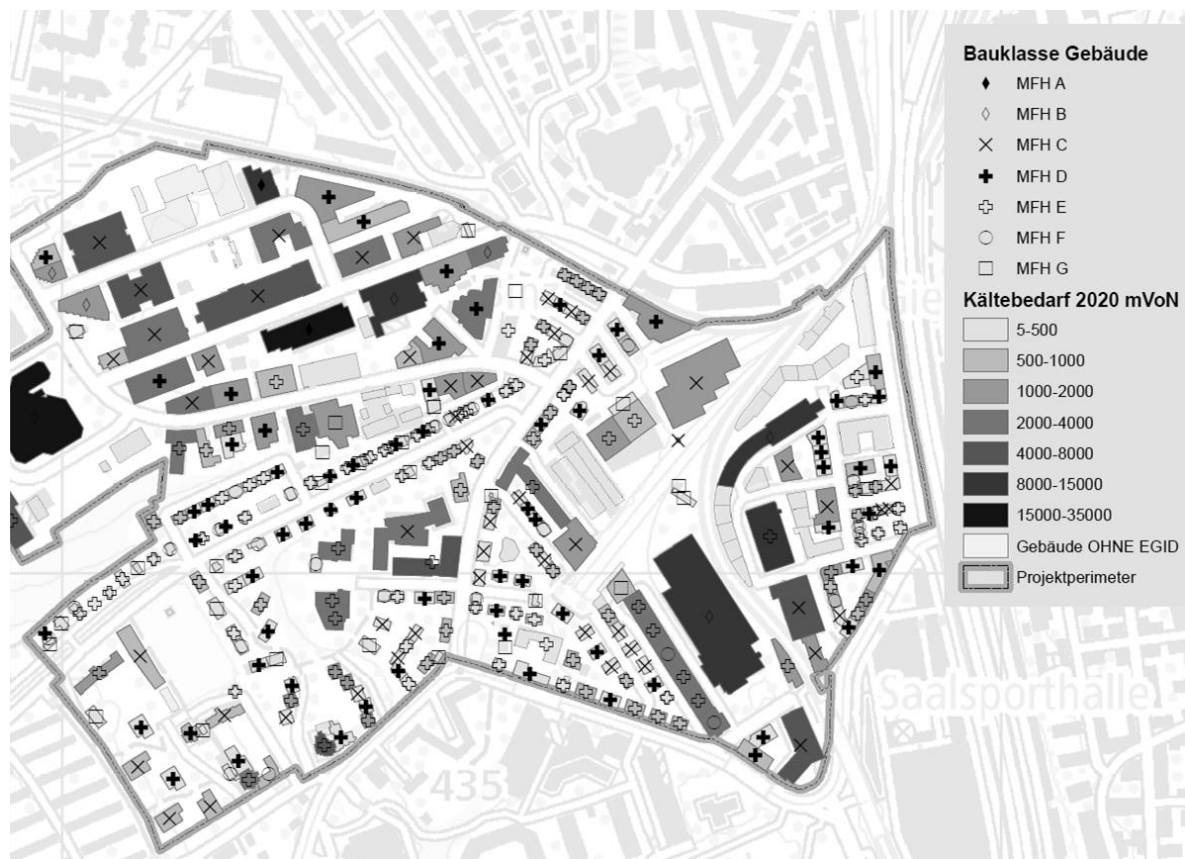




Zwischenbericht vom 7.1.2022

## Cool2Regen

# Aktives Kühlen von Gebäuden mit Wärmepumpen und Erdsonden für hohe Regenerationsgrade



Quelle: SPF



**Datum:** 30.11.2021

**Ort:** Bern

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Gebäude und Städte  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger/innen:**

OST – Ostschweizer Fachhochschule  
SPF Institut für Solartechnik  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil-Jona  
[www.ost.ch/spf](http://www.ost.ch/spf)

Hochschule Luzern  
Technik & Architektur  
Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE  
Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw  
[www.hslu.ch](http://www.hslu.ch)

**Autor/in:**

Florian Ruesch, SPF, [florian.ruesch@ost.ch](mailto:florian.ruesch@ost.ch)  
Lukas Füglistner, SPF, [lukas.fueglistner@ost.ch](mailto:lukas.fueglistner@ost.ch)  
Michel Haller, SPF, [michel.haller@ost.ch](mailto:michel.haller@ost.ch)  
Dr. Tobias Sommer, IGE, [tobias.sommer@hslu.ch](mailto:tobias.sommer@hslu.ch)  
Andrii Zakovorotnyi, IGE, [andrii.zakovorotnyi@hslu.ch](mailto:andrii.zakovorotnyi@hslu.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Nadège Vetterli, [nadege.vetterli@anex.ch](mailto: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 in den untersuchten Gebieten ist in der Tagesbilanz wesentlich höher als der benötigte Strombedarf für die aktive Kühlung zur Regeneration der Erdwärmesonden. Die ersten Auswertungen aus den untersuchten Quartieren zeigen eine gute Deckung von PV-Produktion und Bedarf. In den Quartieren konnten je nach Szenario 60-80% des elektrischen Bedarfs durch PV-Strom gedeckt werden. Besonders in den Abendstunden wird jedoch zur Raumkühlung noch Energie benötigt, welcher durch die direkte PV-Produktion (ohne Einsatz von Speichern) nicht gedeckt werden kann.

Analysen von Beispielquartieren zeigen, dass ein vollständiger Ersatz der Wärmeerzeuger mit Erdsonden-Wärmepumpen zur einer starken gegenseitigen Beeinflussung der Sonden und zu einer starken Langzeitauskühlung des Untergrundes führen würde. Die Regeneration mit aktiver Kühlung kann diesem Effekt etwas entgegenwirken. Besonders in dicht besiedelten Gebieten mit vielen Bestandesbauten würde aber trotz Regeneration mit aktiver Kühlung eine bedenkliche Langzeitauskühlung bestehen bleiben.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>6</b>
1.1 Ausgangslage und Motivation des Projektes.....	6
1.2 Projektziele .....	7
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>8</b>
2.1 Quartier und Datensätze .....	8
2.2 Kennwerte der Quartiere .....	9
2.3 Klimadaten .....	10
<b>3 Vorgehen und Methode</b> .....	<b>10</b>
3.1 Methodik Heiz- und Kühlbedarf.....	11
3.2 Methodik PV-Potential und Strombedarf .....	18
3.3 Methodik Erdwärmesonden.....	24
<b>4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse</b> .....	<b>28</b>
4.1 Ergebnisse Heiz- und Kühlbedarf .....	28
4.2 Ergebnisse PV-Potential und Strombedarf.....	32
4.3 Ergebnisse Erdwärmesonden .....	34
<b>5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse</b> .....	<b>36</b>
5.1 Diskussion Heiz- und Kühlbedarf.....	36
5.2 Diskussion PV-Potential und Strombedarf.....	37
5.3 Diskussion Erdwärmesonden.....	38
<b>6 Weiteres Vorgehen</b> .....	<b>40</b>
<b>7 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>40</b>
<b>8 Annex</b> .....	<b>45</b>
8.1 Glossar.....	45
8.2 Übersicht Binz, Zürich .....	43
8.3 Übersicht Hottingen, Zürich.....	44
8.4 Übersicht Käferholz, Zürich .....	45
8.5 Übersicht Südquartier, Rapperswil-Jona .....	46



## Abkürzungsverzeichnis

JAZ	Jahresarbeitszahl
COP	Coefficient of performace
MFH	Mehrfamilienhaus
EFH	Einfamilienhaus
MuKE	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



# 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<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Wärmepumpen mit Erdwärmesonden (EWS) gehören zu den effizientesten erneuerbaren Wärmeerzeugungsanlagen und spielen daher eine entscheidende Rolle zur Senkung der CO<sub>2</sub>-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<sup>1</sup>. 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<sub>2</sub>-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<sup>2</sup>. Die neue SIA 384/6 (2021)<sup>2</sup> fordert jedoch bereits ab einer grundstücksbezogenen Entzugsdichte von 8 kWh/m<sup>2</sup>, dass EWS entweder regeneriert oder länger ausgelegt werden müssen. Ab einer Entzugsdichte von 33 kWh/m<sup>2</sup> ist eine Regeneration vorgeschrieben. Damit die untiefe Geothermie (Wärmepumpen mit EWS) einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten kann, müssen EWS im städtischen Umfeld also grossflächig regeneriert werden. Das Erreichen von hohen Regenerationsgraden ist dabei aber mit relevanten Zusatzkosten verbunden. Weiter wird durch den Klimawandel, die Wärmeinseln und der modernen Bauweise der Gebäude der Kühlbedarf gegenüber dem Wärmebedarf immer wichtiger. Erdwärmesonden können mittels Geocooling (auch Freecooling / passive Kühlung) fast ohne Zusatzkosten zur Gebäudekühlung eingesetzt werden, dabei werden aber nur beschränkte Kälteleistungen und tiefe Regenerationsgrade erreicht<sup>3</sup>. Mit aktiver Kühlung mittels Kältemaschine oder reversibler Wärmepumpe und ggf. zusätzlicher Entfeuchtung der Zuluft können höhere Kälteleistungen und Regenerationsgrade erreicht werden<sup>4</sup>. Jedoch ist die aktive Kühlung von Wohngebäuden zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorgesehen und die SIA 180<sup>5</sup> 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 wird zu einer vermehrten Verfügbarkeit oder gar einem Überschuss von günstigem, lokal verfügbarem erneuerbarem Strom an heissen Sommertagen führen. Wenn dieser zur Kühlung von Wohngebäuden und gleichzeitig zur Regeneration von EWS eingesetzt wird, kann dies energetisch sinnvoll sein.

Dieses Projekt zeigt auf, unter welchen Bedingungen eine aktive Kälteerzeugung bei Systemen mit Wärmepumpe und EWS in Wohngebäuden energetisch und ökonomisch vorteilhaft ist, wenn ganze Quartiere oder Städte betrachtet werden.

Der Einsatz einer Wärmepumpe als Kältemaschine ist mit geringen Zusatzkosten möglich und kann einen erhöhten Komfort und gegebenenfalls Einsparungen bei anderen Wärmeschutzmassnahmen bieten. Aktive Kühlung von Gebäuden erzeugt Abwärme, welche



im Sommer nur teilweise genutzt werden kann. Ein Abwurf 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 der städtischen Luft im Extremfall sogar Wärme entzogen werden, falls die Aussenluft ebenfalls zur Regeneration verwendet wird. Wenn dadurch hohe Regenerationsgrade erreicht werden, können EWS kürzer ausgelegt und somit Kosten für die Erstellung der Sonde eingespart werden. Diese Einsparungen sind bei Einzelanlagen gering, werden aber bei einer dichten Erdwärmennutzung im städtischen Kontext relevant. Zusätzlich wird eine Langzeitauskühlung des Untergrunds verhindert. Damit erhöht sich die Quelltemperatur für Wärmepumpen im Winter, was deren Effizienz steigert. Bei vollständiger Regeneration kann die Erdsondendichte in einem Quartier erhöht werden und es können somit mehr Gebäude mit erneuerbaren Energien versorgt werden.

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 analysiert, welche eine Vielzahl von Objekten mit unterschiedlichem Wärme- und Kältebedarf aufweisen. Dabei wird aufgezeigt, wie sich von Objekt zu Objekt unterschiedliche, aber im Durchschnitt hohe Regenerationsgrade auf die Langzeit-Temperaturentwicklung der Sonden auswirken.

## 1.2 Projektziele

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 haben unterschiedliche Massnahmen bezüglich dem passiven Wärmeschutz?
- Welchen Einfluss hat das Verteilsystem auf die Energiemenge, die dem Gebäude entzogen werden kann?
- 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 Grundlagen

Für dieses Projekt wurden diverse Datensätze von vier Quartieren in Zürich und einem Quartier in Rapperswil-Jona ausgewertet und zusammengetragen. Zusätzlich wurden Meteodaten für den momentanen Zeitpunkt und eine Prognose für das Jahr 2050<sup>6</sup> verwendet. Die verwendeten Basisdaten werden nachfolgend kurz vorgestellt.

### 2.1 Quartier 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 Anhang 0 - 7B.4 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 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 Geodatenbanken entnommen werden.

Tabelle 1: Im Rahmen des Projektes verwendete Geodatenbanken

Name	Referenzjahr	Beschreibung	Quelle
Solarenergie Eignung Dächer	2016	Dachflächen PV	(BFE, 2016) <sup>7</sup>
EnergyGIS Wärme	2015	Bedarfsdaten Südquartier	(AWE, 2017) <sup>8</sup>
GWR Basisdaten	2018	Basisdatensatz alle Quartiere	(BFS, 2018) <sup>9</sup>
GDP Stadt Zürich	2018	Bedarfsdaten Zürich	(Stadt Zürich, 2018) <sup>10</sup>
swissBuildings3D	2020	Visualisierung Gebäude	(swisstopo, 2020) <sup>11</sup>

Die Datenbanken enthalten diverse Daten zu Heizwärmebedarf, Warmwasserbedarf, Energiebezugsflächen, Baujahr, Solarpotential und weitere. Die Daten sind hierbei aufgeschlüsselt auf das jeweilige Gebäude (EGID) für das aufgeführte Referenzjahr. Für die Gebiete in Zürich stehen zusätzlich Prognosen für das Jahr 2035 und 2050 zur Verfügung.





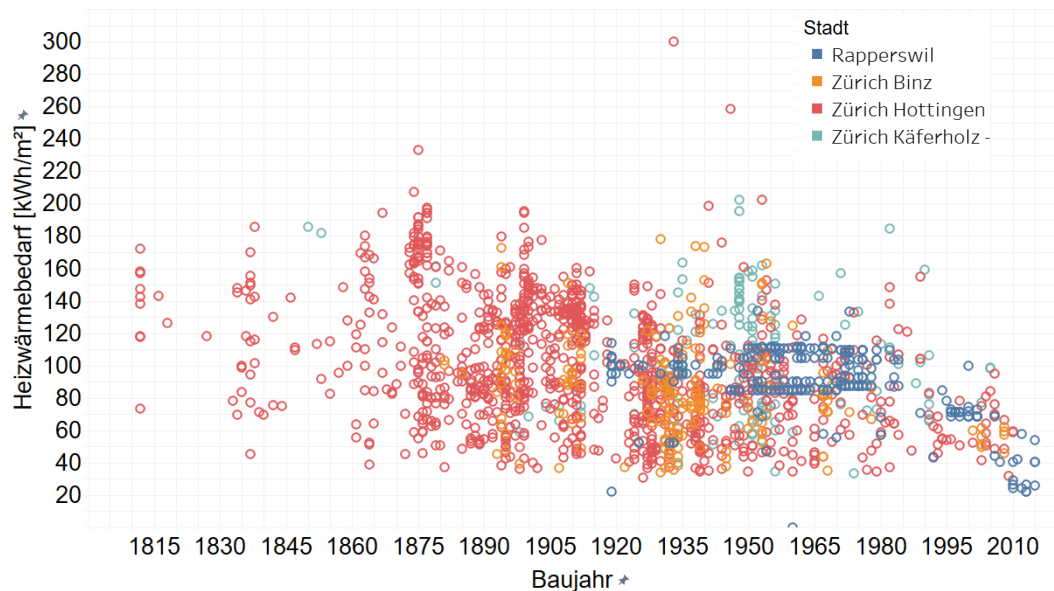
## 2.2 Kennwerte der Quartiere

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 hierbei die Datensätze gemäss Kapitel 2.1.

Tabelle 2: Übersicht und relevante Kennzahlen (Stand heute) der betrachteten Untersuchungsgebiete.

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

Der Heizwärmebedarf der Wohngebäude ist in Abbildung 1 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.





## 2.3 Klimadaten

In der Studie werden zwei Klimadatensätze aus synthetischen Designreferenzjahren aus Meteonorm 8 für den Standort Zürich verwendet<sup>6</sup>:

- «Meteonorm Aktuell» und
- «Meteonorm 2050 RCP4.5».

Die Szenarien beziehen sich jeweils auf ein Klimaszenario gemäss IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)<sup>12</sup>. 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.

## 3 Vorgehen und Methode

Eine vereinfachte Übersicht der angewandten Methodik kann der nachfolgenden Abbildung 2 entnommen werden. Die definierten Untersuchungsgebiete legen zusammen mit den von den Projektpartnern abgegebenen kantonalen und nationalen Gebäudedatenbanken den Grundstein der Arbeit.

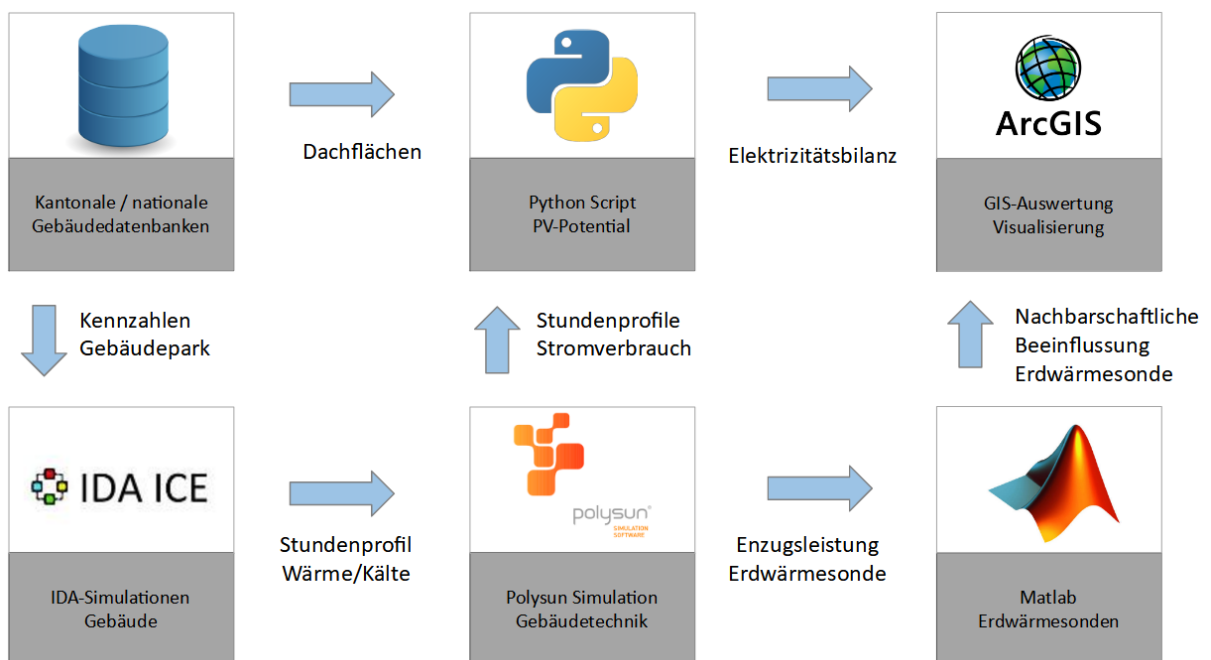


Abbildung 2: Übersicht Methodik und verwendete Hilfstoos



Die Gebäudedaten 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 eine Elektrizitätsbilanz. Parallel wird über eine Matlab-Simulation die Auskühlung des Erdreiches über 50 Jahre bestimmt.

### 3.1 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<sup>2</sup> und Jahr) den Gebäuden im Quartier zugeordnet werden können und anschliessend für unterschiedliche passive Wärmeschutzmassnahmen, unterschiedliche Heiz-/Kühlsysteme sowie unterschiedliche Klimaszenarien simuliert werden.



#### 3.1.1 Simulierte Gebäude

Die Referenzgebäude für die Simulationen basieren auf den Forschungsprojekten ClimaBau<sup>13</sup> und ImmoGap<sup>14</sup>. Die wesentlichen Aspekte der unterschiedlichen Simulationsgebäude sind in Tabelle 3 zusammengefasst, beginnend mit dem Gebäude mit dem höchsten Heizwärmebedarf.

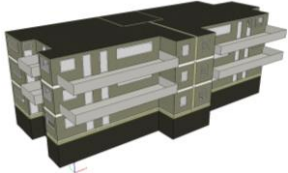
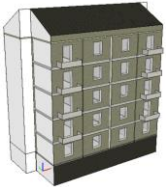
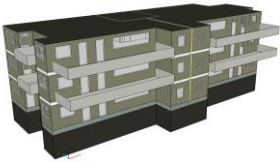
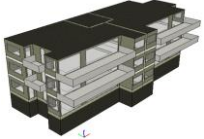

Als interne Lasten werden die Standardwerte nach SIA Merkblatt 2024<sup>15</sup> für ein Mehrfamilienhaus verwendet:

- Personenbelegung: 30 m<sup>2</sup> / Person (14 Vollaststunden pro Tag, 9 Vollaststunden zwischen 22 Uhr und 7 Uhr und 5 Vollaststunden zwischen 7 Uhr und 22 Uhr)
- Beleuchtung: 2.7 W/m<sup>2</sup> (4 kWh/m<sup>2</sup> pro Jahr)
- Betriebseinrichtungen: 8 W/m<sup>2</sup> (14 kWh/m<sup>2</sup> pro Jahr)

Tabelle 3: Übersicht der Simulationsmodelle

Name	Beschreibung	Visuelle Darstellung
ClimaBau – Altbau Standard	Unsanierter Altbau aus den 70-er Jahren, Fensterlüftung (CO <sub>2</sub> -Konzentration im Winter zwischen 1100-1500 ppm), Fensteranteil 16 % der Fassadenfläche, Heizwärmebedarf 140 kWh/m <sup>2</sup> , Energiebezugsfläche (EBF) 964 m <sup>2</sup>	
SPF Referenz Altbau	Unsanierter Altbau, Fensterlüftung (CO <sub>2</sub> -Konzentration im Winter zwischen 600-1000 ppm), Fensteranteil 11 % der Fassadenfläche, Heizwärmebedarf 135 kWh/m <sup>2</sup> , EBF 1164 m <sup>2</sup>	



SPF-Referenz Bestand	Bestandbau, Fensterlüftung (CO <sub>2</sub> -Konzentration im Winter zwischen 600-1000 ppm), Fensteranteil 20 % der Fassadenfläche, Heizwärmebedarf 80 kWh/m <sup>2</sup> , EBF 1169 m <sup>2</sup>	
ClimaBau – Altbau geschützt	Sanierter Altbau, Fensterlüftung (CO <sub>2</sub> -Konzentration im Winter zwischen 1100-1500 ppm), Fensteranteil 22 % der Fassadenfläche, Heizwärmebedarf 60 kWh/m <sup>2</sup> , EBF 924 m <sup>2</sup>	
SPF-Referenz MuKE n	Referenzgebäude, Fensterlüftung (CO <sub>2</sub> -Konzentration im Winter zwischen 600-1000 ppm), Fensteranteil 19 % der Fassadenfläche, Heizwärmebedarf 50 kWh/m <sup>2</sup> , EBF 1205 m <sup>2</sup>	
SPF-Referenz Neubau	Neubau, mechanische Lüftung (1 m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> ), Fensteranteil 34 % der Fassadenfläche, Heizwärmebedarf 15 kWh/m <sup>2</sup> , EBF 1205 m <sup>2</sup>	
ClimaBau – Niedrigenergie	Neubau, mechanische Lüftung (1 m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> ), Fensteranteil 57 % der Fassadenfläche, Heizwärmebedarf 8 kWh/m <sup>2</sup> , EBF 1515 m <sup>2</sup>	

Die Simulationsmodelle 'SPF-Referenz Neubau' 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. Das Simulationsmodell 'SPF-Referenz Neubau' wird als Parameterstudie mit zusätzlich drei realen Heiz- und Kühlsystemen untersucht: Heiz- und Kühldeckensegel, Fussbodensystem sowie Vorkühlung und Entfeuchtung der Aussenluft in der Lüftungsanlage. Die Sollwerte der empfundenen Raumtemperatur sind anhand von Figur 4 aus SIA 180:2014 «Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden»<sup>5</sup> (siehe Abbildung 3).

- Solltemperatur Heizung für Aussentemperaturen zwischen 10 °C und 19 °C:  
21 °C (unterer Grenzwert aus Abbildung 3 plus 0.5 °C Reserve)
- Solltemperatur Kühlung für Aussentemperaturen grösser als 17 °C:  
26 °C (oberer Grenzwert aus Abbildung 3 minus 0.5 °C Reserve)

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

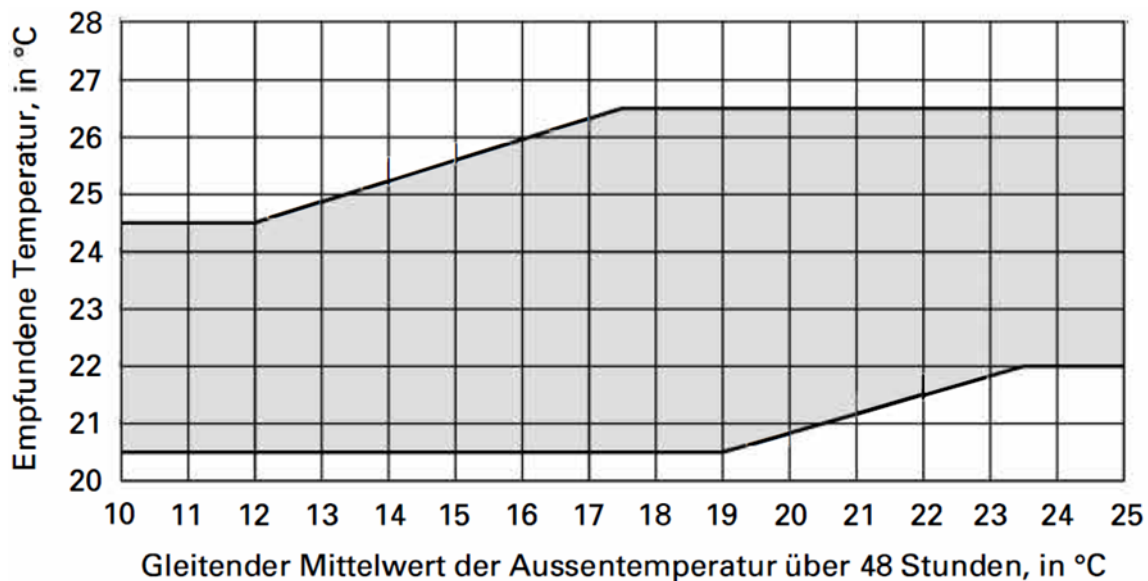


Abbildung 3: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Wohn- und Büroräumen, während diese beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet sind, je nach gleitendem Mittelwert der Aussentemperatur nach SIA 180:2014

### 3.1.2 Heiz- und Kühlsysteme in den Gebäuden

#### *Ideales Heiz- und Kühlsystem*

Beim idealen Heiz- und Kühlsystem können die gewählten Komfortbedingungen (empfundene Raumtemperatur) im Raum zu jedem Zeitpunkt eingehalten werden. Es gibt daher keine Überhitzungs- bzw. Unterkühlungsstunden.

#### *Fussbodensystem*

Das Fussbodensystem entspricht einer Fussbodenheizung, welche ebenfalls 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 von der Aussenlufttemperatur abhängig (Abbildung 4). 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/m<sup>2</sup> und 25 W/m<sup>2</sup>. Die Auslegeleistung dient für die 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 Wärmeverluste des Verteilsystems im Gebäude werden vernachlässigt.

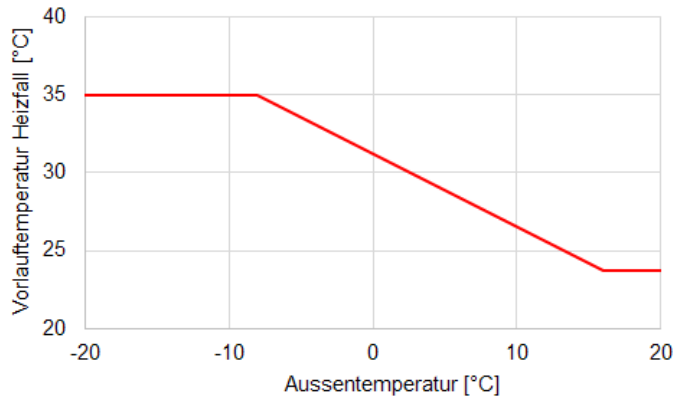


Abbildung 4: Abhängigkeit der Vorlauftemperatur des Fussbodensystems von der Aussentemperatur im Heizfall

### *Vorkühlung und Entfeuchtung der Aussenluft in der Lüftungsanlage*

Die Lüftungsanlage wird gemäss SIA 382/1:2014 betrieben, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft zu regulieren. Volumenströme sind daher nicht an die Raumtemperatur gekoppelt. Beträgt die Raumtemperatur jedoch mehr als 26 °C, wird die «Vorkühlung und Entfeuchtung der Aussenluft» aktiviert. In diesem Fall wird die einströmende Aussenluft mit einem Kühlregister, bestehend aus einem Luft-Wasser-Wärmetauscher (siehe Abbildung 5), **gemäss SIA 382/1:2014 auf bis zu 16°C abkühlt**. Im Raum mischt sich diese Zuluft mit der Raumluft. Die Abluft ist dann kühler als die Aussenluft und könnte über Wärmerückgewinnung zur Vorkühlung der Aussenluft verwendet werden. Da wir jedoch an Regeneration der Erdsonden interessiert sind, wurde die Wärmerückgewinnung im Kühlfall ausgeschaltet und die Vorkühlung wird rein über den Kältespeicher, welcher über eine Wärmepumpe an die Erdsonden gekoppelt ist, bewerkstelligt. Weil es in diesem System keine Kopplung an die Raumtemperatur gibt, ist die Kühlleistung nur von der Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Aussenluft abhängig. Im Gegensatz zu den anderen Systemen wird für dieses System in Kapitel 4.1.1 nur der Kühlfall und nicht der Heizfall analysiert.

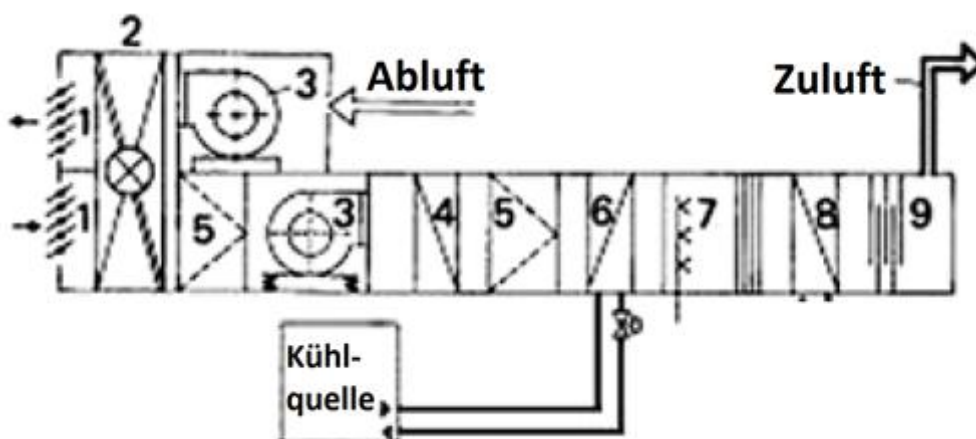


Abbildung 5: Prinzipschema einer Lüftungsanlage (1 – Jalousieklappe, 2 – Wärmerückgewinnung (für den Kühlfall ausgeschaltet), 3 – Ventilator, 4 – Vorerwärmer, 5 – Filter, 6 – Kühler, 7 – Luftbefeuchter, 8 – Nacherwärmer, 9 – Schalldämpfer)

### *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. Die Heizleistung entspricht  $42 \text{ W/m}^2$  bei einer Raumlufttemperatur von  $21 \text{ °C}$  und bei mittlerer Wassertemperatur im System von  $35 \text{ °C}$ . Die Kühlleistung beträgt  $94 \text{ W/m}^2$  bei einer Raumlufttemperatur von  $26 \text{ °C}$  und bei mittlerer Wassertemperatur im System von  $18 \text{ °C}$ . Der Gesamtwassermassenstrom im Auslegefall beträgt  $4.2 \text{ L/s}$  ( $0.7 \text{ L/s}$  in jedem der sechs parallelen Stränge). Die maximale Heizleistung im Winter beträgt  $80 \text{ W/m}^2$ . Die Wärmeverluste des Verteilsystems im Gebäude werden vernachlässigt.

### **3.1.3 Passive Wärmeschutzmassnahmen der Gebäude**

#### *Sonnenschutz*

Die Verschattung wird geschlossen, falls die auf die Fassade einfallende Solarstrahlung mehr als  $200 \text{ W/m}^2$  beträgt und die Raumtemperatur  $23 \text{ °C}$  überschreitet. Aus Sicherheitsgründen wird die Verschattung nicht geschlossen, falls die Windgeschwindigkeit  $10 \text{ m/s}$  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  $5^\circ$ ) durchgeführt, falls folgende Bedienungen erfüllt sind:

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

#### *Aussenluftkühlung*

Aussenluftkühlung wird durch Fensteröffnungen während des Tages realisiert. Falls die Aussenlufttemperatur tiefer als die Raumlufttemperatur ist, gelten folgende Regeln: Ist die Raumtemperatur grösser als  $23 \text{ °C}$ , wird das Fenster geöffnet. Das Fenster bleibt dann so lange geöffnet, bis die Raumtemperatur kleiner als  $22 \text{ °C}$  ist. Dann wird das Fenster geschlossen und bleibt so lange geschlossen bis die Raumtemperatur wieder über  $23 \text{ °C}$  steigt. Damit soll die Raumtemperatur zwischen  $22 \text{ °C}$  und  $23 \text{ °C}$  gehalten werden. Falls die Aussenlufttemperatur grösser als die Raumlufttemperatur ist, werden die Fenster nur für die Reduktion der  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Raum geöffnet.



### 3.1.4 Von den Referenzgebäuden zum Quartier

Um den für die Referenzgebäude simulierten Bedarf für die Raumkühlung auf das Quartier zu übertragen, wurde eine Geoanalyse durchgeführt. Basierend auf der Energiekennzahl Heizen wurden sämtliche Gebäude im Quartier dem entsprechenden Referenzgebäude zugeordnet. Die Bauklassifizierung für das Referenzszenario 2.1 kann der Abbildung 6 entnommen werden. Diese Bauklassen sind für jedes Simulationsszenario (gemäss Kapitel 3.1.5) neu zu definieren, da sich entsprechend der Massnahme die Energiekennzahl Heizen und insbesondere die Energiekennzahl Kühlen für das entsprechende Gebäude ändert.

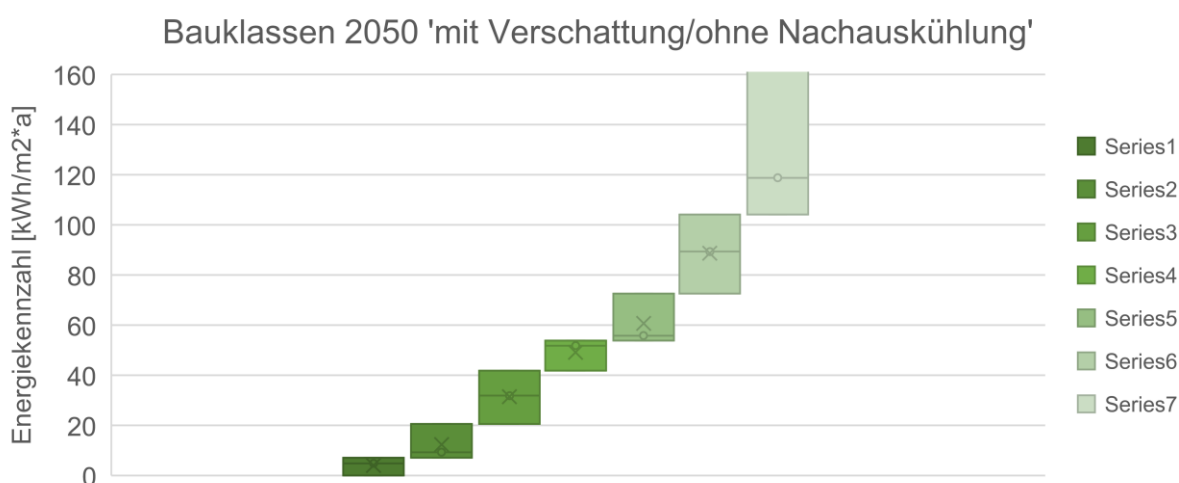


Abbildung 6: Zuordnung Gebäude auf Quartierebene anhand der Referenzgebäude in Bauklassen am Beispiel des Referenzszenarios 2.1.

Nach der Zuordnung sämtlicher Gebäude im Quartier zu einer der Bauklassen kann den Gebäuden in einem nächsten Schritt die entsprechende Energiekennzahl Kühlen zugeordnet werden (Beispiel gemäss Tabelle 4). Abschliessend wird unter Berücksichtigung der Energiebezugsfläche der Kältebedarf für sämtliche Gebäude ausgerechnet und es ergibt sich für jedes Gebäude / das betrachtete Quartier ein benötigter Kühlbedarf.

Tabelle 4: Zuordnung Kennzahl Heizen / Kühlen beispielhaft für das Szenario 2.1

Referenzgebäude	EKZ Heizen [kWh/m <sup>2</sup> ]	Zuordnung	EKZ Kühlen [kWh/m <sup>2</sup> ]
ClimaBau Niedrigenergie	8	->	1.81
SPF-Referenz Neubau	13	->	1.03
SPF-Referenz MuKE	39	->	0.27
ClimaBau Altbau geschützt	62	->	0.19
SPF-Referenz Bestand	67	->	0.71
SPF-Referenz Altbau	107	->	0.48
ClimaBau Altbau Standard	140	->	0.40

Für sämtliche Referenzgebäude liegen durch die IDA-ICE Simulationen sowohl der Heiz- als auch der Kühlbedarf in stündlicher Auflösung vor. Multipliziert mit den Energiebezugsflächen





der Gebäude ist der Heiz- und Kühlbedarf für das gesamte Quartier bestimmt. Aus den Polysun-Simulationen wird aus dem Heiz- und Kühlbedarf mithilfe von COP und EER 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.

### 3.1.5 Simulationsszenarien

Die Variation der passiven Wärmeschutzmassnahmen und des Auswertungsjahrs bilden eine Szenarienmatrix (Tabelle 5).

Die Szenarien 2.1 und 2.2 sind der Realität am nächsten, wobei die Szenarien 4.1, 4.2 und 5.1, 5.2 extreme Szenarien (keine Fensteröffnung, weder am Tag noch in der Nacht) darstellen. Alle Szenarien wurden für das ideale Heiz- und Kühlsystem simuliert. Für die Szenarien 2.1, 2.2, 4.2 und 5.2 werden zusätzlich die Heiz- und Kühlsysteme variiert.

Tabelle 5: Simulationsszenarien in Abhängigkeit von Wärmeschutzmassnahmen und Wetterdaten.

Wärmeschutzmassnahmen	Wetterdaten	
	Aktuell	2050, RCP 4.5
<b>Voll Wärmeschutz:</b> mit Nachtauskühlung, mit Sonnenschutz, mit Aussenluftkühlung	Szenario 1.1	Szenario 1.2
<b>ohne</b> Nachtauskühlung, mit Sonnenschutz, mit Aussenluftkühlung	Szenario 2.1	Szenario 2.2
<b>ohne</b> Nachtauskühlung, <b>ohne</b> Sonnenschutz, mit Aussenluftkühlung	Szenario 3.1	Szenario 3.2
<b>ohne</b> Nachtauskühlung, mit Sonnenschutz, <b>ohne</b> Aussenluftkühlung	Szenario 4.1	Szenario 4.2
<b>Kein Wärmeschutz:</b> <b>ohne</b> Nachtauskühlung, <b>ohne</b> Sonnenschutz, <b>ohne</b> Aussenluftkühlung	Szenario 5.1	Szenario 5.2



## 3.2 Methodik PV-Potential und Strombedarf

Nachfolgendes Kapitel befasst sich im ersten Teil mit der Auswertung des vorhandenen PV-Potentials in den Untersuchungsgebieten. Basierend auf dem nationalen Datensatz des BFE (sonnendach.ch) wurden 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 Mobilität, Stand 2020)
2. Verbrauch Strombedarf Wärmepumpen zu Kühlzwecken (Stand heute / 2050 für verschiedene Szenarien)

Diese Verbrauchsprofile wurden der PV-Produktion gegenübergestellt und sollen aufzeigen, ob der auf Quartierebene anfallende Kältebedarf gedeckt werden kann.

### 3.2.1 Grundlagen und potenzielle Dachflächen

Die Grundlage zur Auswertung des PV-Potentials bildete der über swisstopo erhältliche Gebäudedatensatz zur Solareignung von Fassaden und Dachflächen (Portmann, Galvagno-Erny, Lorenz, Schacher, & Heinrich, 2019; BFE, 2016). In den 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](http://www.solardach.ch) veröffentlicht. In vorliegender Studie wurden Daten aus der Datenbank zur Nutzung der Dachflächen verwendet. Eine allfällige PV-Nutzung über Fassadenelemente wurde vorliegend nicht berücksichtigt.

Tabelle 6: Einordnung Eignung Dachflächen gemäss vorliegender Auswertung. Grün eingefärbt die im Rahmen der Arbeit verwendeten Flächen (Ab Stufe gut).

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

Der erhaltene Datensatz der Dachflächen wurde einer Vorauswertung unterzogen. Dabei wurde für jede einzelne Dachfläche eine Einordnung in Bezug auf die Eignung und in Abhängigkeit der mittleren Einstrahlung gemäss Tabelle 6 ausgelesen. Für die nachfolgende Auswertung wurden sämtliche Werte ab Stufe gut (≥ 1'000kWh / m<sup>2</sup> / Jahr) und einer Fläche von grösser 20 m<sup>2</sup> ausgelesen und für die weitere Auswertung betrachtet.



Wie Abbildung 7 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.

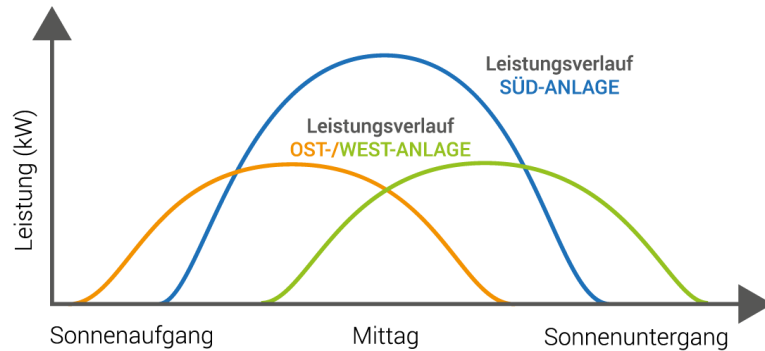


Abbildung 7: Leistungsverlauf PV-Anlage in Abhängigkeit der Ausrichtung. (Quelle: <https://www.photovoltatik.at/gewerbe>)

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 (Identifizierung 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 8 entnommen werden.

Tabelle 7: Aufschlüsselung der Dachflächen nach Orientierung und Neigung mit jeweiligem UID-Code zur Einordnung der Fläche

ID_OriNei		Orientierung										
		1 (E)	2 (ESE)	3 (SE)	4 (SSE)	5 (S)	6 (SSW)	7 (SW)	8 (WSW)	9 (W)	10 (flat)	
Neigung	100 Flach	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200
	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 8 ein Ausschnitt der Auswertung Gebiet Binz entnommen werden. Die Dachflächen sind gemäss Eignung wie in Tabelle 6 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 7 einer Orientierung und Neigung zugeordnet werden.

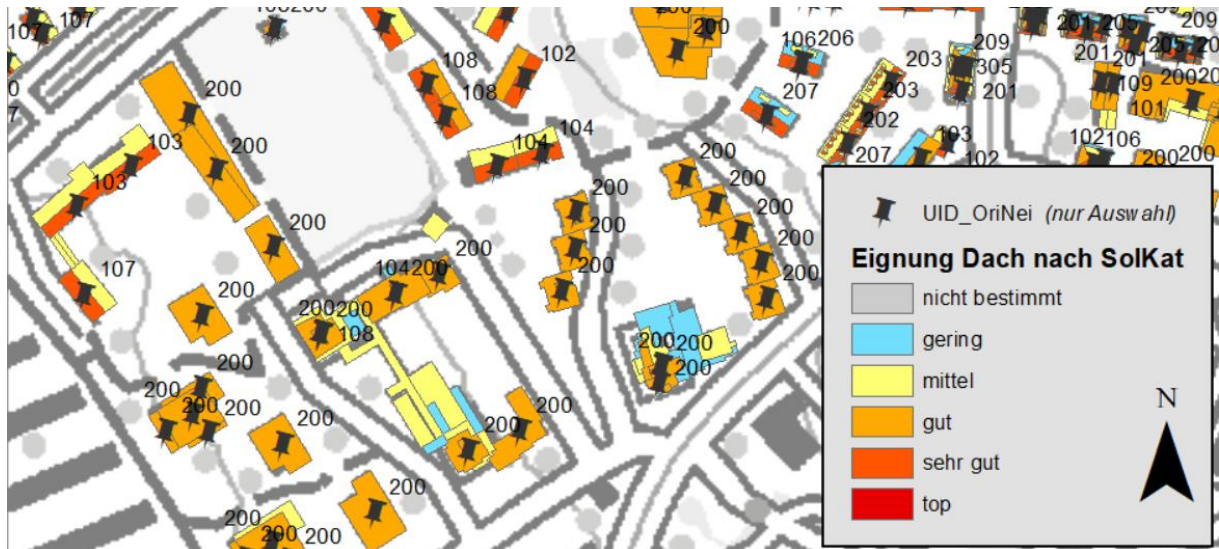


Abbildung 8: Ausschnitt Auswertung Gebiet Binz mit Eignung Dachfläche und Zuordnung UID\_OriNei für ausgewählte Dachflächen gemäss Methodik

### 3.2.2 PV-Produktion in den Untersuchungsgebieten

Basierend auf der Einteilung der einzelnen Dachflächen in Kapitel 3.2.1 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 kleine Auflösung und wurden nach Auffassung der Autoren mit zu tiefen Leistungswerten für eine zukünftige Installation betrachtet ( $\eta_{\text{Modul}} = 17\%$  und  $PR$  (Performance Ratio) =  $80\%$ ). Daher wurde für jede Orientierung eine Simulation mit besseren Kennwerten und konsistenten Wetterdaten in Polysun durchgeführt. Eine Auflistung von Kennwerten der verwendeten Komponenten und Kennzahlen kann Tabelle 8 entnommen werden.

Tabelle 8: Kennwerte der Referenzanlage für Polysun-Simulationen der festgelegten Ausrichtungen

Parameter	Wert	Einheit / Anmerkung
Fabrikat / Typ	-	Jinko Solar / JKM325M-60H-V
Modulwirkungsgrad STC	19.2	%
Modul $P_{\text{Max}}$ STC	0.325	kWp
Zelltyp	Mono	Monokristallin PERC Zelle
PV-Feld	50	PV-Module
Grösse PV-Feld	84.5	m <sup>2</sup>
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 3.2.1 festgelegt. Die Auswertung stützt 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 von aktuellen Klimadaten.

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 Tabelle 9 für das Gebiet Binz dargestellt.

Tabelle 9: Spezifischer Energieertrag Dachflächen am Beispiel der Auswertung Gebiet Binz. Grün hervorgehoben die Ausrichtungen mit den höchsten spez. Erträgen.

Ertrag spez. kWh/m <sup>2</sup>		Orientierung									
		1 (E)	2 (ESE)	3 (SE)	4 (SSE)	5 (S)	6 (SSW)	7 (SW)	8 (WSW)	9 (W)	100 (flat)
	100 Flach	-	-	-	-	-	-	-	-	-	201
Neigung	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 9 das Gesamtpotential in kWh, der Anteil an Gesamtpotential von Flachdächern sowie die Aussentemperatur auf der Sekundärachse abgebildet. Es zeigt sich der zu erwartete Tagesverlauf der Produktion in Abhängigkeit vom Sonnenstand.

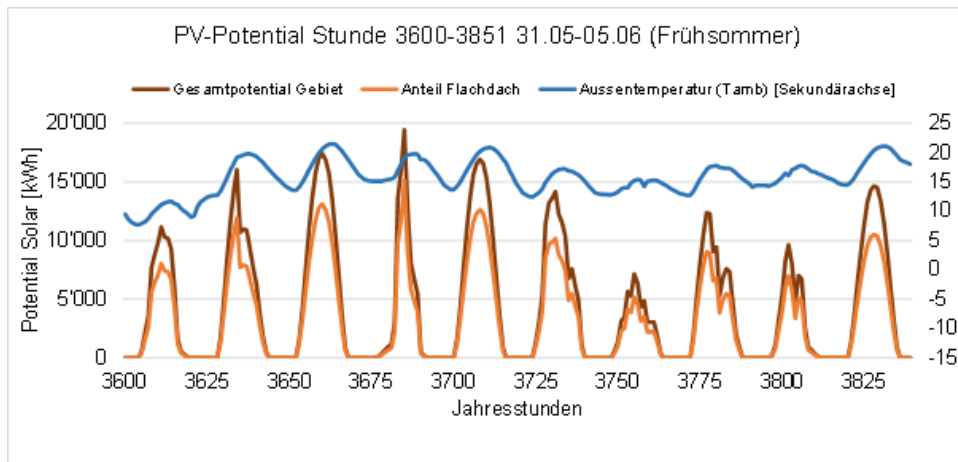


Abbildung 9: 10-Tagesverlauf (31.05-05.6) Gebiet Binz Potential PV-Produktion Flachdach, Gesamthaft sowie Aussentemperatur auf Sekundärachse.

Neben der gemäss Beschrieb oben definierten Methode wurde zusätzlich eine Auswertung durchgeführt, in der nicht die gesamte verfügbare gut geeignete Dachfläche mit einer PV-Installation belegt wurde. In dieser Variante sind lediglich Anlagen vorgesehen, welche in Anlehnung an die MuKEN 2014 für jedes Gebäude im Gebiet eine PV-Installation in der Grösse von 10 % der Energiebezugsfläche aufweist (siehe Abbildung 10, Potential minimal MuKEN). Entgegen der MuKEN 2014 wurde jedoch von keiner Leistungsobergrenze (nach MuKEN = 30 kWp) ausgegangen. Dadurch wird ca. ein Drittel des oben ausgewiesenen Gesamtpotenziales ausgeschöpft.

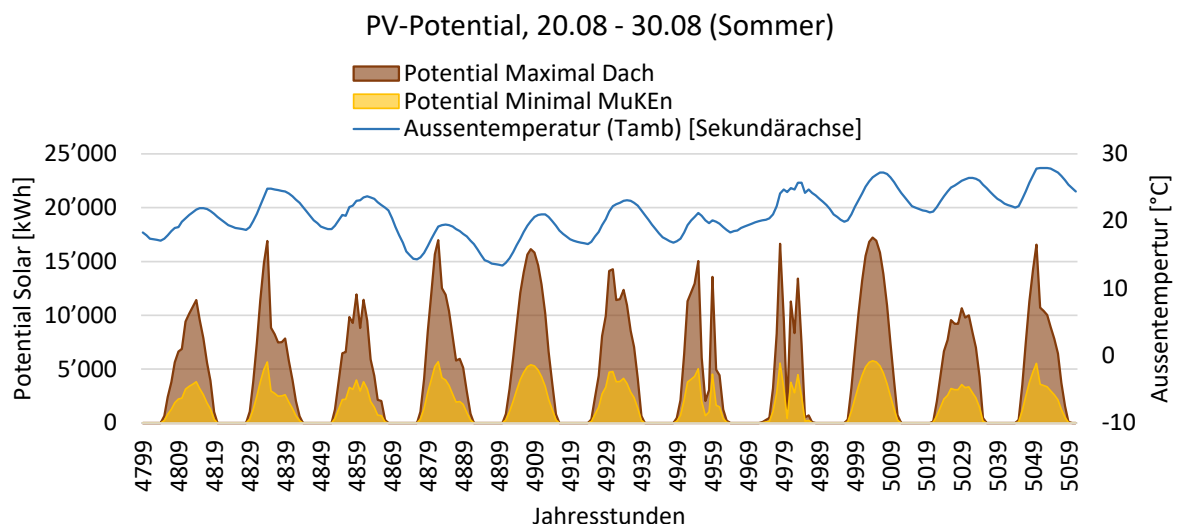


Abbildung 10: maximale PV-Produktion und minimale PV-Produktion für das Untersuchungsgebiet Binz für Sommer und Winter im 10-Tages-Verlauf.

### 3.2.3 Erhebung Haushaltsstrom im Quartier

In einem weiteren Schritt wurde der in den Wohnquartieren benötigte Bedarf an elektrischer Energie abgeschätzt. Der Fokus lag auf dem benötigten Haushaltsstrom der Gebäude, welche



in den Betrachteten Gebieten durch den Wohnsektor dominiert werden. Externe Faktoren wie Bsp. 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<sup>16</sup> die Referenzbedarfsprofile gemäss Polysun-Simulation sowie eine Erhebung des typischen Haushaltsstromverbrauchs<sup>17</sup>. Eine Übersicht der Methodik zur Erhebung des Eigenbedarfes kann der Abbildung 11 entnommen werden.

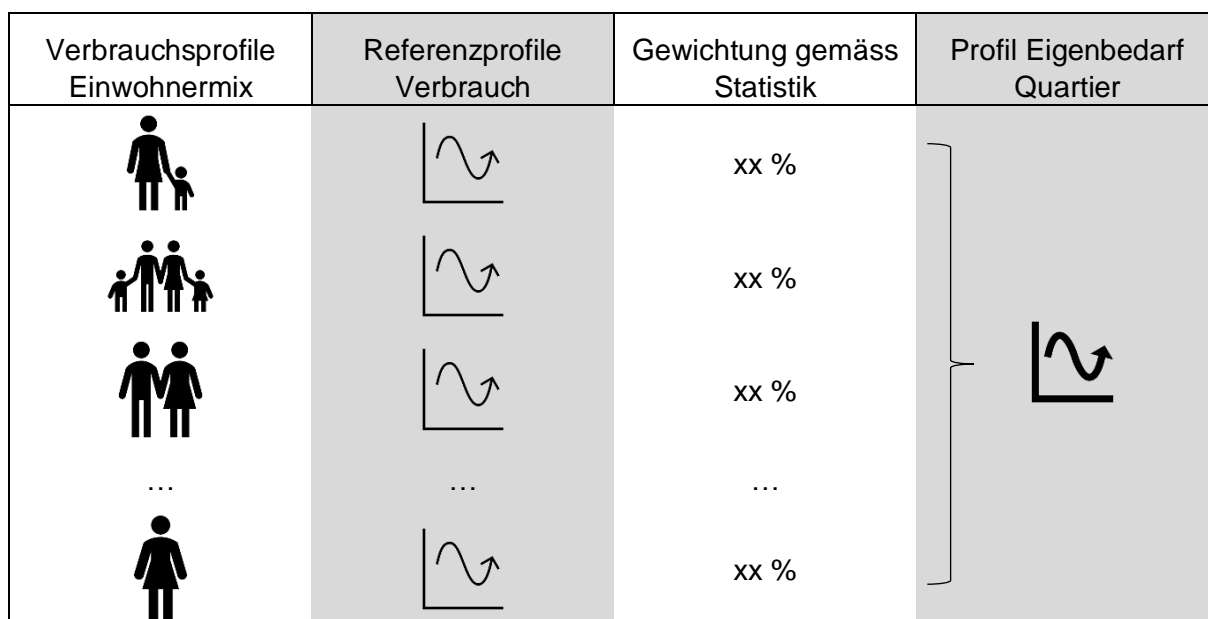


Abbildung 11: Übersicht Methodik Erhebung Eigenbedarf Gebäudepark

Für die Ermittlung des gesamten Haushaltsstrombedarfs in den jeweiligen Quartieren wurden zehn Referenzprofile aus der Software Polysun verteilt. Kennwerte zu diesen Referenzprofilen können der nachfolgenden Tabelle 10 entnommen werden.

Tabelle 10: verwendete Polysun-Referenzprofile zur Erhebung des Elektrizitätsverbrauches in den Quartieren

Profiltyp	Beschreibung	Personen	Jahresverbrauch
H05	Familie 3 Kinder	5	3344
H63	Familie 2 Kinder, 1 Arbeit	4	3392
H64	Familie 1 Kinder, 1 Arbeit	3	2766
H02	Paar, beide Arbeiten	2	2125
H16	Paar, über 65	2	1589
H07	Single, berufstätig	1	1651
H11	Student	1	774
H06	Person, arbeitslos	1	1816
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. Eine Gegenüberstellung des (maximalen) PV-Potentials sowie des Verbrauchsprofils für einen "schönen" Beispieltag für das Gebiet Hottingen kann der Abbildung 12 entnommen werden.

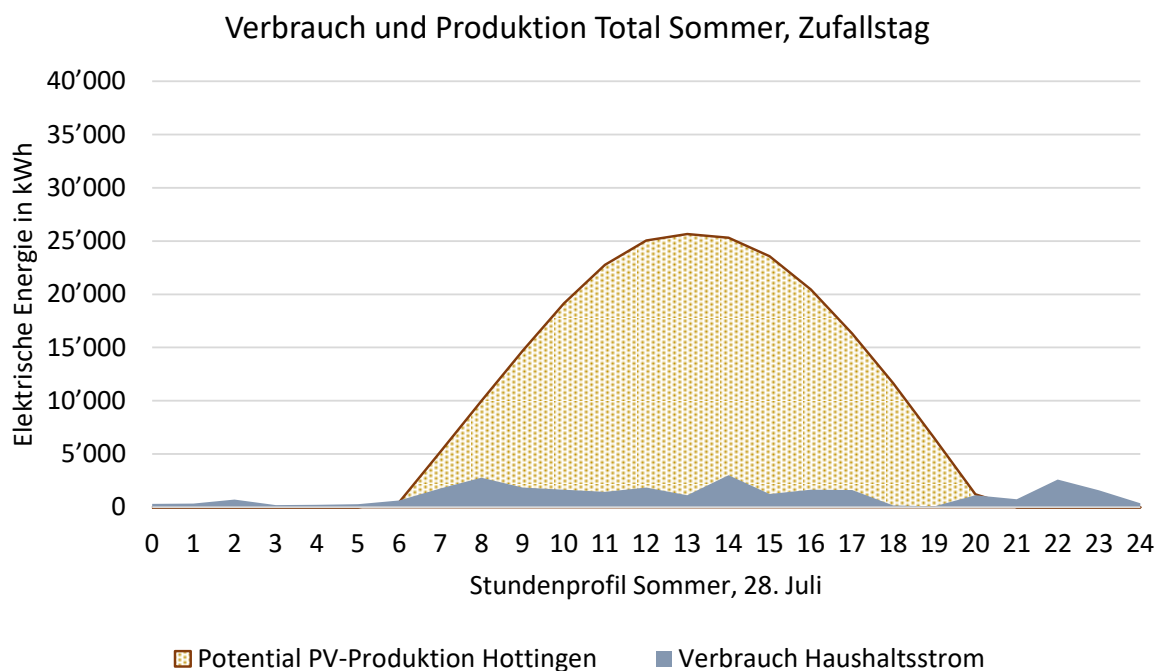


Abbildung 12: Stundenprofil PV-Produktion (maximal) und Verbrauch Haushaltsstrom für einen Beispieltag im Untersuchungsgebiet Hottingen.

### 3.3 Methodik Erdwärmesonden

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 Polysun 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.

#### 3.3.1 Simulation der Gebäudetechnik und Schnittstelle

Das hydraulische Schema der gewünschten Anlage ist in Abbildung 13 dargestellt. Zur einfacheren 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. Wärme- und Kälteerzeugung wie auch Wärme- und Kälteabgabe werden in der Simulation als separate Systeme betrachtet, wobei sie in der Realität zum Teil über dasselbe Verteilsystem übertragen werden. Die thermische Masse und die daraus folgenden Effekte





und Verzögerungen werden bereits in der Gebäudesimulation berücksichtigt, und sollten in der Polysun Simulation daher ausgeschlossen werden. Das effektive Schema, welches der Simulation hinterlegt ist, kann der nachfolgenden Abbildung 14 entnommen werden.

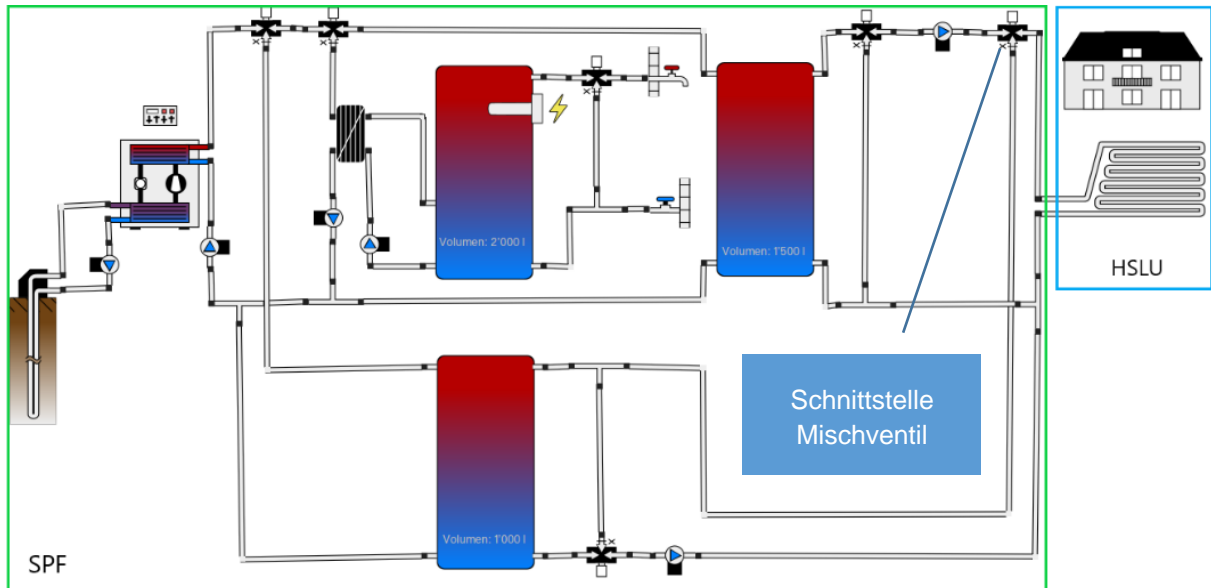


Abbildung 13: Vereinfachtes hydraulisches Schema Wärmeerzeugungs- und Kühlanlage. Eingezeichnet sind die Schnittstellen zwischen dem Simulationsteil im Polysun durch SPF (grün) und der IDA-ICE Simulation durch HSLU (blau).

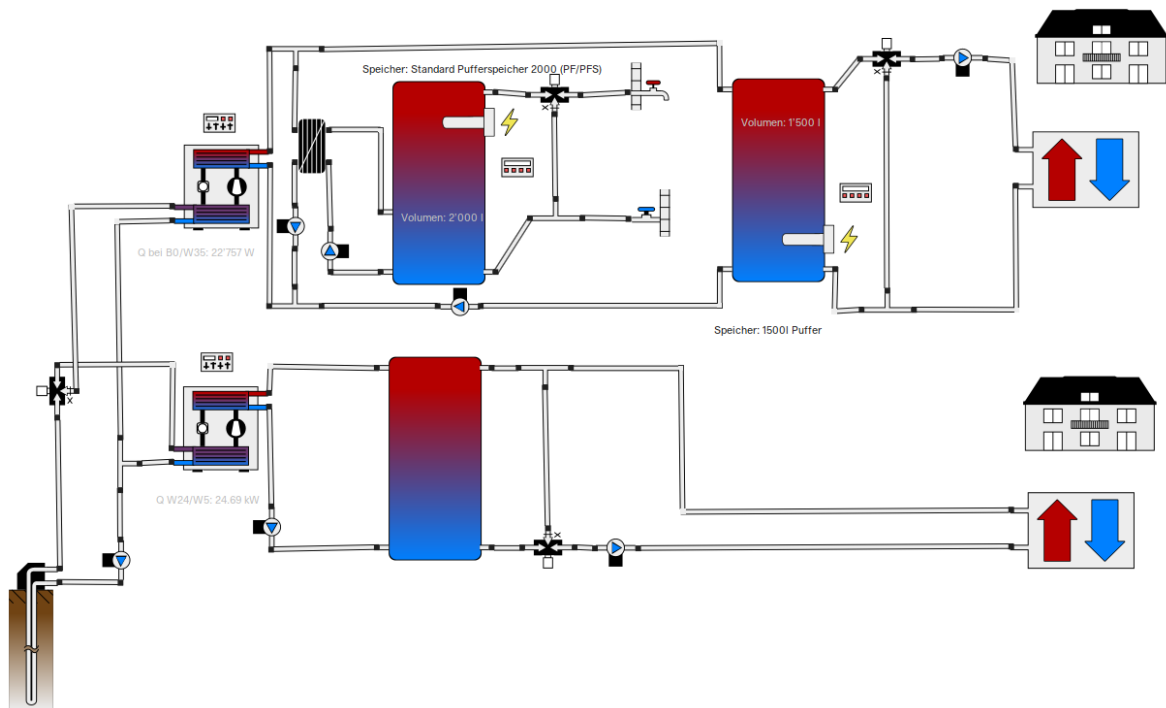


Abbildung 14: Effektives hydraulisches Schema Wärmeerzeugungs- und Kühlanlage. Wärme- und Kälteerzeugung wie auch Wärme- und Kälteabgabe werden in der Simulation als separate Systeme betrachtet



Als Beispiel können die gewählten Komponenten für das SPF-Referenzgebäude Neubau der Tabelle 11 entnommen werden.

Tabelle 11: Parameterliste Komponenten für das SPF-Referenzgebäude Neubau.

Parameter	Wert	Anmerkung
Erdwärmesonde	3 x 200 m	SIA384/6
Warmwasserbedarf inkl. Verluste	1'128 l	(18 Personen)
Heizleistung Wärmepumpe (B0/W35)	22.7 kW	(Leistungsgesteuert)
Kühlleistung Wärmepumpe (B24/W5)	24.7 kW*	(1-Stufig)
Speicher Warmwasser	2000 l	-
Speicher Puffer Heizung	1'500 l	-
Speicher Raumkühlung	1'000 l	-

Die Schnittstelle zwischen den IDA-ICE Simulationen der HSLU und den Polysun Simulationen von OST-SPF befindet sich auf Gebäudeseite der Speicher für Heizwärme und Raumkühlung, nach dem Beimischventil (Abbildung 13). Die Vorlauf-, Rücklauftemperaturen und der Massenstrom des Heiz-/Kühlsystems der IDA-ICE Simulationen werden mit einer zeitlichen Auflösung von 1 h aus csv-Files eingelesen und mittels der Wärmequelle/Wärmesenke 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- als auch eines Kühleispeichers 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 benötigten 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 leistungsreguliert gemäss Sollwertvorgabe aus der IDA-ICE Simulation.

Eine Speicherladung für den Raumkühlungsspeicher 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. Eine elektrische Nachheizung (Elektroheizeinsatz) ist vorhanden, jedoch momentan ganzjährig ausgeschaltet.

Die Beimischventile für den Heizbetrieb wie auch 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. Im momentanen Projekt sind keine Sperrzeiten für die Wärmepumpen vorgesehen.

### 3.3.2 Langzeitverhalten der Erdwärmesonden

Basierend auf den Arbeiten von Cimmino und Bernier<sup>18</sup> wurde das semianalytische Modell zur Berechnung des Langzeitverhaltens von grossen Erdsondenfeldern weiterentwickelt. Die mathematischen Ansätze dazu werden in Annex C genauer beschrieben. Die durchgeführten Erweiterungen erlauben eine Berechnung der Beeinflussung von Sonden mit unterschiedlicher Entzugsleistung und 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.

### 3.3.3 Quartierauskühlung

Die Auskühlung durch gegenseitige Beeinflussung wurde jeweils für das Zentrum einer Parzelle/Liegenschaft berechnet, und es wurden 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 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 mit dieser Vereinfachung aber betrachtet werden. **Der Platzbedarf und die verfügbaren Flächen wurden nicht abgeklärt. Es gibt 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 vernachlässigt.** Um Randeffekte zu minimieren, wurden die Quartiere mit einem regelmässigen Raster mit 20 m x 20 m Abstand umgeben, wobei die mittlere flächenspezifische Entzugsleistung aus dem Quartier für das umgebende Raster übernommen wurde.

Um die Entzugsenergie aus den Sonden in einem ersten Schritt für die Quartieranalyse abzuschätzen, wurden die Bedarfsdaten mit einem durchschnittlichen COP von 4 für Gebäudeheizung, 3 für Warmwasserbereitung und 4.5 (EER) für die Gebäudekühlung verringert.



## 4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

### 4.1 Ergebnisse Heiz- und Kühlbedarf

Um die Entzugswärme aus dem Erdreich, die Regenerationswärme in das Erdreich, und damit schliesslich die Langzeitabkühlung des Erdreichs abschätzen zu können, muss zuerst der Heiz- und Kühlbedarf der Gebäude in den betrachteten Quartieren bestimmt werden. Dafür wurden die sieben Referenzgebäude (Kapitel 3.3.1) den Gebäuden im Quartier zugeordnet und für verschiedene Klimaszenarien (Kapitel 3.1.5), verschiedene Heiz- und Kühlsysteme (Kapitel 3.1.2) und verschiedene passive Wärmeschutzmassnahmen (Kapitel 3.1.3) der Heiz und Kühlbedarf bestimmt.

#### 4.1.1 Heiz- und Kühlbedarf der Einzelgebäude

In einem ersten Schritt wird ein ideales Heiz- und Kühlsystem angenommen, welches zu jedem Zeitpunkt ideale Komforttemperaturen garantiert. Der Heiz- und Kühlbedarf wird für die sieben Referenzgebäude betrachtet. Es wird sowohl der heutige Zeitpunkt (2020) als auch das Jahr 2050 betrachtet. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 15 dargestellt. Die unterschiedlichen Farben beziehen sich auf unterschiedliche Kombinationen (Szenarien) von passiven Wärmeschutzmassnahmen. Im Szenario 1 (blaue Balken in Abbildung 15) werden alle verfügbaren passiven Wärmeschutzmassnahmen angewendet (mit Nachtauskühlung, mit Sonnenschutz, mit Aussenluftkühlung). Werden nur die blauen Balken betrachtet, wird deutlich, dass der Heizbedarf (nach oben gerichtete Balken in Abbildung 15) wie erwartet stark vom Gebäudetyp abhängt, jedoch in Zukunft (2050) abnimmt. Der Kühlbedarf (nach unten gerichtete Balken in Abbildung 15) ist für Altbauten nur wenige Prozent des Heizbedarfs. Für Neubauten (z.B. «Climabau Niederenergie») liegt der Kühlbedarf bereits bei ca. 10 % (2020) und 25 % (2050) des Heizbedarfs. Werden nun die passiven Wärmeschutzmassnahmen reduziert (grüne und gelbe Balken), bleibt der Heizbedarf fast unverändert, der Kühlbedarf steigt jedoch an. Im Extremfall (Szenario 5, orange Balken, keine Fensteröffnung, kein Wärmeschutz, «Climabau Niederenergie») übersteigt der Kühlbedarf den Heizbedarf schon jetzt (2020) um den Faktor 3. Dies ist jedoch ein unrealistisches Massnahmenszenario und bezieht sich auch auf ein untypisches Gebäude für bestehende Quartiere. Für das Gebäude «SPF-Referenz MuKE» übersteigt der Heizbedarf den Kühlbedarf für alle Szenarien, um den Faktor 6 für das extreme Szenario 5, und um den Faktor 10 für das realistischere Szenario 2, beides schon auf das Jahr 2050 bezogen. **Für bestehende Quartiere ist daher auch in Zukunft mit einem weit grösseren Heizbedarf als Kühlbedarf zu rechnen.**

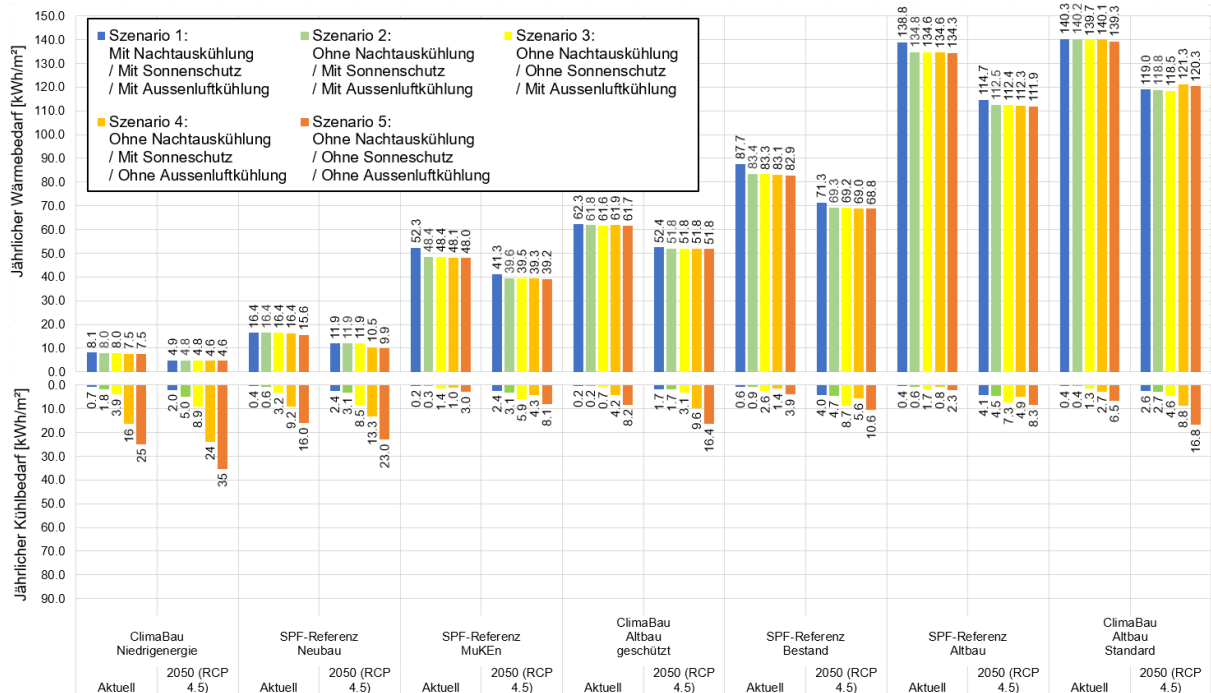


Abbildung 15: Simulationsergebnisse für ein ideales Heiz- und Kühlsystem mit Wärmeschutzmassnahmen und extremen Szenarien

In Abbildung 15 wurden die Simulationsergebnisse der Szenarien mit einem idealen Heiz- und Kühlsystem dargestellt. Nun wird der Einfluss der unterschiedlichen Heiz- und Kühlsysteme auf die entstehenden Überhitzungsstunden, die Kühlleistung und den Kühlbedarf untersucht. Dabei wird das Gebäude «SPF-Referenz Neubau» verwendet und für die vier Szenarien 2.1, 2.2, 4.2 und 5.2 (Tabelle 5) jeweils das Kühlsystem variiert. Per Definition hat das ideale System keine Überhitzungsstunden (Abbildung 16), unabhängig vom Szenario. Das System Heiz- und Kühldeckensegel weist ebenfalls keine Überhitzungsstunden auf, kann also den Kühlbedarf in jedem Zeitpunkt decken. Aktuell (2020) ist dies bei entsprechenden Massnahmen (Szenario 1.2.) auch beim Fussbodensystem und beim Vorkühlen und Entfeuchten der Aussenluft (beinahe) gewährleistet. In Zukunft (2050) und bei Verzicht auf Wärmeschutzmassnahmen erzeugen sowohl das Fussbodensystem, vor allem aber die Kühlung über die Lüftung, erhebliche Überhitzungsstunden. Da das System «Vorkühlung und Entfeuchtung der Aussenluft in der Lüftungsanlage» nur von der Aussenluft und nicht von der Raumluft abhängt, ist die maximale Kühlleistung (Abbildung 17) ebenso wie der jährliche Kühlbedarf (Abbildung 18) innerhalb eines Klimaszenarios konstant, jedoch für die Zukunft höher (steigende Temperaturen) als für die aktuellen Wetterdaten. Der jährliche Kühlbedarf (Abbildung 18) für das «ideale System», «Heiz-/Kühldeckensegel» und «Bodensystem» ist ähnlich, da in allen drei Fällen der Wärmeeintrag in das Gebäude, hauptsächlich verursacht durch Sonneneinstrahlung und interne Lasten, abgeführt werden kann. Wäre dies nicht der Fall, würde sich die Raumtemperatur nicht stabilisieren. Implizit bedeutet das, dass sich die Raumtemperatur so einstellt, dass sich ein Gleichgewicht zwischen zugeführter Wärme und über das Kühlsystem abgeführter Wärme einstellt. Beim Fussbodensystem sind die Raumtemperaturen in diesem Gleichgewichtszustand tendenziell höher als beim idealen System oder beim Heiz-/Kühldeckensystem, was sich dann auch in den Überhitzungsstunden widerspiegelt. Da Heiz- und Kühldeckensegel in Wohnbauten weniger verbreitet sind als



Fussbodensysteme, ist die Kombination von Fussbodensystemen mit Kühlen über die Lüftung ein vielversprechender Ansatz, welcher weiterverfolgt wird.

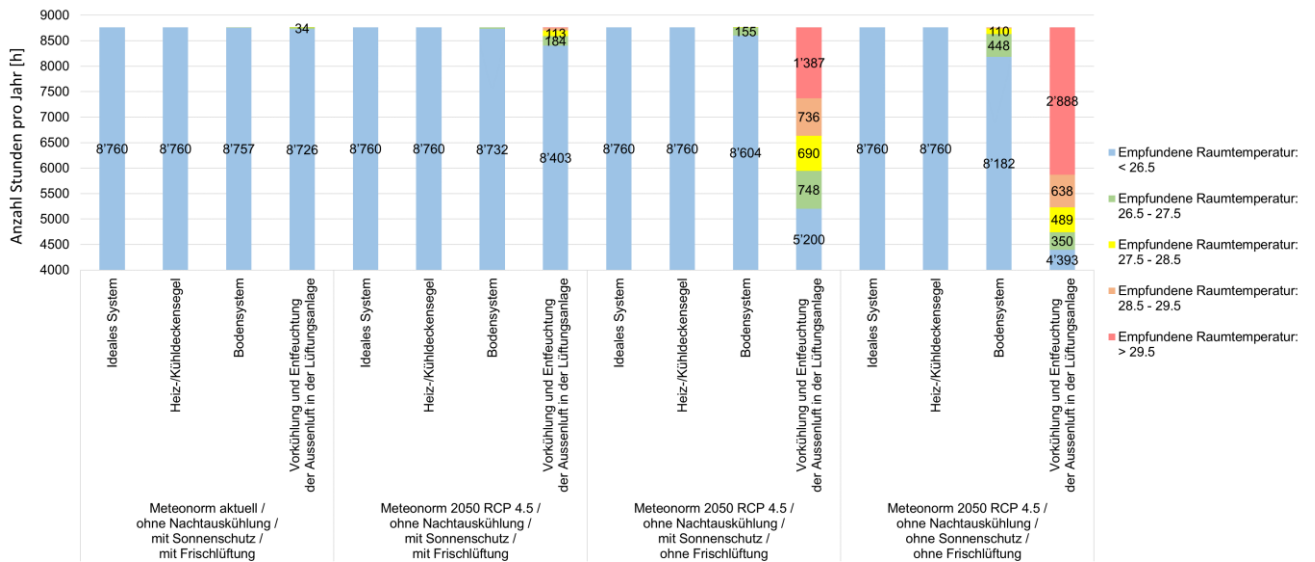


Abbildung 16: Anzahl der Überhitzungsstunden pro Jahr bei den unterschiedlichen HLC-Systemen

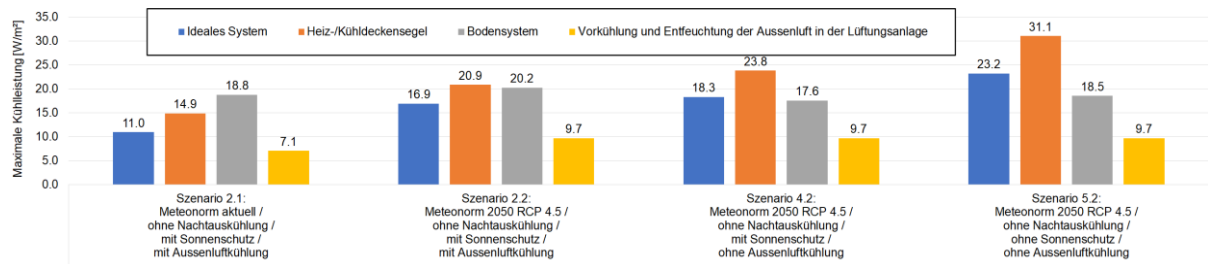


Abbildung 17: Maximale Kühlleistung der HLC-Systeme

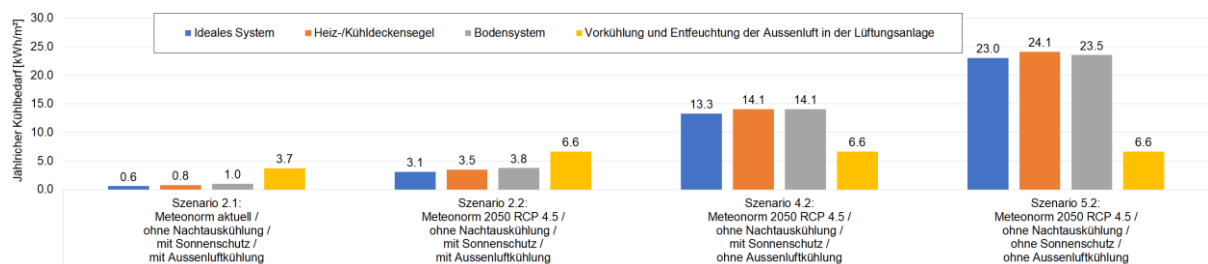


Abbildung 18 Jährlicher Kühlbedarf bei den unterschiedlichen HLC-Systemen

#### 4.1.2 Quartierbetrachtung

Für eine erste Quartierbetrachtung wurde für den Zwischenbericht nur das Quartier Hottingen ausgewählt. Mithilfe der in Kapitel 3.1.4 definierten Bauklassen wurde jedem Gebäude im Quartier ein Referenzgebäude zugeordnet. Als Heiz- und Kühlsystem wurde für alle Gebäude im Quartier die Heizungsverteilung gewählt. Als passiver Wärmeschutz wurde Verschattung, aber keine Nachtauskühlung angenommen und als Zeitpunkt wird die momentane Situation (2020) gewählt. Dies entspricht Szenario 4.1 aus Tabelle 5.

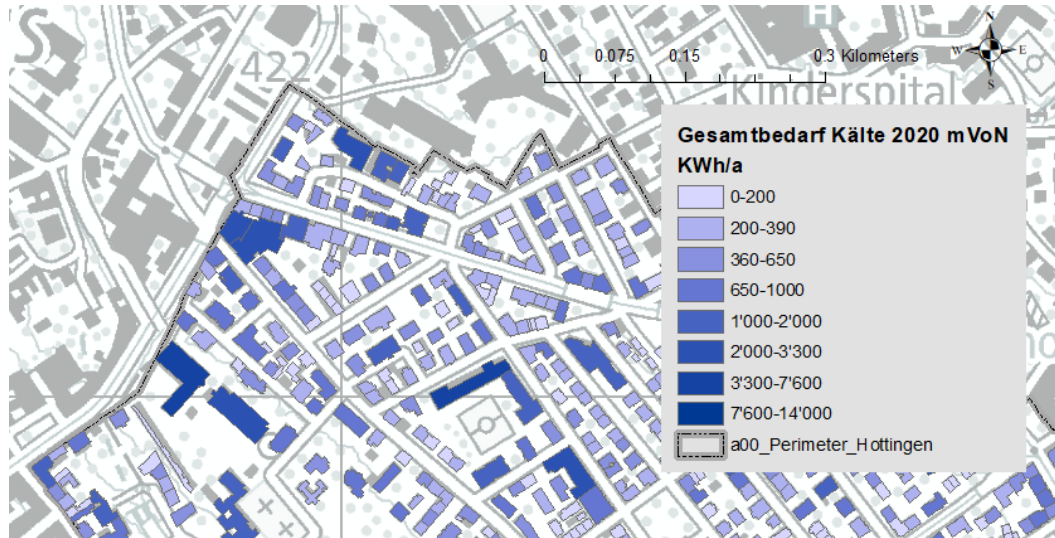


Abbildung 19: Ausschnitt Gebiet Hottingen, Kältebedarf 2020, Szenario mit Verschattung, ohne Nachtauskühlung und ohne Aussenluftkühlung



## 4.2 Ergebnisse PV-Potential und Strombedarf

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 zu tätigen. Der nachfolgenden Tabelle 12 kann eine Gegenüberstellung der relevanten Kennwerte entnommen werden. In der Ausarbeitung wurden 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 3.1.4 ausgeführt unterschiedlich. Die Deckungsgrade des Kühlbedarfs (ohne Einsatz von Speichern) durch lokal produzierten PV-Strom zeigt eine hohe Deckungsrate von 69 - 79 %.

Tabelle 12: Auswertung Kennzahlen für die Quartiere Binz und Hottingen für die betrachteten Szenarien. 2.1: mit Verschattung, ohne Nachtauskühlung; 5.2 ohne Verschattung ohne Fensterlüftung

	Binz 2020 Szenario 2.1	Binz 2050 Szenario 5.2	Hottingen 2020 Szenario 2.1	Hottingen 2050 Szenario 5.2
Produktion PV in MWh	25'450	25'450	40'535	40'535
Bedarf Haushaltsstrom in MWh	3'309	3'309	11'931	11'931
Bedarf Kühlen in MWh	65	2'118	122	2'811
Netzbezug Kühlen in MWh	13	652	27	856
Deckungsgrad durch PV in %	79	69	78	70

Eine graphische Darstellung der Verläufe dieser Kennwerte für drei Sommertage und zwei verschiedenen Simulationsszenarien wird in den nachfolgenden Abbildung 20 und Abbildung 21 gegeben. Wie daraus ersichtlich ist, liegt in den Tagesstunden die Produktion aus den PV-Anlagen um ein Vielfaches über dem notwendigen Bedarf zur Kühlung. Jedoch zeigt sich, dass je nach Szenario auch in den Abend- und Nachtstunden Kältebedarf anfallen kann. Aus diesem Grund können in dieser vereinfachten Betrachtung je nach Szenario noch 21-31 % des Elektrizitätsbedarfs für Kühlung (ohne Speicher) nicht durch lokalen PV-Strom gedeckt werden. Durch den Einsatz von Kältespeichern oder einer optimierten Regelung könnte die Deckungsrate wohl zusätzlich erhöht werden. Die Bereitstellung von Warmwasser mit Wärmepumpen und deren Regelung wurde in dieser Betrachtung noch nicht berücksichtigt.





### Hottingen, 3 extrem Sommertage, mVoN

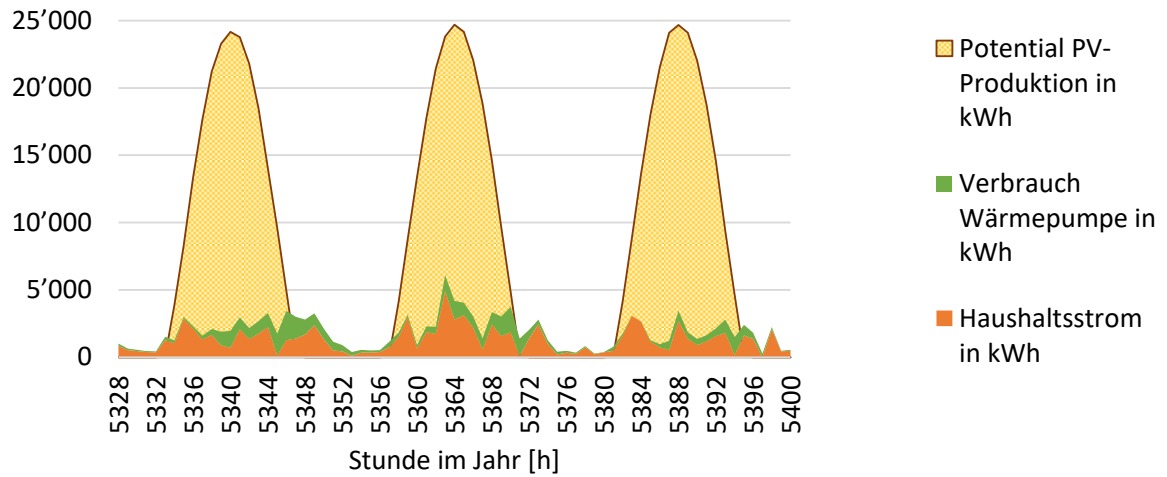


Abbildung 20: PV-Produktion und Bedarf im Quartier Hottingen für das Szenario 2.1 über drei Tage Ende Sommer..

### Hottingen, 3 extrem Sommertage, 2050, oVoF

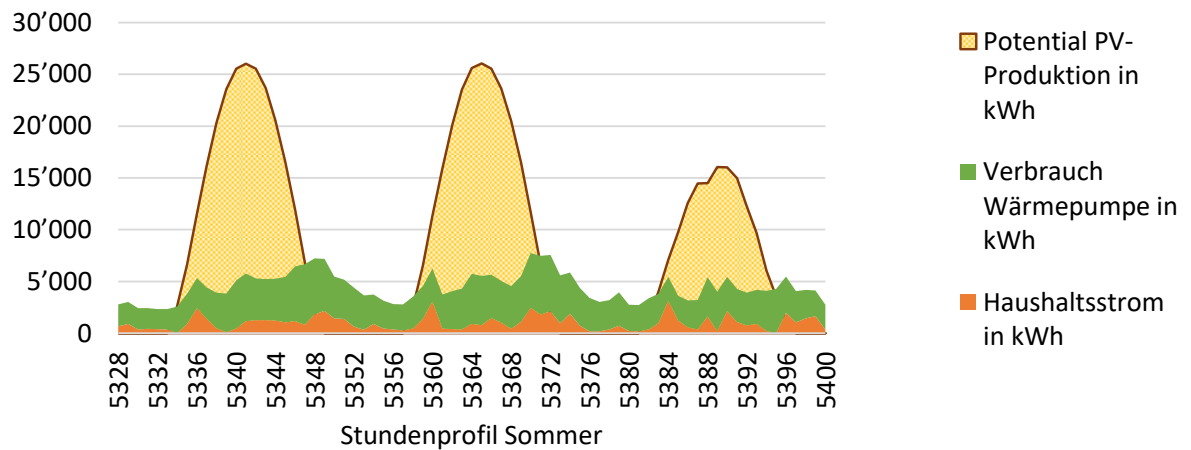


Abbildung 21: PV-Produktion und Bedarf im Quartier Hottingen für das Szenario 5.2 über drei Tage im Sommer.



## 4.3 Ergebnisse Erdwärmesonden

### 4.3.1 Auskühlung am Beispiel Binz

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 22 wird dieser Nachbareffekt für jede Parzelle, resp. jedes referenzierte Gebäude, und für das regelmässige umgebende Raster im Quartier Binz dargestellt. Die Farbskala gibt die Auskühlung nach 50 Betriebsjahren mit dem mittleren Wärmebedarf (2035) wieder. Dabei wird lediglich der "Nachbareffekt", aber noch nicht der auskühlende Effekt einer Einzelanlage auf sich selber, wiedergegeben. Die Auskühlung der jeweiligen Anlage ohne nachbarschaftliche Beeinflussung müsste bei einer Auslegung der EWS zur Nachbar-Auskühlung dazugezählt werden.

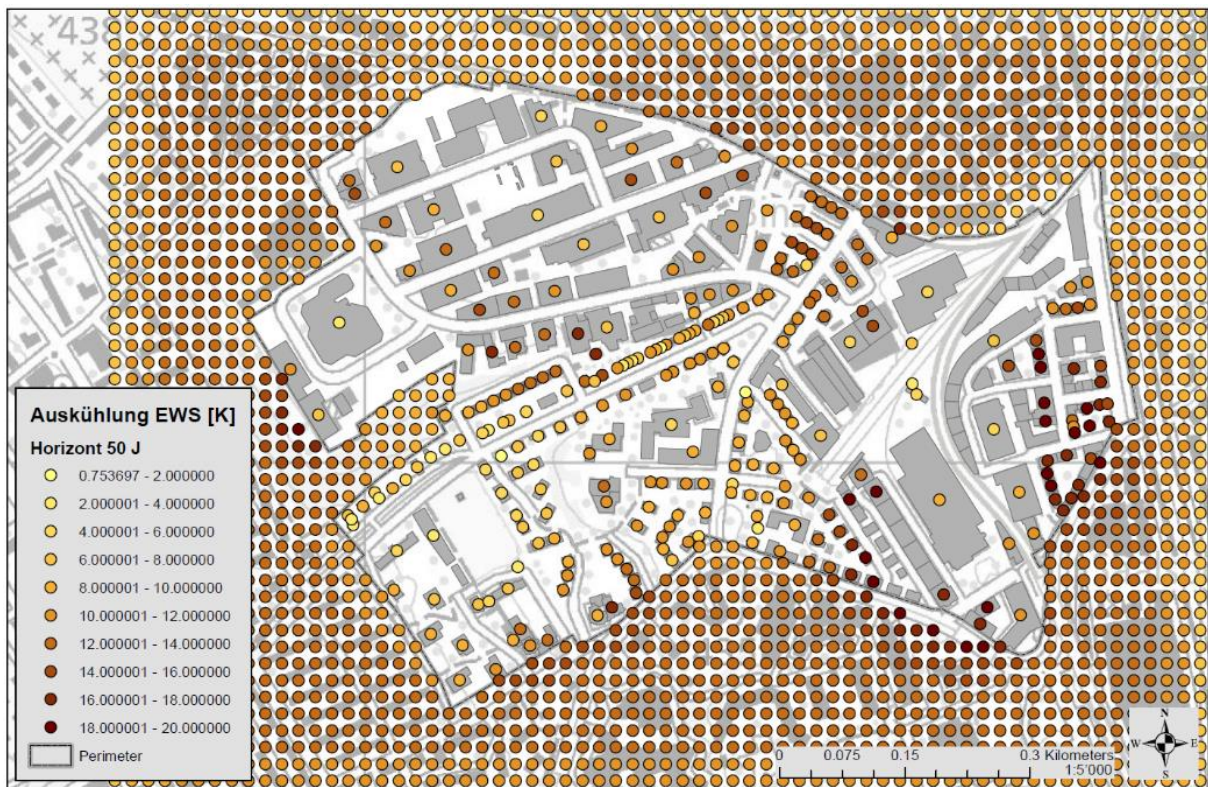


Abbildung 22: Binz: Nachbareffekt nach 50 Jahren unter der Annahme, dass alle Gebäude mit EWS beheizt werden.

In Abbildung 23 wird die Verteilung dieser Nachbareffekte nach 50 Betriebsjahren dargestellt, sowohl für den aktuellen Wärmebedarf als auch für den prädiktierten Wärmebedarf von 2050. Auch hier wird lediglich die Auskühlung durch Nachbarsonden gezeigt. Die Langzeitauskühlung, welche durch den normalen Betrieb einer Sonde (auf sich selbst) entsteht, muss für die Betrachtung einer einzelnen Sonde noch dazugezählt werden.



Dabei wird deutlich, dass die meisten Anlagen bei einer vollen Deckung des Wärmebedarfs über Erdwärmesonden eine nachbarschaftliche Auskühlung von mehr als 5 K erfahren würden. Ab 5 K Auskühlung wird nach SIA384/6<sup>2</sup> eine Regeneration vorgeschrieben, und im Bereich von 1-5 K muss die nachbarschaftliche Beeinflussung berücksichtigt werden (längere Auslegung der Sonden oder Regeneration).

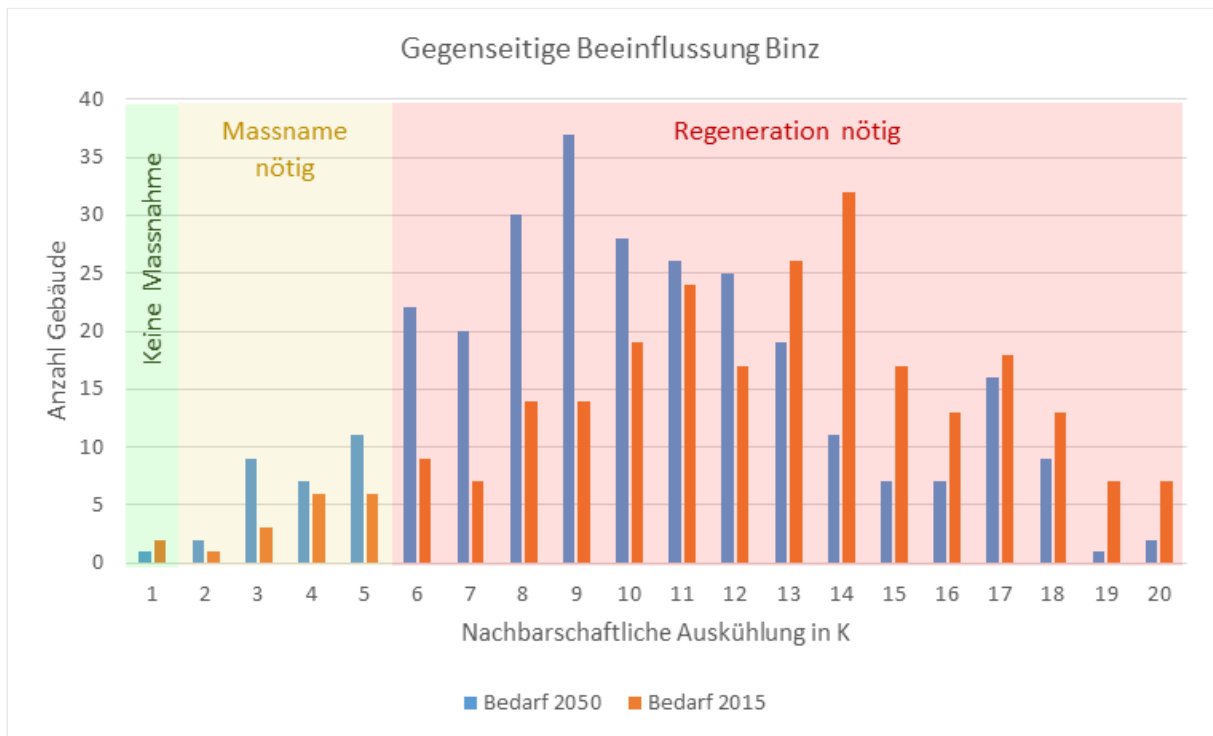


Abbildung 23: Verteilung des nachbarschaftlichen Einflusses im Untersuchungsgebiet Binz nach 50 Betriebsjahren unter der Annahme, dass der gesamte Bedarf durch Erdwärmesonden gedeckt wird.

#### 4.3.2 Effekt von Regeneration durch aktive Kühlung

Wie in den Potenzialanalysen gezeigt wurde, sind älteren Gebäude mit beschränktem Kühlbedarf in den Quartieren dominant. Selbst wenn das Szenario mit maximalem Kühlbedarf (2050 ohne Verschattung und ohne Fensterlüftung) angenommen wird, wird nur ein durchschnittlicher Regenerationsgrad in der Grössenordnung von 20 % erreicht. In Abbildung 24 wird gezeigt, wie sich die Verteilung der gegenseitigen Beeinflussung durch Regeneration mit Kühlung (maximales Szenario) für das Quartier Binz verringert. Dabei wird deutlich, dass eine Regeneration durch aktive Gebäudekühlung das Problem der gegenseitigen Beeinflussung nicht massgeblich verringert. Bei einem Grossteil der Objekte würde die nachbarschaftliche Auskühlung immer noch deutlich über 5 K liegen.

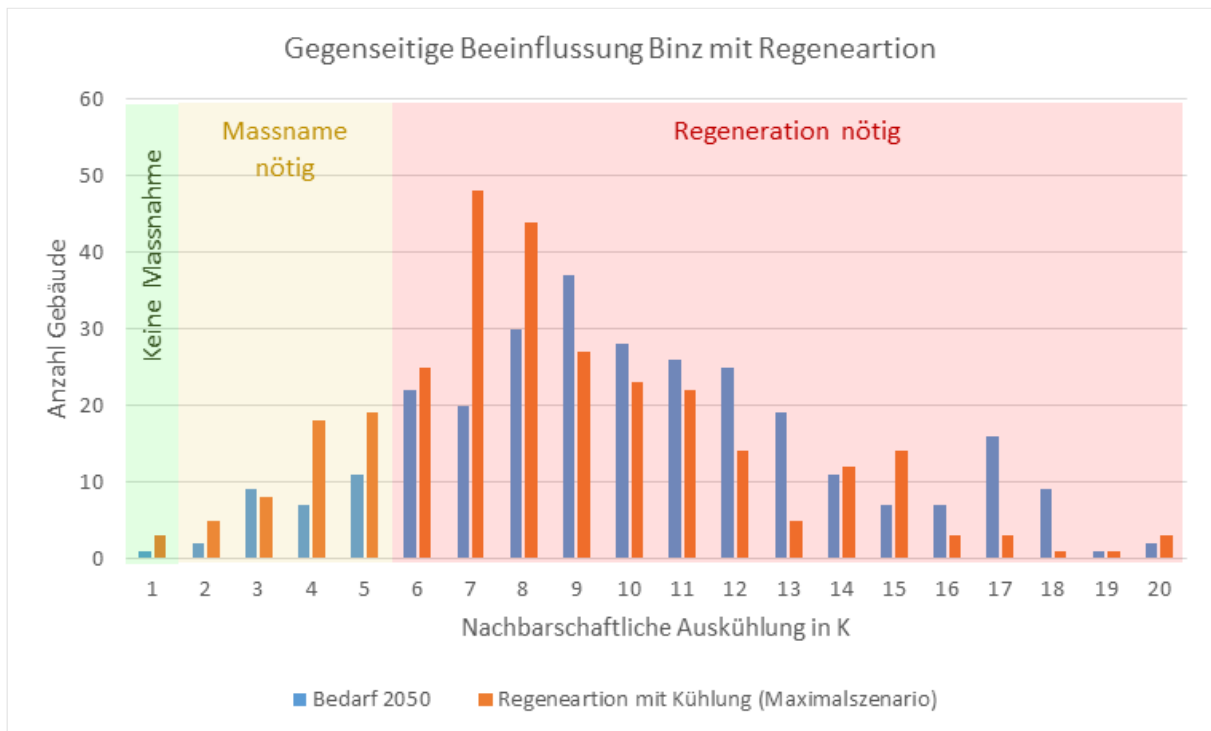


Abbildung 24: Verteilung der nachbarschaftlichen Beeinflussung im Untersuchungsgebiet Binz ohne Regeneration (blau) und mit Regeneration (orange) durch Gebäudekühlung (maximales Szenario 2050 ohne Verschattung, ohne Fensterlüftung).

## 5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse

### 5.1 Diskussion Heiz- und Kühlbedarf

Anhand von thermischen Gebäudesimulationen wurde der jährliche Kühl- und Heizbedarf von Wohnbauten in Abhängigkeit vom Gebäudetyp, von den Klimadaten und von den integrierten sommerlichen Wärmeschutzmassnahmen untersucht. Die bisherigen Ergebnisse zeigen folgende Hauptmerkmale

- Bei Alt- und Bestandsbauten ist der jährliche Kühlbedarf max. ca. 20% des Heizbedarfs, auch für den extremen Fall ohne Wärmeschutzmassnahmen. Für bestehende Quartiere ist daher mit einem weit grösseren Heizbedarf als Kühlbedarf zu rechnen.
- Im Fall der Neubauten ist es möglich, in einzelnen Szenarien mit reduzierten Wärmeschutzmassnahmen einen mit dem Wärmebedarf vergleichbaren Kühlbedarf zu erhalten. Aus diesem Grund werden sich die weiteren Untersuchungen auf Neubauten fokussieren.
- Bei gleichem Temperatursollwert haben die unterschiedlichen Kühlabgabesysteme einen geringen Einfluss auf den jährlichen Kühlbedarf. Dies deshalb, weil ein beschränktes Wärmeübertragungsvermögen zu höheren Raumtemperaturen und damit wieder ähnlicher absoluter Wärmeentzugsleistung führt. Letztendlich fällt also in erster Linie die Raumtemperatur und damit die räumliche Behaglichkeit je nach



Kühlabgabesystem unterschiedlich aus. Wegen der breiten Anwendung in der Praxis wird das Bodensystem mit «Vorkühlung und Entfeuchtung der Aussenluft» in weiteren Simulationsmodellen verwendet.

- Bei einer Kühlung ausschliesslich mit der Zuluft kommt es bei einigen Szenarien zu einer hohen Anzahl an Überhitzungsstunden und somit zu einer Reduktion des Komforts. Die verwendete minimale Zulufttemperatur von 16 °C (nach SIA 382/1:2014) liegt zum Teil sehr deutlich unter der Raumtemperatur, was ebenfalls zu einer Verminderung des Komforts durch Zuglufterscheinungen führen kann.

Anhand von bisherigen Ergebnissen werden weitere Simulationsszenarien definiert, die auch bezüglich Kosten analysiert werden. Die geplanten weiteren Simulationsszenarien sind in

**Interne Lasten**

Abbildung 25 dargestellt. Die Forschung wird sich auf die vier Simulationsmodelle der Neubauten mit und ohne Lüftungsanlage konzentrieren. Zudem werden die unterschiedlichen internen Lasten (definiert gemäss SIA Merkblatt 2024:2015) und Klimaszenarien («Meteonorm Aktuell» und «Meteonorm 2050 RCP 4.5») berücksichtigt, um die Sensitivität der Ergebnisse zum Nutzerverhalten für heute und Zukunft darzustellen. Mit den gewählten Szenarien wird aufgezeigt, mit welchen Kosten die Steigerung des Regenerationsgrads verbunden ist.

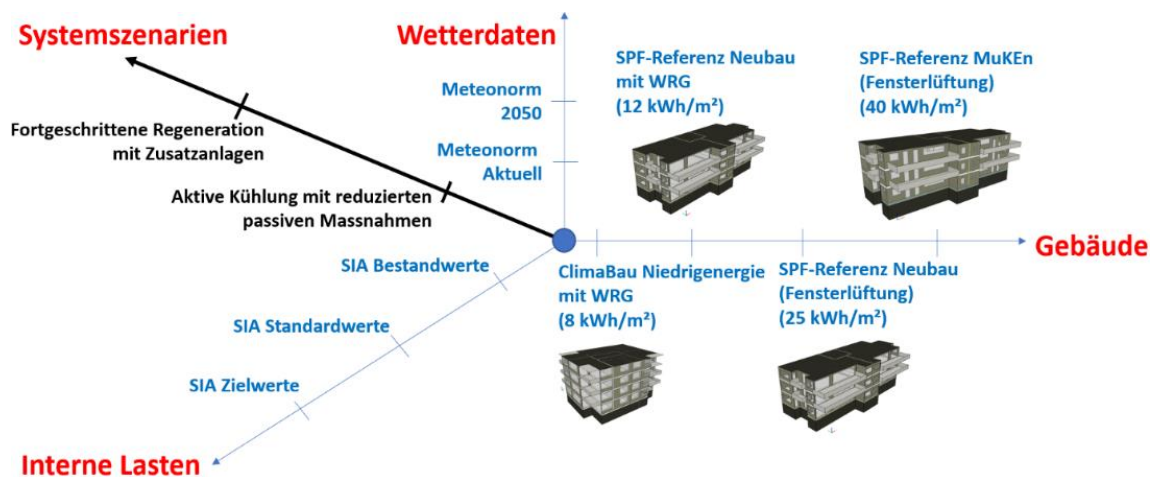


Abbildung 25: Schematische Darstellung der geplanten Simulationsszenarien

## 5.2 Diskussion PV-Potential und Strombedarf

Die vorläufige Auswertung zeigt, dass sich der Ansatz zur Erhebung des PV-Potentials gestützt auf die vorhandenen Geodatenbanken, als geeignet erweist. Das erarbeitete Model klassifiziert die Dachflächen nach Orientierung und Neigung und weist den jeweiligen Dachflächen, gestützt auf dynamische Polysun-Simulationen, Produktionswerte auf Stundenwertbasis zu. Eine gewisse Unsicherheit bei der Potentialauswertung zeigt sich bei der Effizienz der eingesetzten PV-Anlagen, besonders für den Horizont bis 2050. In der Projektausarbeitung wurde von einem heute erhältlichen guten Modul mit einem Wirkungsgrad von 19.2 % ausgegangen.



In der momentanen Auswertung wurden sämtliche gut bis sehr gut geeigneten Dachflächen entsprechende PV-Installationen zugewiesen. Vorläufige Zwischenergebnisse zeigen, dass mit dieser Belegungsdichte im Quartier voraussichtlich in der Bilanz auch nach Abzug des Haushaltsstroms wesentlich mehr Strom produziert wird, als durch die Wärmepumpen zur aktiven Kühlung benötigt wird. Eine Vollbelegung sämtlicher Flächen ist vermutlich nur schwer realisierbar. Die "Studie zur Bestimmung des PV Potentials innerhalb des Zürcher Stadtgebiets"<sup>22</sup> 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. Für den Endbericht wird deswegen noch eine zusätzliche Variante ausgewertet, bei welcher in Anlehnung an die MuKE 2014 eine Installation in der Grössenordnung von 10 % der Energiebezugsfläche installiert wird. Mit der Annahme, dass in allen Gebäuden eine aktive Kälteerzeugung installiert wird, kann aber ebenfalls von einer Überschätzung des Elektrizitätsbedarfs für Gebäudekühlung ausgegangen werden. Es ist unklar, inwiefern eine aktive Gebäudekühlung durch Wärmepumpen in allen Gebäuden umgesetzt werden kann. Ferner ist zu erwähnen, dass in dieser Arbeit vom momentanen Elektrizitätsbedarf ausgegangen wird. Eine gesteigerte Nachfrage wie Bsp. durch den vermehrten Einsatz von E-Mobilität 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/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 69--79 %. Diese hohen Werte könnten durch intelligente Steuerung der Anlage oder durch Kältespeicher, welche in diesem Projekt nicht untersucht werden, zusätzlich erhöht werden.

### 5.3 Diskussion Erdwärmesonden

Die vorläufige Auswertung zeigt, dass bei einer vollständigen Umstellung auf eine EWS-Wärmeversorgung ohne Regeneration die Nachbarschaftliche Beeinflussung zu einer hohen zusätzlichen Auskühlung in realen Quartieren führt. Für einen Grossteil der Anlagen würde diese 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<sup>23</sup> wurde von einer Entzugsdichte von ca. 35 kWh/m<sup>2</sup> 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<sup>2</sup>. Wie in Tabelle 13 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 ausfällt.

Tabelle 13: Wichtigste Kennzahlen der vier untersuchten Quartiere

	<b>Binz</b>	<b>Hottingen</b>	<b>Käferholz</b>	<b>Südquartier</b>
Perimeterfläche in km <sup>2</sup>	0.50	1.17	0.11	0.90
Wohnfläche (EBF) in m <sup>2</sup>	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
<b>Bedarf / Perimeterfläche (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>60</b>	<b>28</b>

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.

Im weiteren Projektverlauf sollen zusätzlich Szenarien für einen nicht vollständigen Ersatz der Wärmeerzeugungssysteme mit EWS Wärmepumpen ausgearbeitet und ausgewertet werden. Ebenfalls ist vorgesehen, die Betrachtung auf Quartiere mit Neubaucharakter auszuweiten, wobei dazu der Gebäudepark der bestehenden Quartiere hypothetisch angepasst wird. Es soll untersucht werden, inwiefern diese Anpassungen zu einer Verringerung der Nachbarschaftlichen Auskühlung führen.



## 6 Weiteres Vorgehen

Im momentanen Stand wurden noch nicht alle Quartiere und Szenarien vollständig ausgewertet. Die bisher ausgewerteten Kombinationen werden noch mit den weiteren Untersuchungsgebieten und den entsprechenden Szenarien ergänzt. Die in der Diskussion erwähnten Punkte werden in der Ausarbeitung berücksichtigt.

Das Arbeitspaket zur Kostenbetrachtung wurde zum Zeitpunkt dieses Jahresberichtes erst begonnen, und es können noch keine Resultate publiziert werden. Ein Kostenvergleich wird unter Berücksichtigung von verschiedenen Systemen zur Wärmeabgabe im weiteren Projektverlauf ausgearbeitet.

Die Ergebnisse der Studie werden anschliessend über verschiedene Kanäle publiziert. Gemäss heutigem Stand ist vorgesehen, jeweils einen Fachartikel für das Magazin HK Gebäudetechnik sowie Phase 5 aufzuarbeiten. Die Ergebnisse sollen auch im Rahmen von BRENET als Fachreferat oder Poster präsentiert werden. Zusätzlich ist vorgesehen, die Resultate am SPF-Industrietag oder ähnlichen Veranstaltungen vorzustellen.

## 7 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. *Meteonorm*. (METEOTEST, 3012 Bern).
7. EnergieSchweiz. *Dokumentation Solardachrechner*. (2020).
8. AWE. *EnergyGIS Wärme (NRJW) Daten*. (2017).
9. BFS. GWR Basisdatensatz, Statistische Grundlagen und Übersicht, Version 4.1. (2018).
10. Stadt Zürich. Geodatenbank EV\_Stadtgebiet. (2018).





11. swisstopo. swissBUILDINGS3D 2.0. (2020).
12. 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).
13. Settembrini, G. *et al.* *ClimaBau – Planen angesichts des Klimawandels.* (Bundesamt für Energie, 2017).
14. Mojic, I. *et al.* *ImmoGap: Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern.* (Bundesamt für Energie BFE, 2018).
15. SIAMB2024: SIA Merkblatt 2024:2015 Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik. 156 (2015).
16. Molinari, D. *Statistik der Schweizer Städte.* (2021).
17. Nipkow, J. Der typische Haushalt-Stromverbrauch sinkt. 9 (2013).
18. 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).
19. Eskilson, P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. (Department of Mathematical Physics, University of Lund, 1987).
20. Eskilson, P. *Superposition Borehole Model - Manual for Computer Code.* (1986).
21. 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).
22. Albrecht-Wilder, S., Gutschner, M., Biel, T. & Remund, J. Studie zur Bestimmung des PV Potentials innerhalb des Zürcher Stadtgebiets. (2021).
23. Persdorf, P., Ruesch, F. & Haller, M. *RegenOpt Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher Beeinflussung von Erdwärmesonden: energetische und ökonomische Analysen.* (2015).



## Annex A Glossar

Heizwärme(bedarf/-verbrauch) (kWh)	<i>Dem Raum zum Heizen zugeführte thermische Energie</i>
Heizleistung (W)	<i>Dem Raum zum Heizen zugeführte thermische Leistung</i>
Wärme(bedarf/-verbrauch) Warmwasser (kWh)	<i>Thermische Energie zur Erzeugung von Warmwasser</i>
Gesamtwärme(bedarf/-verbrauch) (kWh)	<i>Heizwärme plus Warmwasser</i>
Raumkühlung (kWh)	<i>Aus dem Raum zum Kühlen abgeführte thermische Energie. Das Wort «Kälte» wird vermieden.</i>
Raumkühlungsleistung (W)	<i>Aus dem Raum zum Kühlen abgeführte thermische Leistung</i>
Elektrische Energie Wärmepumpe	<i>Elektrische Energie zum Betrieb der Wärmepumpe ohne Umwälzpumpen</i>
Geocooling	
Hilfsenergie	<i>Elektrische Energie der Umwälzpumpen, evtl noch genauer ausführen.</i>
Entzugswärme Erdreich (kWh)	<i>Thermische Energie, welche dem Erdreich durch die Wärmepumpe entzogen wird</i>
Entzugsleistung	<i>Thermische Leistung, welche dem Erdreich durch die Wärmepumpe entzogen wird</i>
Regenerationswärme Erdreich (kWh)	<i>Thermische Energie, welche dem Erdreich von der reversibel betriebenen Wärmepumpe zugeführt wird.</i>
Regenerationsleistung Erdreich (W)	<i>Thermische Leistung, welche dem Erdreich von der reversibel betriebenen Wärmepumpe zugeführt wird.</i>
Netto-Entzugsenergie Erdreich (kWh)	<i>Entzugsenergie minus Einspeiseenergie</i>



## 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

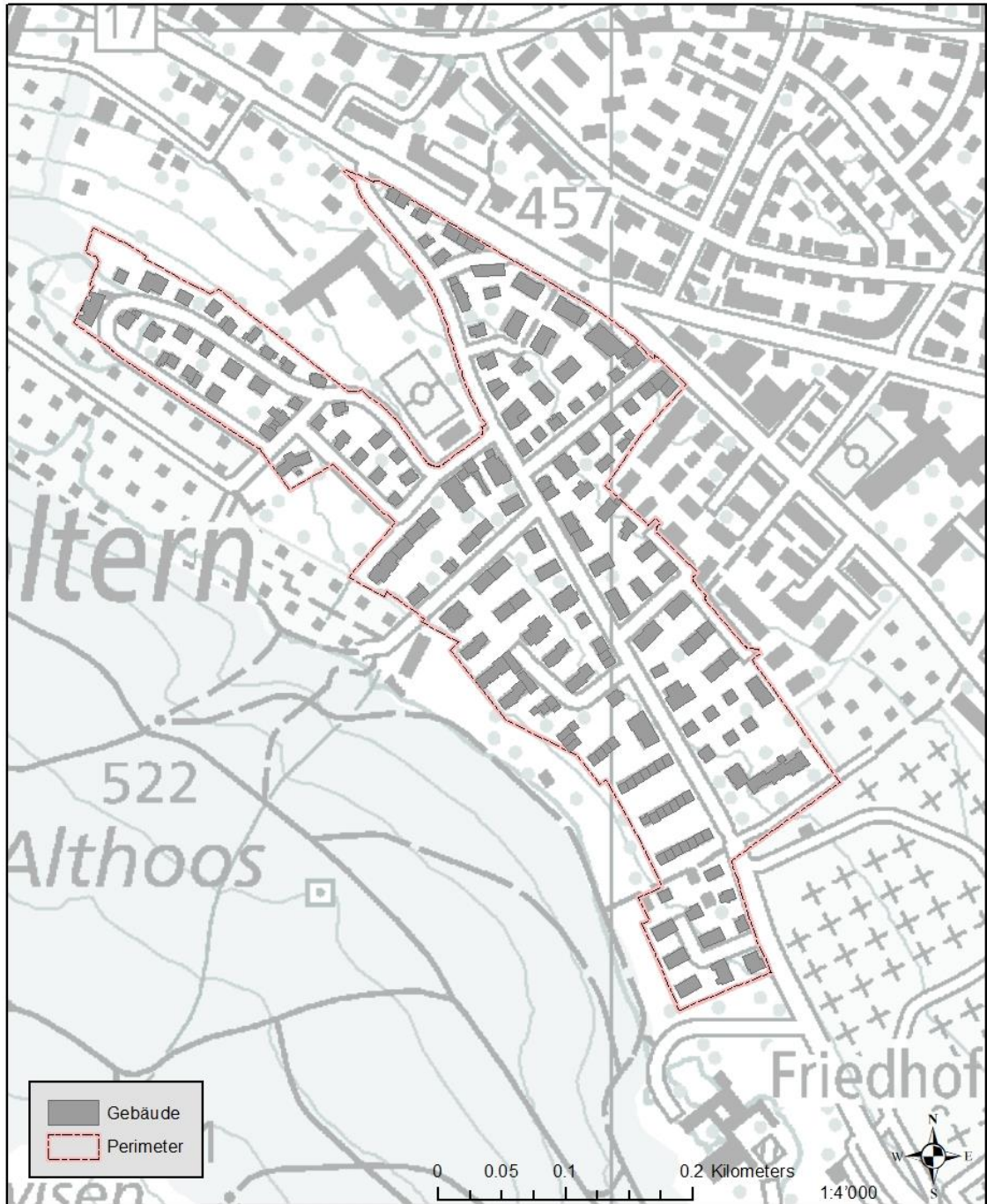


Übersichtskarte Gebiet Hottingen  
Cool2Regen GIS-Auswertung  
Datengrundlage

28.05.2021 / LF  
Institut für Solartechnik SPF  
OST - Ostschweizer Fachhochschule



### B.3 Übersicht Käferholz, Zürich

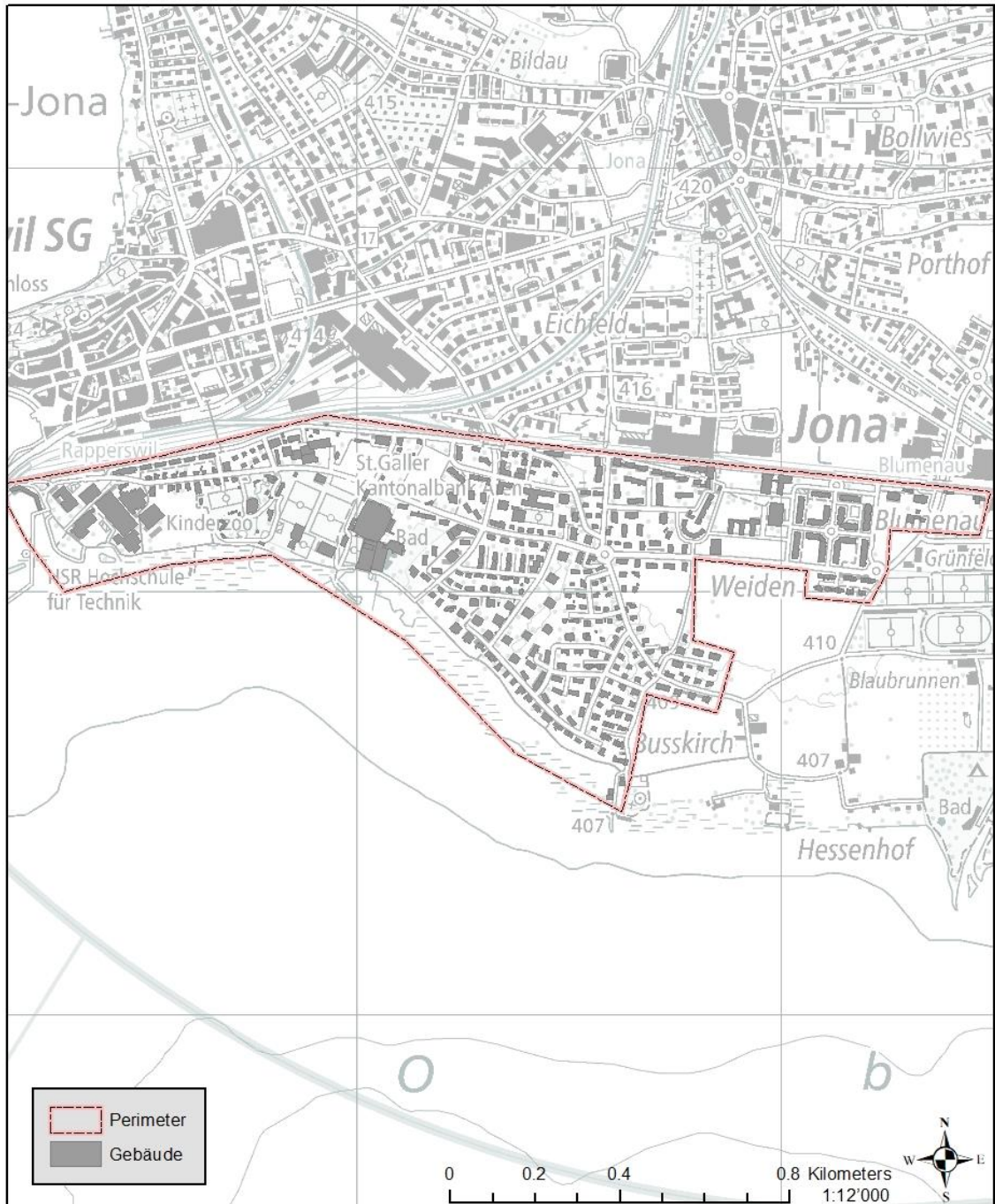


Übersichtskarte Gebiet Käferholz  
Cool2Regen GIS-Auswertung  
Datengrundlage

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 Erweiterung Semianalytisches Sondenmodell

Das Langzeitverhalten von einzelnen Erdwärmesonden und Sondenfeldern wird seit den Arbeiten von Eskilson<sup>19</sup> anhand von sogenannten g-Funktionen charakterisiert. Mit dieser Funktion kann dann die Borlochtemperatur ( $T_b$ ) berechnet werden:

$$T_b = T_m - \frac{\dot{q}}{2 \pi \lambda_{Erde}} g(Es, r_m / H) \quad (1)$$

Wobei  $T_m$  die Erdreich-Mitteltemperatur,  $\dot{q}$  die spezifische Entzugsleistung  $\lambda_{Erde}$  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 numerischen Modellen (z.B. SBM<sup>20</sup>) berechnet. Cimmino und Bernier<sup>18</sup> 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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Folgende Formel wurde von Eskilson<sup>19</sup> abgeleitet, wobei statt der über die gesamte Erdsondenlänge nur über die Länge des Quell-Abschnittes (von  $z_{up}(i_{source})$  bis  $z_{low}(i_{source})$ ) integriert wird und der Einfluss auf den Mittelpunkt der Referenzsonde  $z_{middle}$  bezogen wird.

$$gmatrix(i_{source}, i_{ref}, t) = \int_{z_{up}(i_{source})}^{z_{low}(i_{source})} \left( \frac{erfc(r_o / \sqrt{4\alpha t})}{r_o} - \frac{erfc(r_m / \sqrt{4\alpha t})}{r_m} \right) ds \quad (2)$$

$$r_m = \sqrt{r^2 + (z_{middle}(i_{ref}) + s)^2}; r_o = \sqrt{r^2 + (z_{middle}(i_{ref}) - s)^2}$$

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<sup>18</sup> vorgeschlagen) ist nicht nötig. Diese Vereinfachung führt zu einer leicht kürzeren Rechenzeit und ermöglicht es, durch einfache Trigonometrie auch geneigte Erdsonden zu berechnen.

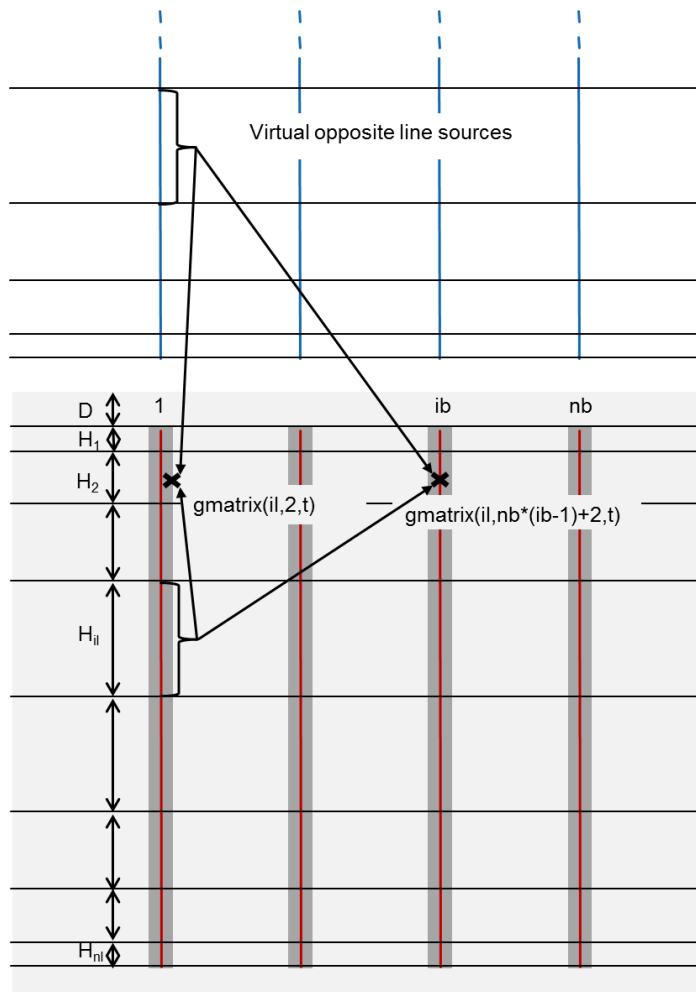


Abbildung 26 Darstellung der Abschnitt zu Abschnitt g-Funktionen welche in einer Matrix (gmatrix) gespeichert werden. Die Berechnung dieser Matrix erfolgt nach Formel (3)

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:

$$T_0 - T_{b,iref}(t_k) = \frac{1}{2\pi k} \sum_{isource=1}^{nbs} \sum_{t_p=0}^{t_k} gmatrix(i_{source}, i_{ref}, t_k - t_p) \cdot \dot{q}_{isource}(t_p) \quad (3)$$

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.

$$\sum_{isource=1}^{nb-nl} \dot{q}_{isource}(t_k) \cdot H_{ilay} = \begin{cases} nb \cdot H \cdot \tilde{q} & \text{for } t_k = 0 \\ 0 & \text{for } t_k \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

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





$$T_{b,iref}(t_k) = T_b(t_k) \quad (5)$$

Die Gleichungen 2-4 definieren ein Gleichungssystem mit  $2 \cdot nbs \cdot nt + nt$  Gleichungen und  $2 \cdot nbs \cdot nt + nt$  Variablen. Cimmino<sup>21</sup> gebraucht die Laplace-Transformation, wodurch das Konvolutionsprodukt (3) in Gleichung 6 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:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ H \cdot nb \cdot \tilde{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} gamatrix(1,1,t) & gamatrix(1,2,t) & \dots & -1 \\ gamatrix(2,1,t) & gamatrix(2,2,t) & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_1 & H_2 & \dots & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \dot{q}_{1source}(t) \\ \dot{q}_{2source}(t) \\ \dots \\ 2 \cdot \pi \cdot k \cdot (T_0 - T_b(t)) \end{pmatrix} \quad (6)$$

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 4 und 5 für jede Anlage einzeln aufgestellt werden. Die letzte Gleichung im Gleichungssystem (6) wird dann durch  $nbl$  Gleichungen (eine für jede Einzelanlage) ersetzt. Mit diesen zusätzlichen Gleichungen können nun die zusätzlichen unbekanntes (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:

$$T_o - T_b = \frac{1}{2\pi k} \sum_{i=m \cdot nl + 1 \dots m \cdot nl + nl} gamatrix(i, m \cdot nl + 1, t) * \dot{q}(i, t) \quad (7)$$

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