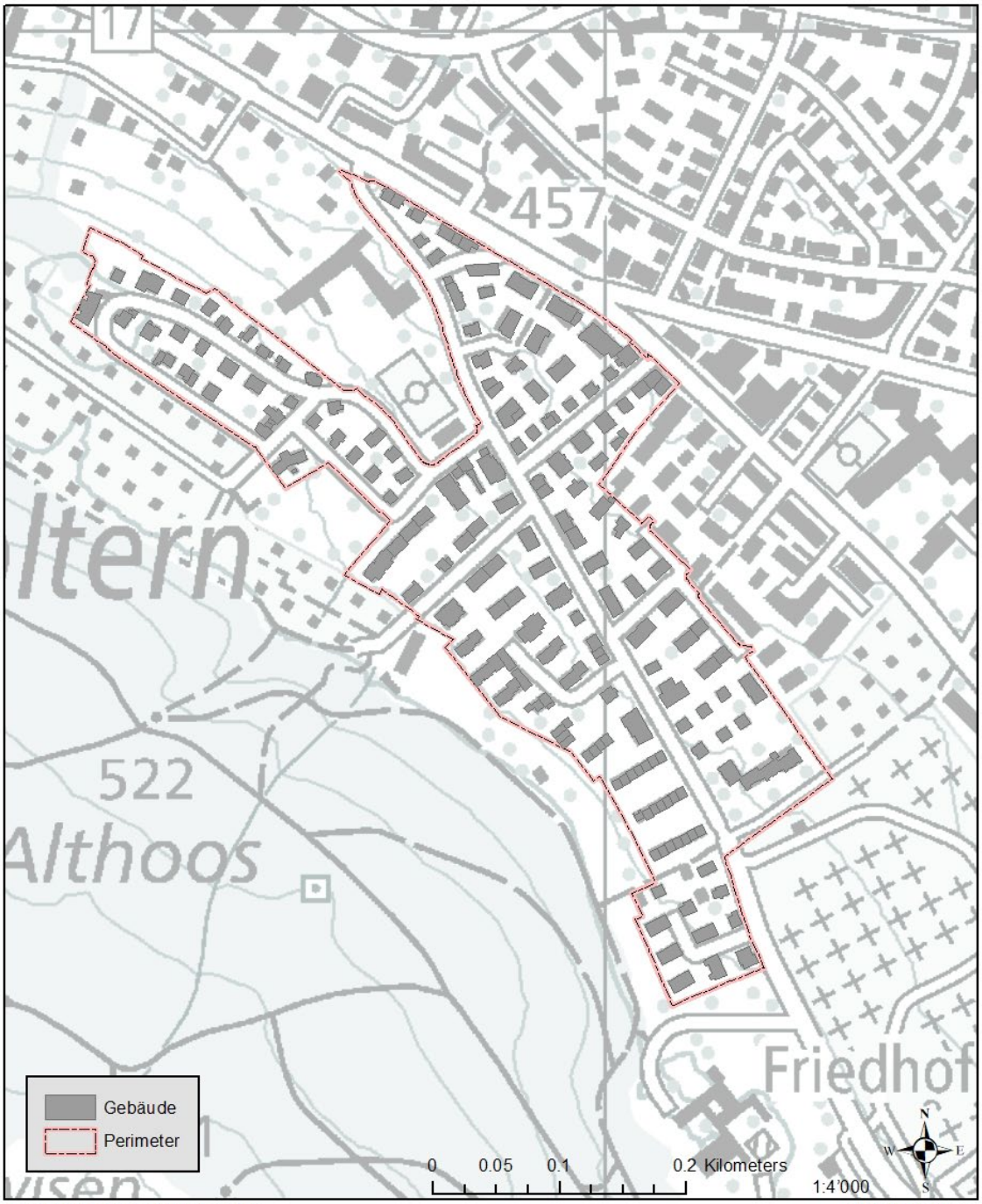
28.05.2021 / LF
Institut für Solartechnik SPF
OST - Ostschweizer Fachhochschule

B.2 Übersicht Hottingen, Zürich

Übersichtskarte Gebiet Hottingen
Cool2Regen GIS-Auswertung
Datengrundlage

28.05.2021 / LF
Institut für Solartechnik SPF
OST - Ostschweizer Fachhochschule

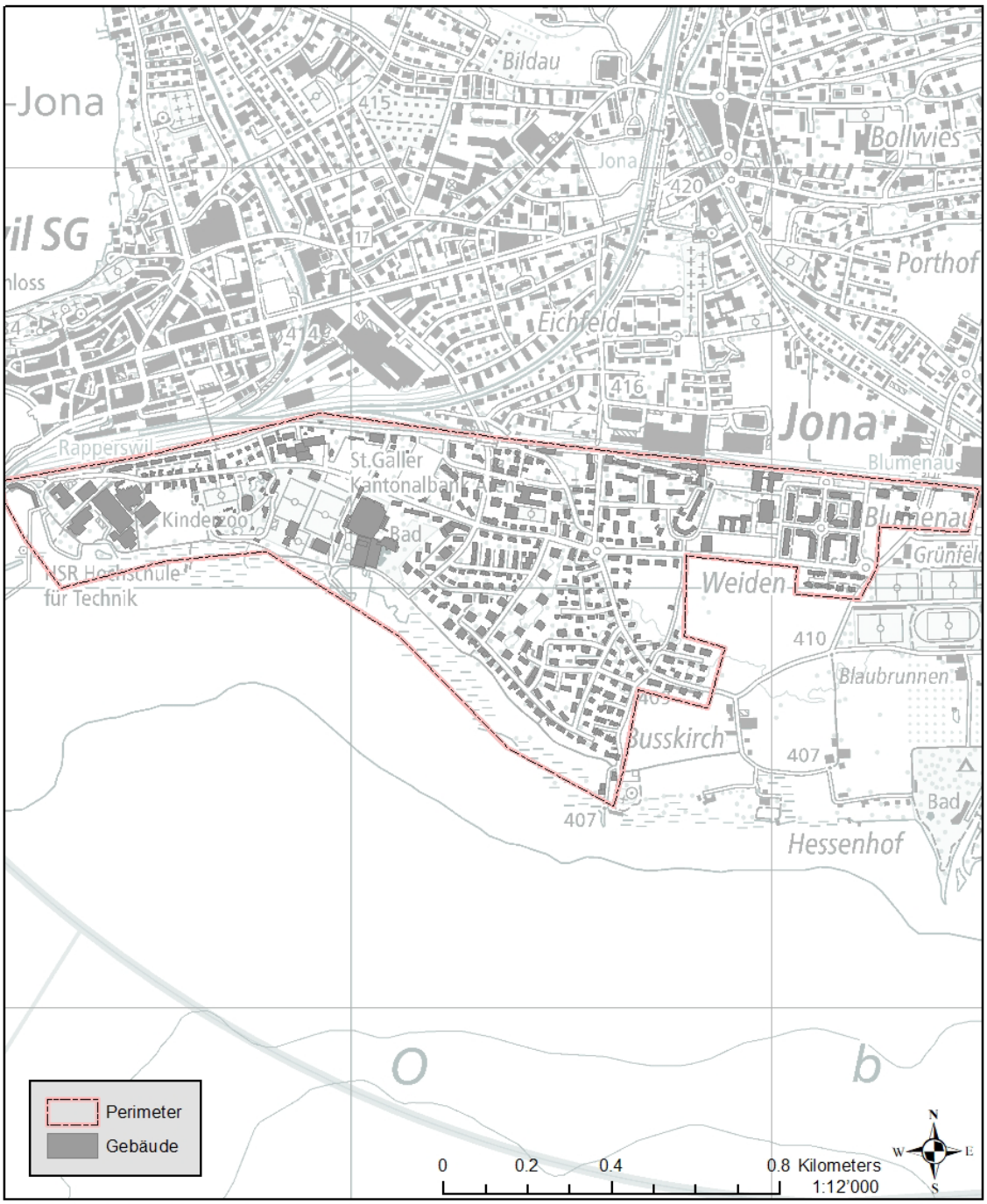
B.3 Übersicht Käferholz, Zürich



Übersichtskarte Gebiet Käferholz
Cool2Regen GIS-Auswertung
Datengrundlage

28.05.2021 / LF
Institut für Solartechnik SPF
OST - Ostschweizer Fachhochschule

B.4 Übersicht Südquartier, Rapperswil-Jona



Übersichtskarte Gebiet RJ Südquartier
Cool2Regen GIS-Auswertung
Übersicht

28.05.2021 / LF
Institut für Solartechnik SPF
OST - Ostschweizer Fachhochschule

Annex C Detaillierte Resultate Regenerationsgrad Erdsonde

Die detaillierten Resultate zu den Regenerationsgraden der Erdwärmesonden für die untersuchten Szenarien und Gebäude können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 22: Entzugs- EWS und Regenerationsenergie sowie Regenerationsgrad Gebäude SPF-Referenz Neubau KWL und SPF-Referenz Bestand für alle in Polysun simulierten Szenarien.

	JAZ Heizen [-]	JAZ Kühlen [-]	Entzug Erdsonde, gerundet [kWh]	Regeneration Erdsonde, gerundet [kWh]	Regenerations-grad [%]
SPF-Referenz Neubau KWL					
Szenario 2, aktuell, 2a	4.7	6.6	31’300	1’900	6
Szenario 2, aktuell, 50a	4.5	6.8	31’400	1’900	6
Szenario 3, 2050, 2a	4.7	5.5	28’700	9’300	32
Szenario 3, 2050, 50a	4.5	5.8	28’700	9’000	31
Szenario 4, 2050, 2a	4.8	5.6	29’600	18’100	61
Szenario 4, 2050, 50a	4.7	5.6	29’600	18’800	63
Szenario 5, 2050, 2a	4.9	5.3	29’500	33’600	114
Szenario 5, 2050, 50a	4.9	5.3	29’500	31’600	107
SPF-Referenz Bestand					
Szenario 2, aktuell, 2a	4.2	6.7	87’400	800	1
Szenario 2, aktuell, 50a	3.9	7.0	84’900	800	1
Szenario 5, 2050, 2a	4.3	6.8	76’100	12’800	17
Szenario 5, 2050, 50a	4.1	7.0	74’900	12’800	17

Annex D Referenzgebäude, Parameter technische Ausrüstung

Die gewählten Komponenten für das Gebäude SPF Referenz Neubau KWL können nachfolgender Tabelle entnommen werden.

Tabelle 23: Parameterliste Komponenten für das SPF-Referenzgebäude Neubau.

Parameter	Wert	Anmerkung
Erdwärmesonde	2 x 220 m	SIA384/6
Warmwasserbedarf exkl. Verluste	810 L	18 Personen
Spez. Bedarf WW	15.7 kWh/m^2	
Heizleistung Wärmepumpe (B0/W35)	26.0 kW**	leistungsgesteuert
Kühlleistung Wärmepumpe (B25/W15)	17.8 kW*	1-stufig
Speicher Warmwasser	1'500 L	-
Speicher Puffer Heizung	1'500 L	-
Speicher Raumkühlung	1'000 L	-

*Leistungsbegrenzung FU auf 50 % Last

** CTA Optiheat Inverta Economy OH I 17e

Tabelle 24: Parameterliste Komponenten für das SPF-Referenzgebäude Bestand.

Parameter	Wert	Anmerkung
Erdwärmesonde	4 x 310 m	SIA384/6
Warmwasserbedarf exkl. Verluste	980 L	28 Personen
Spez. Bedarf WW	19.2 kWh/m^2	
Heizleistung Wärmepumpe (B0/W35)	85.0 kW**	2-stufig
Kühlleistung Wärmepumpe (B25/W15)	17.8 kW*	1-stufig
Speicher Warmwasser	2'000 L	-
Speicher Puffer Heizung	3'000 L	-
Speicher Raumkühlung	1'000 L	-

*Leistungsbegrenzung FU auf 50 % Last

** CTA Optiheat Duo OH 1-85e

Annex E Erweiterung semianalytisches Sondenmodell

Das Langzeitverhalten von einzelnen Erdwärmesonden und Sondenfeldern wird seit den Arbeiten von Eskilson[43] anhand von sogenannten g-Funktionen charakterisiert. Mit dieser Funktion kann die Borlochtemperatur (T_b) berechnet werden:

$$T_b = T_m - \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda_{Erde}} g(Es, r_m / H) \qquad (7)$$

Wobei T_m die Erdreich-Mitteltemperatur, $\dot{q}$ die spezifische Entzugsleistung λ_{Erde} die Wärmeleitfähigkeit, *Es* die Zeit (dimensionslos), r_m der Borlochradius und *H* die Länge der Sonde darstellen.

Den Einfluss einer einzelnen EWS auf seine Umgebung kann anhand des Finite Line Source Modelles (FLM) analytisch berechnet werden. Dabei wird aber eine konstante Entzugsleistung entlang der ganzen Sonde angenommen. Weil die Entzugsleistung in einem grossen Erdsondenfeld sowohl entlang einer Sonde als auch zwischen den Sonden variiert, wurden g-Funktionen lange in nummerischen Modellen (z.B. SBM[44]) berechnet. Cimmino und Bernier[17] entwickelten ein semianalytisches Erdsondenmodell, mit dem das Langzeitverhalten von grossen Erdsondenfeldern berechnet werden kann. Dazu wird das Erdreich in eine diskrete Anzahl Schichten (nl) unterteilt. Der Einfluss eines Sondenabschnittes (i_{source}) auf einen anderen Sondenabschnitt (i_{ref}) kann mittels analytischer Lösung (FLM) berechnet und in einer Matrix (gmatrix) gespeichert werden (siehe Abbildung 54). Folgende Formel wurde von Eskilson[43] abgeleitet, wobei statt über die gesamte Erdsondenlänge nur über die Länge des Quell-Abschnittes (von $z_{up}(il_{source})$ bis $z_{low}(il_{source})$) integriert wird, und der Einfluss auf den Mittelpunkt der Referenzsonde z_{middle} bezogen wird.

$$gmatrix(i_{source}, i_{ref}, t) = \int_{zup(il_{source})}^{zlow(il_{source})} \left(\frac{erfc(r_o / \sqrt{4\alpha t})}{r_o} - \frac{erfc(r_m / \sqrt{4\alpha t})}{r_m} \right) ds \qquad (8)$$

$$r_m = \sqrt{r^2 + (z_{middel}(il_{ref}) + s)^2}\,; r_o = \sqrt{r^2 + (z_{middel}(il_{ref}) - s)^2}$$

Wobei die Sonden-Abschnitts Nummer i eine Funktion der Sondennummer ib und der Schichtnummer il ist ($i = ib * (nb - 1) + il$). r ist der Abstand zwischen Quell- und Referenzsonde, resp. der Bohrlochradius r_b, wenn der Einfluss einer Sonde auf ihre eigene Temperatur berechnet wird ($i_{bsource} = i_{bref}$). Wegen der Unterteilung in Erdreichschichten kann der Mittelpunkt der Referenzschicht gewählt werden und eine Integration entlang des Referenzsondenabschnittes (wie von Cimmino und Bernier[17] vorgeschlagen) ist nicht nötig. Diese Vereinfachung führt zu einer leicht kürzeren Rechenzeit und ermöglicht es, durch einfache Trigonometrie auch geneigte Erdsonden zu berechnen.

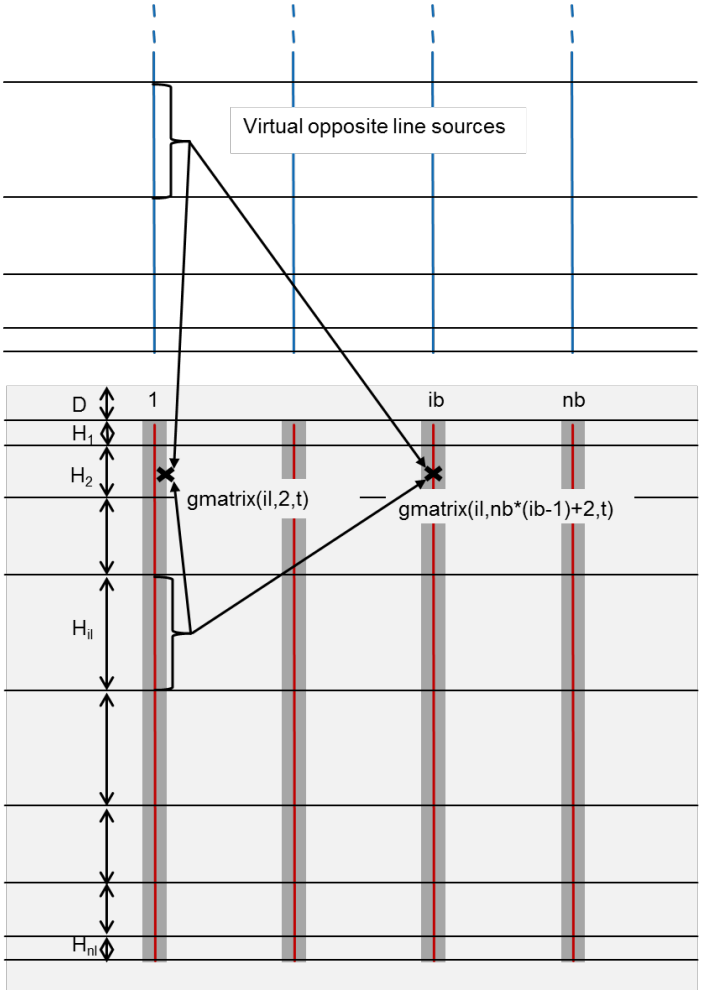


Abbildung 54 Darstellung der Abschnitt zu Abschnitt g-Funktionen welche in einer Matrix (gmatrix) gespeichert werden. Die Berechnung dieser Matrix erfolgt nach Formel (3)

Die Temperatur bei einem bestimmten Erdsondenabschnitt (i_{ref}) ist durch die Summe aller Abschnitte als Quelle und aller Leistungssprünge, multipliziert mit den relativen Entzugsleistungen, gegeben:

$$T_0 - T_{b,iref}(t_k) = \frac{1}{2\pi k} \sum_{isouce=1}^{nbs} \sum_{t_p=0}^{t_k} gmatrix(i_{source}, i_{ref}, t_k - t_p) \cdot \dot{q}_{isource}(t_p) \quad (9)$$

Wobei die Entzugsleistungen $\dot{q}_{isource}(t_k)$ für alle Abschnitte unterschiedliche sein können. Die Summe aller Abschnitts-Entzugsleistungen soll aber der gesamten Entzugsleistung entsprechen.

$$\sum_{isouce=1}^{nb \cdot nl} \dot{q}_{isource}(t_k) \cdot H_{ilay} = \begin{Bmatrix} nb \cdot H \cdot \tilde{\dot{q}} __ for_t_k = 0 \\ 0 _____ for_t_k \neq 0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

In einem typischen, parallel geschalteten Erdsondenfeld kann man dabei von nahezu identischen Temperaturen in allen Sondenabschnitten ausgehen:

$$T_{b,iref}(t_k) = T_b(t_k) \quad (11)$$

Die Gleichungen 9-11 definieren ein Gleichungssystem mit 2*nbs*nt +nt Gleichungen und 2*nbs*nt+nt Variabeln. Cimmino[45] benützt die Laplace-Transformation, wodurch das Konvolutionsprodukt in Gleichung 9 zu einem simplen Produkt wird. Somit lässt sich im Frequenzraum für jeden der nk Schritte ein vollständiges lineares Gleichungssystem mit nbs+1 Variablen aufstellen, welches durch Standardverfahren gelöst werden kann. Der Temperaturverlauf kann danach durch die inverse Laplace-Transformation wieder in den Zeit-Raum und die ursprünglichen Zeit-Stützstellen zurück transformiert werden. Wird nur eine Zeit-Stützstelle (z.B. 30 oder 50 Jahre) betrachtet, reduziert sich das Problem auf ein vollständiges lineares Gleichungssystem, welches direkt und ohne Laplace-Transformation in den Frequenz-Raum gelöst werden kann. Dieses Gleichungssystem kann in Matrix-Form folgendermassen dargestellt werden:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ H \cdot nb \cdot \tilde{\dot{q}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} gamtrix(1,1,t) & gamtrix(1,2,t) & \dots & -1 \\ gamtrix(2,1,t) & gamtrix(2,2,t) & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_1 & H_2 & \dots & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \dot{q}_{1source}(t) \\ \dot{q}_{2source}(t) \\ \dots \\ 2 \cdot \pi \cdot k \cdot (T_0 - T_b(t)) \end{pmatrix} \quad (12)$$

Im Gegensatz zur Methode von Cimmino und Bernier wird dabei vernachlässigt, dass sich die Verteilung der Entzugsleistung entlang der Sonden bei einem Entzugssprung verändert.

Wenn nun die gegenseitige Beeinflussung in einem Quartier und nicht mehr ein einzelnes Sondenfeld berechnet werden soll, kann nicht mehr von einer konstanten Temperaturquelle im ganzen Feld, sondern von einer Temperaturquelle für jede Einzelanlage ausgegangen werden. Dazu müssen Gleichung 10 und 11 für jede Anlage einzeln aufgestellt werden. Die letzte Gleichung im Gleichungssystem (12) wird dann durch nbl Gleichungen (eine für jede Einzelanlage) ersetzt. Mit diesen zusätzlichen Gleichungen können nun die zusätzlichen unbekannten (die Temperaturen von jeder Einzelanlage) für einen gewünschten Zeitpunkt berechnet werden.

Wenn alle Komponenten der g-Matrix und alle Abschnittsentzugsleistungen berechnet sind, kann der Einfluss aller Nachbarsonden auf eine bestimmte Sonde (m) durch Aufsummieren berechnet werden:

$$To - Tb = \frac{1}{2\pi k} \sum_{i \neq m*nl+1 \dots m*nl+nl} gmatrix(i, m*nl+1, t) * \dot{q}\,(i,t) \quad (13)$$

Wobei dieser Einfluss für alle Abschnitte der Sonde ($m*nl+1 \dots m*nl+nl$) gleich ist.

Annex F Vor- und Nachteile unterschiedlicher hydraulischer Einbindungsvarianten zur Gebäudekühlung

F.1 Kühlen mit einer reversiblen Wärmepumpe

Bei der reversiblen Wärmepumpe wird die Fliessrichtung des Kältemittels mittels 4-Weg-Ventil umgekehrt. Damit tauschen Verdampfer und Kondensator ihre Rollen.

Vorteile

Plug-and-Play: Der grösste Vorteil der reversiblen Wärmepumpe bildet die einfache Einbindung in das Heizsystem, hier etwas überspitzt «Plug-and-Play» bezeichnet. Bei einer reversiblen Wärmepumpe erfolgt die Umschaltung von Heiz- auf Kühlbetrieb innerhalb der Wärmepumpe. Der Installateur hat dadurch nur geringen Zusatzaufwand. Da die Inbetriebnahme eines komplexen Regelungssystems (siehe externe Umschaltung) ein grosses Fachwissen des Installateurs voraussetzt und nicht fachmännisch durchgeführte Inbetriebnahmen zu Leistungseinbussen führen, ist der «Plug-and-Play» Vorteil der reversiblen Wärmepumpe relevant.

Nachteile

Ineffizienter Heizbetrieb: Die durch das 4-Weg Ventil und die Umkehr des Kältemittelstroms resultierenden zusätzlichen hydraulischen Verluste im Kältemittelkreis haben schlechtere Leistungszahlen der Wärmepumpe im Heizbetrieb zur Folge. In unseren Berechnungen wurde der COP im Heizbetrieb bei Einsatz einer reversiblen Wärmepumpe im Vergleich zu einer Standard-Wärmepumpe von 4.9 auf 4.6 reduziert (um 6 %, in Absprache mit CTA)

Ineffizienter Kühlbetrieb: Auch im Kühlbetrieb ist durch das 4-Weg-Ventil im Kältekreis die Leistungszahl geringer als bei einer Maschine welche ausschliesslich kühlen kann.

Wärmeübertragerflächenverhältnis: Ist die Grösse der Wärmeübertrager einer Wärmepumpe auf den Heizfall ausgelegt, so ist die Wärmeübertragungsfläche des Kondensators grösser als die des Verdampfers, da im Kondensator mehr Wärme übertragen werden muss (thermische Leistung Kondensator = thermische Leistung Verdampfer plus elektrische Leistung Kompressor). Wird die Rolle des Verdampfers und Kondensators im Kühlbetrieb vertauscht, stimmt das Grössenverhältnis der Wärmeübertragungsflächen nicht mehr, die Kältemittelfüllmenge muss angepasst werden und die Leistungszahl der Wärmepumpe im Kühlbetrieb ist reduziert. Eine Reduktion der Leistungszahl kann teilweise kompensiert werden, indem die Kompressorleistung und damit auch die Kühlleistung der Wärmepumpe reduziert wird (z.B. um den Faktor 2, Kommunikation mit CTA). In diesem Fall ist jedoch die Kühlleistung limitiert.

Gefriergefahr: Bei reversiblen Wärmepumpen fliesst Sole durch den einen Wärmeübertrager und Wasser durch den anderen Wärmeübertrager. Da Verdampfer und Kondensator im Heiz- und Kühlfall ihre Rolle tauschen, ist im Kühlbetrieb der Verdampfer wasserdurchflossen und

der Kondensator soledurchflossen. Der Verdampfer ist im Kühlfall also nicht mehr frostschutzgeschützt. Kühlt die Wärmepumpe einen Kältespeicher ab, darf dieser nicht zu kalt werden, da sonst Gefriergefahr im Verdampfer auftritt. Bei Kühlung über das Fussbodensystem sind die Rücklauftemperaturen vom Fussbodensystem jedoch eher zu hoch für manche Verdampfer. Die betrachteten Wärmepumpen von CTA z.B. weissen maximale Eintrittstemperaturen in den Verdampfer von 20 °C aus. In diesem Fall kann über Zwischenkreise mit Beimischung die Eintrittstemperatur in den Verdampfer tief gehalten werden, bzw. der Kältespeicher auf tiefere Solltemperaturen gekühlt werden.

Brauchwarmwassererwärmung: Im Kühlbetrieb in Kombination mit einer Wärmepumpe besteht die Möglichkeit mit der Abwärme aus der Kühlung im Sommer direkt Brauchwarmwasser zu produzieren. Dies erfordert bei der reversiblen Wärmepumpe jedoch eine zusätzliche externe Umschaltung, da Heizkreis (Fussbodensystem) und Brauchwarmwasserkreis im Heizfall beide an den Kondensator der Wärmepumpe gekoppelt sind. Im Kühlbetrieb müsste dann zur direkten Brauchwarmwassererwärmung eine externe Umschaltung durchgeführt werden, die bei reversiblen Wärmepumpen eigentlich vermieden werden soll, um die Einbindung so einfach wie mögliche zu gestalten. Zusätzlich muss ein zusätzlicher Wärmeübertrager für die Trennung von Sole und Wasser sorgen. Um diesen Zusatzaufwand zu vermeiden, wird bei Verwendung einer reversiblen Wärmepumpe das Brauchwarmwasser in der Regel nicht direkt aus der Abwärme der Kühlung erzeugt. Stattdessen wird kurzzeitig wieder in den Heizbetrieb umgeschaltet (Umkehrung Kältemittelkreis) und Brauchwarmwasser aus der Wärme im Erdreich erzeugt. Die Abwärme aus der Kühlung wird also im Erdreich zwischengelagert, bevor es zur Erwärmung des Brauchwarmwassers genutzt wird.

Gütesiegel: Förderprogramme für Wärmepumpen verlangen in der Regel ein Gütesiegel/Zertifizierung der Wärmepumpe. Für reversible Wärmepumpen mit Heiz- und Kühlbetrieb ist das Gütesiegel für den Hersteller mit grösseren Zusatzkosten verbunden als für nicht-reversible Wärmepumpen. Mit diesen Zusatzkosten und den (noch) geringen Nachfragen sind reversible Wärmepumpen für die Produzenten von Wärmepumpen oft wirtschaftlich nicht lohnend.

Geringes Marktangebot: Von den sieben in der Kostenanalyse (Kapitel 3.5.2) verwendeten Sole-Wasser Wärmepumpen der Firma CTA ist nur eine reversibel (Optiheat Inverta TWW). Diese liegt im kleinen Heizleistungsbereich von 1.6 bis 7.5 kW und ist lediglich für Einfamilienhäuser bzw. kleine Mehrfamilienhäuser geeignet. Hoval hat momentan keine reversible Wärmepumpe im Sortiment. Das Marktangebot ist also gering.

F.2 Kühlen durch externe hydraulische Umschaltung

Bei einer externen Umschaltung wird die Fliessrichtung des Kältemittels nicht gedreht, Verdampfer- und Kondensator-Wärmeübertrager behalten ihre Rolle sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb bei. Der Verdampfer ist soledurchflossen, der Kondensator wasserdurchflossen. Die Umschaltung erfolgt extern.

Vorteile

Effizienter Heizbetrieb: Die Wärmepumpe arbeitet im Heizbetrieb ohne Leistungseinbussen (im Vergleich zur reversiblen Wärmepumpe).

Brauchwarmwassererwärmung: Da bei dieser Einbindung in jedem Fall zusätzliche Rohrleitungen, Ventile und eine passende Regelung notwendig sind, bedeutet die Realisierung der Brauchwarmwassererwärmung aus der Abwärme der Raumkühlung kaum Mehraufwand. Der Brauchwarmwasserkreis bleibt bei der externen hydraulischen Umschaltung im Kühlbetreib auf der Kondensatorseite der Wärmepumpe, während der Fussbodenkreis auf die Verdampferseite umgeschaltet wird. Somit kann direkt Brauchwarmwasser erzeugt werden ohne Zwischenlagerung der Wärme im Erdreich.

Marktangebot: Die externe Umschaltung ist nicht an den Markt gebunden und kann mit jeder Wärmepumpe realisiert werden. Der Wärmepumpenhersteller iDM (www.idm-energie.at) bietet die Wärmepumpe TERRA SW Max (Heizleistungen von 35 bis 280 kW) sogar in Kombination mit einem System zur externen Umschaltung an (iDM Systemkühlung).

Nachteile

Inbetriebnahme: Die Umschaltung erfolgt extern und muss daher vom Installateur geplant, realisiert und in Betrieb genommen werden, inklusive passender Regelung (Abbildung 56). Im Heizbetrieb ist der Erdsondenkreis an den Verdampfer gekoppelt, der Fussbodenkreis und der Brauchwarmwasserkreis an den Kondensator. Im Kühlbetrieb wird der Fussbodenkreis auf den Verdampfer umgeschaltet und der Erdsondenkreis auf den Kondensator. Der Brauchwarmwasserkreis bleibt weiterhin auf Kondensatorseite. Im Kühlbetrieb müssen Fussboden- und Erdsondenkreis durch Wärmeübertrager vom Verdampfer und Kondensator getrennt sein, um eine Durchmischung von Sole und Wasser zu verhindern. Die Inbetriebnahme muss fachmännisch durchgeführt werden und ist nur bei qualifiziertem Fachpersonal möglich. Dieser Zusatzaufwand der externen hydraulischen Umschaltung ist nicht zu unterschätzen.

Ineffizienter Kühlbetrieb: Durch die zwei Wärmeübertrager im Kühlbetrieb und die damit verbundene höhere Grädigkeit vergrössert sich der Temperaturhub der Wärmepumpe und die Leistungszahl sinkt.

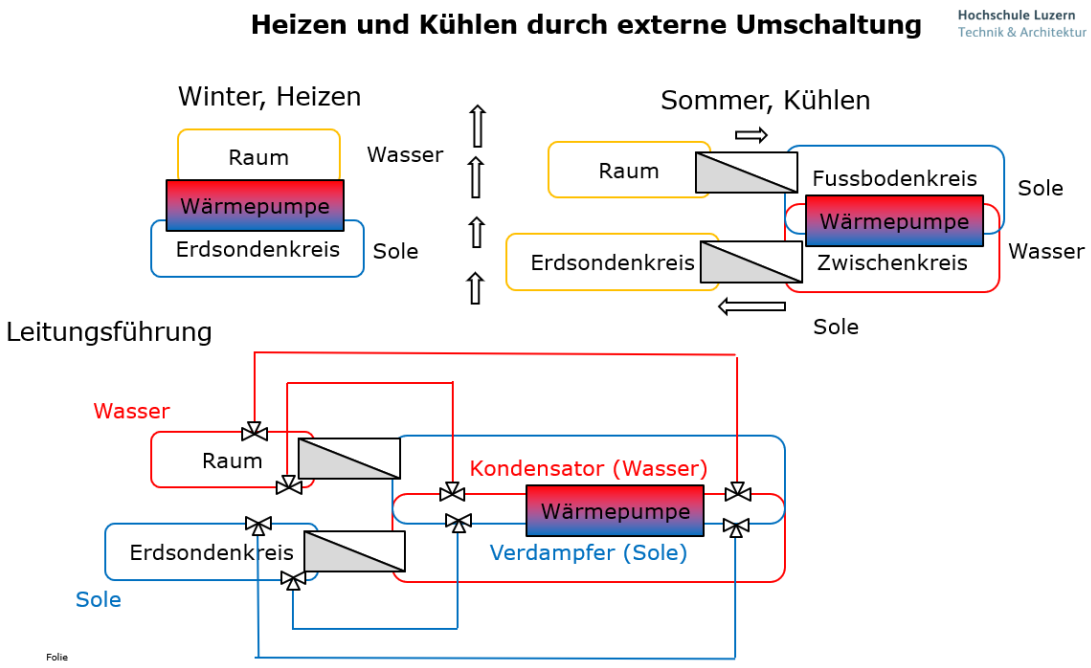


Abbildung 55: Schematische Darstellung der Rohrleitungsführung bei externer Umschaltung, ohne Förderpumpen, Speicher und Brauchwarmwasser.

F.3 Kühlen mit separater Wärmepumpe

Vorteile

Effizienter Heiz- und Kühlbetrieb: Die Wärmepumpe arbeitet sowohl im Heizbetrieb als auch im Kühlbetrieb ohne Leistungseinbussen (im Vergleich zur reversiblen Wärmepumpe und zur externen Umschaltung).

Plug-and-Play: Beide Wärmepumpen zum Heizen und zum Kühlen können als all-in-one Systemlösung geliefert werden. Wie bei der reversiblen Wärmepumpe erfolgt die Umschaltung und Regelung von Heizen auf Kühlen und umgekehrt intern. Die Inbetriebnahme ist dadurch wesentlich einfacher als bei der externen hydraulischen Umschaltung.

Marktangebot: Generell kann diese Lösung mit zwei Standardwärmepumpen realisiert werden. Das Marktangebot ist daher gross. Hoval hat die «Thermalia dual R (55 - 140)» mit Heizleistungen von 55 kW bis 140 kW als all-in-one Lösung im Angebot. Diese Wärmepumpe fällt von der eingesetzten Technologie in die Kategorie «zwei separate Wärmepumpen», obwohl in der Produktbeschreibung das Wort reversibel gebraucht wird.

Nachteile

Hohe Investitionskosten: Eine separate Wärmepumpe ist deutlich teurer (siehe Kostenbeispiel in Kapitel 4.5.1) als eine reversible Wärmepumpe oder eine externe Umschaltung.

F.4 Passive Kühlung

Sind die Entzugsdichten im Quartier gering und werden wenige Einzelsonden zum Heizen verwendet, so ist in der Regel keine oder nur geringe Regeneration notwendig. Unter dieser Voraussetzung ist passive Kühlung die einfachste und günstigste Lösung. Die passive

Kühlung schneidet in allen Betrachtungspunkten besser ab als die aktive Kühlung (Tabelle 21), solange die Temperaturen im Erdreich kühl genug sind. Sollte der Komfort im Sommer im Zuge der Klimaerwärmung nicht mehr eingehalten werden können, kann als Reaktion darauf immer noch auf aktive Kühlung gewechselt werden. Bei der passiven Kühlung wird der Fussbodenkreis über einen Wärmeübertrager ohne Einbindung der Wärmepumpe mit dem Erdsondenkreis verbunden. Der Brauchwarmwasserkreis ist weiter mit dem Kondensator der Wärmepumpe verbunden. Der Verdampfer der (inaktiven) Wärmepumpe wird im Kühlbetrieb entweder durchflossen oder mit einem Bypass umgangen. Ein Durchfliessen des Verdampfers der Wärmepumpe hat den Vorteil, dass bei Brauchwarmwasserbedarf die Wärmepumpe aktiviert werden kann. In diesem Fall sind Erdreich, Wärmeübertrager für passive Kühlung und Verdampfer der Wärmepumpe in Serie geschaltet und somit wird die Abwärme aus der Kühlung zur Erwärmung des Brauchwarmwassers genutzt. Befindet sich der Wärmeübertrager für passive Kühlung vor dem Verdampfer der Wärmepumpe, so erhält der Verdampfer der Wärmepumpe eine höhere Eingangstemperatur und diese wird damit während der Brauchwarmwassererwärmung mit einer erhöhten Leistungszahl betrieben. Wird der Wärmeübertrager für passive Kühlung nach dem Verdampfer der Wärmepumpe eingebunden, so ist die Temperatur am Eingang Wärmeübertrager für passive Kühlung abgesenkt und es stehen kältere Temperaturen zur Raumkühlung zur Verfügung. Dies ist dann vorteilhaft, wenn die Erdsondentemperaturen im Spätsommer nach der Kühlsaison (und der damit verbundenen Aufwärmung des Erdreichs) hoch sind und sich die Austrittstemperatur der Erdsonde der Grenztemperatur zum Kühlen annähern (≈ 20 °C). Hydraulische Einbindungen für die passive Kühlung finden sich im Bericht «Standardlösungen zum energieeffizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen» [41] oder dem suissetec Merkblatt "Erdwärmesonden: Entlastung oder Regeneration?"[28]. In beiden aufgeführten Dokumenten ist jedoch der Wärmeübertrager für passive Kühlung vor dem Verdampfer der Wärmepumpe eingebunden.

F.5 Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der vier unterschiedlichen Lösungen

In den vorhergehenden vier Abschnitten wurden Vor- und Nachteile von unterschiedlichen hydraulischen Einbindungen der Kühlung diskutiert. Auch die passive Kühlung wurde angesprochen. Tabelle 21 fasst die wesentlichen Merkmale zusammen. Die einzelnen Beurteilungskriterien wurden in die vier Hauptkriterien Inbetriebnahme, Gesamtkosten, Verfügbarkeit auf dem Markt und typischer Regenerationsgrad zusammengefasst und diese qualitativ entweder positiv (Vorteil, grün) bzw. negativ (Nachteil, rot) bewertet. Passive Kühlung (rechte Spalte) zeichnet sich durch die meisten positiven (grünen) Beurteilungen aus, liefert jedoch nur geringe Regenerationsgrade (rot, ca. 20 %). Da in diesem Projekt der Fokus auf hohe Regenerationsgrade durch Verzicht auf passive Wärmeschutzmassnahmen liegt, spielt passive Kühlung eine untergeordnete Rolle. Werden die drei hydraulischen Einbindungen der aktiven Kühlung miteinander verglichen (linke drei Spalten), schneiden diese je nach Beurteilungskriterium sehr unterschiedlich ab. Wird der Fokus auf einfache Inbetriebnahme gelegt, schneiden die reversible Wärmepumpe und die separate Wärmepumpe am besten ab. Die Gesamtkosten sind bei der separaten Wärmepumpe jedoch deutlich höher, was für den Einsatz einer reversiblen Wärmepumpe spricht. Das Marktangebot an reversiblen Wärmepumpen ist jedoch gering. Vor allem bei grossen Gebäuden ist die externe Umschaltung von Vorteil, da der Mehraufwand für die Installation und Inbetriebnahme

nur einmal anfällt (hohe Initialkosten) und das System in Folge effizienter, also kostengünstiger und umweltfreundlicher betrieben werden kann (geringe Betriebskosten).

Tabelle 25: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen hydraulischen Einbindungen von aktiver Kühlung. Positive Bewertungen der Hauptkriterien sind grün, negative Bewertungen rot markiert. Siehe Text für Details.

	reversibel	externe Umschaltung	separate Wärmepumpe	passive Kühlung
Inbetriebnahme	**einfach**	**komplex**	**einfach**	**einfach**
Plug-and-Play	ja	nein	ja	ja
Kühlung limitiert durch Erdsondentemperatur	nein	nein	nein	ja
Frostschutz Verdampfer	nein	ja	ja	ja
Gesamtkosten	**mittel**	**mittel**	**hoch**	**tief**
Investitionskosten	**tief**	**hoch**	**sehr hoch**	**sehr tief**
zusätzliche Wärmepumpe zur Kühlung (Kältemaschine)	nein	nein	ja	nein
zusätzliche Rohrleitungen/Regelung für aktive Kühlung	nein	ja	nein	nein
Kältespeicher nötig	ja	ja	ja	nein
Betriebskosten	**hoch**	**tief**	**tief**	**tief**
Effizienter Heizbetrieb	nein [1]	ja	ja	ja
Effizienter Kühlbetrieb	nein [1]	nein [2]	nein [2]	ja
Wämeübertragerflächenverhältnis passend im Kühlbetrieb	nein	ja	ja	k.A.
Effiziente, direkte Brauchwarmwassererwärmung	nein [3]	ja	ja	ja
Verfügbarkeit auf dem Markt	**gering [4]**	**gross [5]**	**gross [5]**	**gross [5]**
Typischer Regenerationsgrad	**hoch**	**hoch**	**hoch**	**tief**

[1]Aufgrund 4-Weg Ventil im Kältemittelkreis

[2]Aufgrund Wärmeübertrager zur Trennung Sole/Wasser

[3]indirekt über Erdreich

[4]Geringe Nachfrage, extra Gütesiegel notwendig

[5] Da mit Standardkomponenten realisierbar