

Bachelor-Thesis Herbstsemester 2018

Reverse Engineering der Speicherfähigkeit des Schweizer Gebäudeparks

Verfasser:	Yao-Pin Thi
Betreuer:	Prof. Dr. Philipp Schütz Roman Durrer Andreas Melillo
Experte:	Dr. Kai Lieball
Industriepartner:	Heat4Cool, tiko Energy Solutions
Abgabedatum:	7. Januar 2019

Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	Reverse Engineering der Speicherfähigkeit des Schweizer Gebäudes
Diplomandin/Diplomand	Thi, Yao-Pin
Bachelor-Studiengang	Bachelor Maschinentechnik
Semester	HS18
Dozentin/Dozent	Schütz, Philipp
Expertin/Experte	Lieball, Kai

Abstract Deutsch

Ein Verfahren wird entwickelt, auf Grundlagen von Wetterdaten und Leistungszeitreihen von Wärmepumpen, um mittels Simulationsmodellen auf die thermischen Gebäudeeigenschaften zurückzuschliessen. Dazu wird aus dem elektrischen Verbrauch und temperaturabhängigen COP-Werten die erzeugte Wärmeleistung abgeschätzt. Durch Aufsummieren der Wärmeleistung über ein Jahr wird eine Heizleistungszeitreihe erzeugt. Anschliessend wird ein Simulationsmodell, aus einem Europäischen Forschungsprojekt, mit einem Optimierer solange angepasst bis die simulierte Heizleistungskurve mit der Geschätzten übereinstimmt. Die Simulation ist von 3 thermischen Gebäudeeigenschaften abhängig. Es werden 17 Liegenschaften in der Schweiz mit Verbrauchszeitreihen vom Jahr 2017 des Industriepartners tiko Energy Solutions untersucht. Die Liegenschaften sind mit Wärmepumpen ohne integrierte Brauchwarmwasseraufbereitung ausgestattet. Die erzielten Resultate sind vielversprechend, im Mittel beträgt die Abweichung des simulierten Gesamtwärmebedarfs weniger als 4.6 % zum geschätzten Wert und die Fläche zwischen den Heizleistungskurven ist kleiner als 0.4 % des Integrals unter der Kurve.

Abstract Englisch

In this thesis, a method is developed and validated to estimate the thermal building characteristics based on weather data, power time series of the heat pump consumption with the help of simulation models. In a first step, the heat demand is estimated based on the time series of the heat pump power consumption and estimated values for the coefficient of performance (COP). In a second step, the parameters of a simulation model, developed within a H2020 project, are refined until a good agreement between simulated and estimated cumulative heat demand curve is reached. The model depends on 3 parameters, which describe the thermal building characteristics. The industrial partner tiko Energy Solutions provided us with the power consumption time series of 17 real buildings of the year 2017. In all these buildings, the heat pump was only employed for space heating. The results are very promising: on average, the simulated annual heat demand deviated less than 4.6 % from the estimated value and the area between the cumulated heat demand deviates less than 0.4 % from the integral under the total curve.

Ort, Datum Bellach, 07.01.2019
© Yao-Pin Thi, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

Zusammenfassung

Im Schweizerischen Gebäudepark sind rund 75% der Liegenschaften vor 1980 erstellt worden. Durch die geringe Renovationsrate ist die Gebäudehülle oft dementsprechend auf dem Stand zum Zeitpunkt der Erstellung.

Um die Ziele der Energiestrategie 2050 zu erreichen, sollen sanierungswürdige Liegenschaften im Gebäudepark identifiziert werden. Hierzu wird ein Verfahren entwickelt, um auf Grundlagen von Wetterdaten und Leistungszeitreihen von Wärmepumpen mittels Simulationsmodellen auf die thermischen Gebäudeeigenschaften zurückzuschliessen.

Dazu wird aus dem elektrischen Verbrauch und temperaturabhängigen COP-Werten die erzeugte Wärmeleistung abgeschätzt. Durch Aufsummieren der Wärmeleistung über ein Jahr wird eine Heizleistungszeitreihe erzeugt. Anschliessend wird ein Simulationsmodell aus einem Europäischen Forschungsprojekt mit einem Optimierer solange angepasst bis die simulierte Heizleistungskurve mit der Geschätzten übereinstimmt. Aus der Optimierung gehen 3 Parameter hervor, die die simulierte Kurve charakterisieren und das Gebäude thermisch beschreiben.

Es werden 17 Liegenschaften in der Schweiz mit Verbrauchszeitreihen vom Jahr 2017 des Industriepartners tiko Energy Solutions untersucht. Die Liegenschaften sind mit Wärmepumpen ohne integrierte Brauchwarmwasseraufbereitung ausgestattet.

Die erzielten Resultate sind vielversprechend, im Mittel beträgt die Abweichung des simulierten Gesamtwärmebedarfs weniger als 4.6 % zum geschätzten Wert und die Fläche zwischen den Heizleistungskurven ist kleiner als 0.4 ‰ des Integrals unter der Kurve.

Abstract

To reach the goals of Swiss energy strategy 2050, it is necessary also to reduce the heat demand in the Swiss building park. As around 75 % of all building in Switzerland were built before 1980, the building envelope is mostly outdated and, therefore, causing high losses.

In this thesis, a method is developed and validated to estimate the thermal building characteristics based on weather data, power time series of the heat pump consumption with the help of simulation models.

In a first step, the heat demand is estimated based on the time series of the heat pump power consumption and estimated values for the coefficient of performance (COP). In a second step, the parameters of a simulation model, developed within a H2020 project, are refined until a good agreement between simulated and estimated cumulative heat demand curve is reached. The model depends on 3 parameters, which describe the thermal building characteristics.

The industrial partner tiko Energy Solutions provided us with the power consumption time series of 17 real buildings of the year 2017. In all these buildings, the heat pump was only employed for space heating.

The results are very promising: on average, the simulated annual heat demand deviated less than 4.6 % from the estimated value and the area between the cumulated heat demand deviates less than 0.4 ‰ from the integral under the total curve.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
1.1	Motivation	3
1.2	Stand der Forschung	3
1.3	Vorgehen	4
1.4	Zielsetzung.....	5
2	Methode	6
2.1	Datenquellen.....	6
2.1.1	Stromverbrauchszeitreihen	6
2.1.2	Metadaten	6
2.1.3	Wetterdaten.....	7
2.2	Heizsystem des Gebäudes	8
2.2.1	Wärmepumpen	8
2.2.2	Emitter	8
2.2.3	Temperaturniveaus im Heizsystem	9
2.3	Vereinfachungen für die Schätzung der erzeugten Heizleistung.....	10
2.3.1	Annahmen über den Emittertyp abhängig vom Baujahr	10
2.3.2	Vorlauf- und Quelletemperatur	10
2.3.3	Bestimmung des COP.....	10
2.3.4	Schätzung des erzeugten Wärmeleistung	12
2.3.5	Flowchart für Schätzung der erzeugten Wärmeleistung	13
2.4	Gebäudesimulation	15
2.4.1	Heizleistungszeitreihe.....	15
2.4.2	Simulationsmodell.....	16
2.4.3	Gebäudemodell.....	17
2.4.4	Optimierer.....	17
2.4.5	Durchführung der Simulation und Optimierungen.....	18
2.5	Analyse des Parameterraums Transmissionswärmetransferkoeffizient H und Gesamtenergiedurchlassfaktor g.....	18
3	Resultate.....	19
3.1	Manuelle Zuordnung der Wetterdaten Bravo zu den Gebäuden	19
3.2	Geschätzter jährlicher Heizenergiebedarf	21
3.2.1	Schätzung von Emitter und COP.....	21
3.2.2	Herausforderung Referenzwärmepumpen zu identifizieren.....	22
3.2.3	Geschätzter jährlicher spezifischer Heizenergiebedarf	23
3.3	Ergebnisse des Simulationsmodells.....	24
3.4	Analyse des Parameterraums Transmissionswärmetransferkoeffizient H und Gesamtenergiedurchlassfaktor g.....	26
3.4.1	Interpretation Resultate aus Parameterstudie	27
4	Schlussfolgerungen	28

4.1	Stärken	28
4.1.1	Gebäudesimulation mit Optimierer	28
4.1.2	Sekündliche Auflösung der Leistungsdaten	28
4.2	Schwächen	29
4.2.1	Diskrepanzen zum realen System	29
4.3	Verbesserungsmöglichkeiten	31
4.3.1	Angabe zum Emittertyp	31
4.3.2	Verwendung von einheitlichen Wetterdaten.....	31
4.3.3	Unterscheidung von Ein-Aus-Regelung und kontinuierliche Leistungsregelung.....	31
4.3.4	Unterscheidung zwischen Monovalentem und Monoenergetischer Betrieb.....	32
4.3.5	Skalierung der erzeugten Wärmeleistung für das Simulationsmodell.	32
4.4	Ausblick	33
4.5	Fazit.....	33
5	Symbolverzeichnis	34
6	Abbildungsverzeichnis	35
7	Tabellenverzeichnis.....	36
8	Danksagungen	37
9	Literaturverzeichnis.....	38

Anhänge

- A1 Metadaten
- A2 Datenblätter
- A3 Wetterstationen Bravo
- A4 Grafiken zu Heizleistungszeitreihen

1 Einleitung

1.1 Motivation

Um die Ziele der Energiestrategie 2050 zu erreichen, muss unter anderem der (Heiz-)Energiebedarf der Schweizer Gebäude gesenkt werden. Aktuell verursachen die Privathaushalte rund 27.8 % des schweizerischen Gesamtenergieverbrauchs. Davon werden 70 % für Raumwärme benötigt [1].

Im Gebäudepark der Schweiz sind in etwa 75 % der Wohnbauten vor 1980 erstellt worden. Daher entspricht die Gebäudehülle oftmals dem Stand der Technik zum Zeitpunkt der Erstellung. Neubauten zum heutigen Zeitpunkt benötigen nur noch einen Viertel der Heizenergie.

Die tiefe Renovationsrate der Schweiz von 1.5 % ist verantwortlich dafür, dass der Raumwärmebedarf nur geringfügig gesenkt wird und daher die Ziele für die Energieeinsparungen nur schwer erreicht werden können [1].

Um sanierungswürdige Liegenschaften flächendeckend zu identifizieren, ist eine der zentralen Herausforderungen die thermischen Eigenschaften der Gebäude in der Schweiz zu bestimmen.

1.2 Stand der Forschung

Im Jahr 2009 wurde durch die IEE (Intelligent Energy Europe) für 13 europäische Länder die Gebäudedatenbank TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment) angelegt. Die Gebäudedaten stammen von realen Gebäuden der jeweiligen Länder. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Wohngebäuden. Die in TABULA entwickelte nationale Gebäudetypologie wird in 4 Gebäudekategorien und 8 Baujahrklassen unterteilt. Daraus ergeben sich 32 Gebäudemodelle, die jeweils beispielhaft für eine bestimmte Bauperiode und eines bestimmten Gebäudetyps bestimmte energetische Merkmale aufweisen. Für jeden Gebäudetyp wurde ein Gebäude ausgesucht, das repräsentativ für alle Gebäude dieser Klasse steht. Die Gebäudedaten sind Richtwerte [2].

Das 2013 aus TABULA gestartete Europäische Projekt EPISCOPE (Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks) hat sich das Ziel gesetzt, den Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen von Gebäuden europaweit zu senken. Dabei werden Sanierungsstrategien für die unterschiedlichen Gebäudemodelle entwickelt [3].

Für die flächendeckende Charakterisierung ist der Ansatz verbreitet Studien von einzelnen Gebäuden auf das gesamte Land zu extrapolieren. Am CC TES wurde ein Verfahren entwickelt, um aus Wärmeverbrauchszeitreihen thermischen Eigenschaften des Gebäudes zu bestimmen und den Wärmeverbrauch zeitabhängig vorherzusagen. Basierend auf den aktuellen Witterungsdaten wird mittels eines Gebäudemodell zeitabhängig der Bedarf vorhergesagt. Dieses Modell beschreibt das Gebäude durch 3 Grössen: C als Mass für die Masse des Gebäudes, H als Mass für die Verluste und g als Mass für den solaren Faktor der Fenster.

Zum Bestimmen dieser Parameter wird das Simulationsmodell des Gebäudes/Heizsystems so lange an die Messdaten angepasst, bis Messung und Simulation des Wärmeverbrauchs so gut wie möglich zu einander passen. Dieses Verfahren wurde bisher auf Simulationsdaten und auf Messdaten aus England angewandt.

Für die Verifikation stehen Messreihen der erzeugten Wärmeleistung der Wärmepumpen zur Verfügung. Um kurzzeitige Schwankungen zu kompensieren werden nicht die Wärmebedarfszeitreihen, sondern die aufsummierte Wärmeleistung über das Jahr verglichen. Ausgehend von drei Gebäudeeigenschaften (Kapazität C , Transmissionswärmetransferkoeffizient H und Gesamtenergiedurchlassfaktor g) wird mit einem Modell die Zeitreihe der erzeugten Wärmemenge simuliert, die erforderlich ist, um das Gebäude auf der gewünschten Soll-Temperatur zu halten. Im Reverse-Engineeringprozess werden die 3 Parameter so lange angepasst bis simulierte und reale Heizleistungszeitreihe aus der Messung möglichst gut zusammenpassen. Um die Richtigkeit der Simulation zu validieren, wurden drei Referenz-Einfamilienhäuser (*SFH*) simuliert. Zuerst wurde das Gebäude «*SFH15*» betrachtet, welches für Einfamilienhaus (englisch «*Single-Family-House*») mit 15 kWh/a/m^2 Energiebedarf am Standort Strassburg steht. Das *SFH15*-Modell entspricht einem Minergie-P-Gebäude. Des Weiteren wurden Simulationen mit dem «*SFH45*»-Modell, ein konventionelles, modernes Haus, und mit «*SFH100*»-Modell, ein sanierter Altbau zur Validierung durchgeführt [4].

1.3 Vorgehen

In dieser Arbeit soll das bestehende Verfahren erweitert werden und auf realen Messdaten aus der Schweiz angewendet werden. Dazu soll mit den verfügbaren Metadaten aus den Stromverbrauchzeitreihen unter geeigneten Vereinfachungen, zunächst die Leistungszahl (englisch: *Coefficient of Performance* (COP)) und danach die erzeugte Wärmeleistung der Wärmepumpe geschätzt werden.

In einem weiteren Schritt wird die erzeugte Wärmeleistung über das Jahr aufsummiert, so dass eine kumulierte Heizleistungszeitreihe entsteht.

In einer nächsten Phase wird unter Anwendung einer bereits vorhandenen Gebäudesimulation versucht auf die thermischen Gebäudeeigenschaften zurückzuschliessen. Eine zentrale Herausforderung hier war sinnvolle Startparameter zu definieren und passende Wetterdaten vorzubereiten. In dem Verfahren wird ein Optimierungsalgorithmus nach dem Nelder-Mead-Verfahren (auch Downhill-Simplex-Verfahren) eingesetzt, um geeignetere Parameter zu finden. Das Gebäudemodell ist darum bestrebt die simulierte Heizleistungszeitreihe für zu bestimmende Gebäudeparameter Kapazität C , Transmissionswärmetransferkoeffizient H und Gesamtenergiedurchlassfaktor g (siehe Kapitel 2.4.3) mit den aus den Messdaten geschätzten Heizleistungszeitreihe zu fitten. Die Gebäudesimulation werden mit unterschiedlichen Startparameter durchgeführt und danach nach der L^2 -Norm bewertet.

Die Datenverarbeitung wird in der Programmiersprache Python durchgeführt.

1.4 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, das bestehende Verfahren so zu erweitern, dass aus dem elektrischen Verbrauch der Wärmepumpe und Wetterdaten auf die thermischen Gebäudeeigenschaften zurückgeschlossen werden kann und der zukünftige Wärmebedarf verlässlich aufgrund von Wettervorhersagen vorhergesagt werden kann.

Es sollen des Weiteren Stärken und Schwächen dieses Verfahren für zukünftige Arbeiten untersucht werden.

2 Methode

2.1 Datenquellen

2.1.1 Stromverbrauchszeitreihen

Basis dieser Arbeit bilden 17 Datensätze über die Wärmepumpenverbrauchszeitreihen unterschiedlicher Liegenschaften im Jahr 2017. Bereitgestellt wurden die Datensätze vom Industriepartner tiko Energy Solutions. Die 17 Datensätze sind allesamt aufgezeichnet von Wärmepumpen ohne Brauchwarmwasseraufbereitung, d. h. die Wärmeleistung der Wärmepumpe wird nur für die Raumerwärmung genutzt. Die Datensätze bestehen aus Messreihen des elektrischen Verbrauchs der Wärmepumpe in Sekundenauflösung. Jedes Gebäude bzw. jeder Datensatz wird mit einer spezifischen ID-Nummer gekennzeichnet.

2.1.2 Metadaten

In den Metadaten der Gebäude sind spezifische Angaben zu den Liegenschaften vorhanden. Bekannt sind die jeweiligen Standorte der Liegenschaften mit geographischen Koordinaten und Postleitzahl (**Aus datenschutzrechtlichen Gründen wurde auf eine explizite Nennung des Standorts verzichtet**). Ausserdem sind Bau- wie auch, wenn durchgeführt und kommuniziert, Renovationsjahr (siehe Tabelle 1) aufgeführt.

Informationen zum Heizsystem sind bedingt vorhanden. Kenntnisse des Wärmepumpentyp, und ob Luft-Wasser, Sole-Wasser oder Wasser-Wasser sind vorhanden (siehe Tabelle 1). Jedoch fehlen pauschal explizite Angaben zum Wärmepumpenmodell und Emittertyp. Auch ist unklar ob die Wärmepumpe Monovalenten, Monoenergetisch (mit elektrischer Zusatzheizung) oder Bivalent (mit Ergänzungsheizung) betrieben wird.

Weitere Informationen der Liegenschaft sind Wohnfläche und ob die Liegenschaft den Minergievorgaben entspricht (siehe Tabelle 1). Weitere irrelevante Angaben befinden sich im Anhang A1.

Die tiko-Gebäude sind über die ganze Deutschschweiz verteilt.

Tabelle 1: Ausschnitt aus den zur Verfügung stehenden Meta-Daten

ID	Baujahr	Renovationsjahr	Wohnfläche [m ²]	Wärmepumpentyp	Minergie
1	2009	-	160	Luft-Wasser	Nein
2	1985	2017	165	Sole-Wasser	Nein
3	1999	-	160	Sole-Wasser	Nein
4	1951	1987	104	Luft-Wasser	Nein
5	2004	-	170	Luft-Wasser	Ja
6	1964	-	168	Luft-Wasser	k. A.
7	1998	-	130	Luft-Wasser	Nein
8	2006	-	976	Luft-Wasser	Ja
9	1982	2008	220	Luft-Wasser	Nein
10	1979	2012	k. A.	Luft-Wasser	Nein
11	2006	-	230	Sole-Wasser	Nein
12	1964	2005	180	Sole-Wasser	Nein
13	2009	-	120	Wasser-Wasser	Ja
14	2008	-	380	Sole-Wasser	Ja
15	1954	2012	220	Sole-Wasser	Nein
16	1984	-	200	Luft-Wasser	Nein
17	1928	2003	200	Sole-Wasser	Nein

2.1.3 Wetterdaten

In dieser Arbeit werden Wettermessdaten von MeteoSuisse genutzt. Konkret werden zwei unterschiedliche Wetterdatenquellen verwendet: Zu einem, Zeitreihen der Aussentemperatur von MeteoSuisse in 10-minütlichen Auflösung. Dazu werden für jedes Gebäude diejenigen Wetterdaten des Jahres 2017 abgegriffen, deren Messstation am nächsten am Gebäude liegt. Fehlende Datenpunkte werden automatisch linear interpoliert.

Zum anderen stehen 46 Datensätze von verschiedenen Wetterstationen mit Temperatur- und Solarstrahlungszeitreihen für die Gebäudesimulation zur Verfügung. Dabei sind die Datenpunkte jeweils in 60 Minuten Abstand registriert. Auch diese Datensätze werden mittels Koordinaten den jeweiligen Gebäuden zugeordnet. Aus dem Wetterdatensatz sind die Gemeindennamen der jeweils nächstliegenden Wetterstation bekannt. Aus den Gemeindennamen werden die geographischen Koordinaten eruiert (siehe Anhang A3). Fehlende Datenpunkte werden manuell mit realistischen Werten ergänzt. Um die Plausibilität zwischen Messdaten und nicht-vorhandene Messdaten beim Gebäude abzuschätzen, wird die Distanz zwischen der Messstationsgemeinde und der Gemeinde des zu untersuchenden Gebäudes bestimmt.

Zur Differenzierung der Wetterdatensätze werden in dieser Arbeit die Datensätze ohne Solarstrahlungsdaten «Wetterdatensatz Alpha» genannt und jene mit Solarstrahlungsdaten «Wetterdatensatz Bravo».

2.2 Heizsystem des Gebäudes

Obwohl die Heizsysteme der 17 Liegenschaften sich unterscheiden, entsprechen sich trotzdem mehrere Aspekte: In allen Gebäuden werden Wärmepumpen für die Raumheizung ohne Brauchwarmwasseraufbereitung eingesetzt, sodass die von der Wärmepumpe erzeugte Wärmeleistung ausschliesslich zur Raumerwärmung genutzt wird.

Die Wärmepumpen sind meistens über eine kostengünstige Ein-Aus-Regelung (mit konstanter Drehzahl) geregelt. Moderne Anlagen verfügen über eine kontinuierliche Leistungsregelung (mit variabler Drehzahl) der Wärmepumpe.

Bei steigender Umgebungstemperatur sinkt die benötigte Heizenergie. Die Heizenergie Q_H ist abhängig von der Vorlauftemperatur T_{VL} und der umlaufenden Wassermasse m im Heizsystem (siehe Formel 2-1). Auf Grund dessen ändert sich in einem realen System der Massenstrom bei konstanter Vorlauftemperatur, oder umgekehrt die Vorlauftemperatur bei konstantem Massenstrom. Die Vorlauftemperatur kann, bei konstanter Senktemperatur der Wärmepumpe, durch Beimischsysteme gesenkt werden [5].

$$Q_H \sim m * T_{VL} \quad (2-1)$$

Es haben sich nachfolgende zwei Regelungen für die Heizenergie etabliert.

- Regelung nach der Raumtemperatur (konstante Vorlauftemperatur)
- Regelung nach der Vorlauftemperatur (konstante Wassermenge)

Die Regelung nach der Vorlauftemperatur ist einfachste und kostengünstigste Variante [5].

Die Abhängigkeit zwischen Vorlauftemperatur und Umgebungstemperatur bei konstanter Umlaufmenge beschreibt die Heizkurve. Zudem ist in vielen Heizungssteuerungen eine Nachtabsenkung implementiert [5].

2.2.1 Wärmepumpen

Die Wärmepumpen lassen sich je nach Wärmequelle (jeweils in Klammern genannt) in Kategorien unterteilen:

- Luft-Wasser-Wärmepumpe (Umgebungsluft)
- Sole-Wasser-Wärmepumpe (Erdreich)
- Wasser-Wasser-Wärmepumpe (Fluss-, See- oder Grundwasser)

Die Wärmesenke bildet die Raumheizung mit dem Arbeitsmedium Wasser.

Wärmepumpen können Monovalenten (die Wärmepumpe deckt 100 % des Wärmebedarfs), Monoenergetisch (Wärmepumpe mit elektrischer Zusatzheizung) oder Bivalent (mit Ergänzungsheizung (Holz-, Gas- oder Ölkessel)) betrieben werden [6].

2.2.2 Emittter

Es wird in der Kategorie Emittter zwischen Radiator- und Flächenheizungen unterschieden. Zu den Flächenheizungen zählen Decken-, Wand- sowie Fussbodenheizungen.

2.2.3 Temperaturniveaus im Heizsystem

Das gesamte Heizsystem (ohne Beimischsystem (siehe Kapitel 2.2)) lassen sich 3 Systemgrenzen bilden (siehe Abbildung 1). Bei einem Heizsystem mit Luft-Wasser-Wärmepumpe entfällt die Systemgrenze SG_{Quelle} (rot) entfällt. Im Quellensystem fördert eine Umlaufpumpe das Arbeitsmedium (hier Sole oder Wasser). Das Arbeitsmedium erwärmt sich im Erdreich bzw. Gewässer und gibt die Wärmeleistung im Verdampfer der Wärmepumpe ab.

Die Systemgrenze SG_{WP} (blau) bildet die Grenze um die Wärmepumpe, dabei verdampft das Kältemittel im Verdampfer und gibt die erzeugte Wärmeleistung durch Kondensieren im Kondensator an das Medium der Raumheizung ab.

Die Heizung in der Systemgrenze SG_{Heizung} (grün) verteilt mit einer Umwälzpumpe die gelieferte Wärme über verschiedene Heizkörper im Gebäude.

Im vereinfachten Heizsystem ist die Senkentemperatur der Wärmepumpe der Vorlauftemperatur T_{VL} des Heizsystems gleichzusetzen. Die Vorlauftemperatur einer Radiatorheizung ist im Allgemeinen durch die geringere Übertragungsfläche höher als bei Flächenheizung.

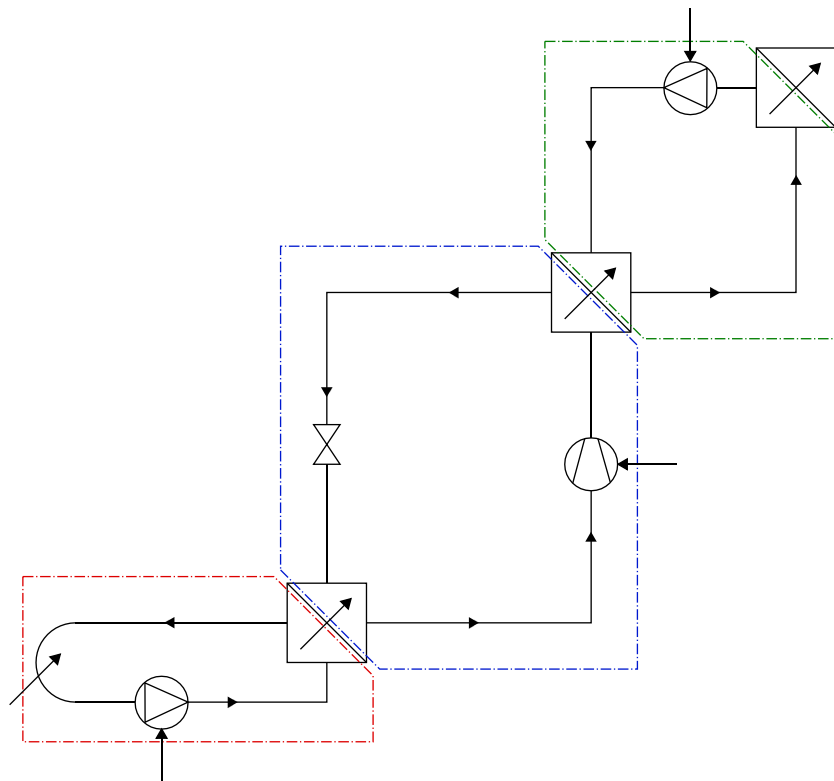


Abbildung 1: Schematische Darstellung des vereinfachten Gesamtheizsystems. Zur Bilanzierung sind 3 unterschiedliche Systemgrenzen eingezeichnet.

2.3 Vereinfachungen für die Schätzung der erzeugten Heizleistung

2.3.1 Annahmen über den Emittertyp abhängig vom Baujahr

Da meist keine Angabe zum Emittertyp im Gebäude gibt, wird dieser abhängig vom Baujahr ergänzt. Es wird eine Abgrenzung gemacht. Bis und mit Baujahr 1970 sind Radiatorheizungen installiert und ab Baujahr 1990 Fussbodenheizungen. Zwischen den 70er und 90er Jahren wird der Übergangsbereich zwischen Radiator und Fussbodenheizung angenommen.

Das Renovationsjahr hat keinen Einfluss auf den Emittertyp, da davon ausgegangen wird, dass das Emittersystem nicht verändert wurde.

2.3.2 Vorlauf- und Quelletemperatur

Da keine Informationen zu den Temperaturen im Heizsystem vorhanden sind, wird eine konstante Vorlauftemperatur angenommen, d. h. alle Gebäude verfügen über eine Regelung nach Raumtemperatur (siehe Kapitel 2.2). Die Vorlauftemperatur wird bei Flächenheizungen nach SIA 380/1 auf 35°C definiert. Bei Radiatorheizungen wird eine Vorlauftemperatur von 55°C angenommen.

Die Quellentemperatur für Luft-Wasser-Wärmepumpen ist mit der Umgebungstemperatur gleichzusetzen.

Bei Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen bleibt die Quellentemperatur im Gegensatz zu einer Luft-Wasser-Wärmepumpen über das Jahr relativ konstant. Deshalb wird die Quellentemperatur als konstant angenommen.

2.3.3 Bestimmung des COP

Für Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen ist die Abschätzung der Leistungszahl mit den getroffenen Vereinfachungen der Senken- und Quellentemperatur nach Kapitel 2.3.2 während des Jahres konstant.

Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen gestaltet sich die Bestimmung der Leistungszahl deutlich schwieriger. Die Formel 2-2 dient zur Berechnung der Leistungszahl. Diese hängt von der Kondensationstemperatur T_K , der Verdampfungstemperatur T_V des Kältemittels sowohl dem Gütegrad ζ_{WP} ab. In der Praxis werden für den Gütegrad Werte von 0.35 bis 0.5 erreicht [8].

Der COP steigt mit steigender Umgebungstemperatur T_U , da der Temperaturhub ΔT_{HUB} kleiner wird.

$$COP = \zeta_{WP} \frac{T_K}{T_K(T_{VL}) - T_V(T_U)} = \zeta_{WP} \frac{T_K}{\Delta T_{HUB}(T_{VL}, T_U)} \quad (2-2)$$

Ausserdem ist eine Berechnung der Leistungszahl ebenfalls schwierig, denn bei einer realen Wärmepumpe steigt bei steigender Umgebungstemperatur das Temperaturgefälle über den Wärmetauscher von Verdampfer und Kondensator [9].

Ohne explizite Messwerte der Anlagen werden zur COP-Bestimmung Datenblätter (siehe Anhang A2) von Wärmepumpenherstellern als Hilfe beigezogen. Die Herstellerangaben erlauben es realistische Referenzwerte aus den verschiedenen Betriebspunkten zu entnehmen. Die Betriebspunkt gelten bei der jeweils angegebenen Senken- und Quelletemperatur.

Ein wesentlicher Vorteil ist, dass nun keine wärmepumpeninternen Temperaturangaben von Verdampfer und Kondensator benötigt werden. Ebenfalls muss das Temperaturgefälle über den Wärmeübertragern von Verdampfer und Kondensator nicht berücksichtigt werden.

Zwischen den Betriebspunkten der Herstellerangaben werden die COP-Werte linear interpoliert.

Für Sole-Wasser-Wärmepumpen und Wasser-Wasser-Wärmepumpen werden als Referenz die typischen Betriebspunkte zur Auslegung gewählt.

Für Wasser-Wasser-Wärmepumpen als Referenz der Betriebspunkt W10W35 bzw. W10W55 für die COP Bestimmung genommen. Für Sole-Wasser-Wärmepumpen gilt der Betriebspunkt B0W35 bzw. B0W55.

Als Referenz bei Luft-Wasser-Wärmepumpen werden die Herstellerangaben zu Hoval Belaria SRM 4 bis SRM 16 (Modelle mit unterschiedlichen elektrischen Spitzenlasten) verwendet. Bei Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen werden Daten der Hoval Thermalia comfort 6 bis 17 eingesetzt. Alle betrachteten Hoval Wärmepumpen verfügen über eine Ein-Aus-Regelung.

Das Hoval-Wärmepumpenmodell wird für jedes Gebäude anhand des maximalen elektrischen Verbrauchs aus den Stromverbrauchszeitreihen bestimmt.

Eine Absenkung des COP in Folge der Ein-Aus-Taktung im Teillastbetrieb nach EN14825 muss auf Grund der sekundlich vorliegenden Verbrauchszeitreihen nicht berücksichtigt werden.

2.3.4 Schätzung des erzeugten Wärmeleistung

Aus den Stromverbrauchszeitreihen der Wärmepumpe soll auf den erzeugte Wärmestrom $\dot{Q}$ zurückgeschlossen werden. Dazu wird in Formel 2-3 die elektrische Leistung P_{el} zum Zeitpunkt t mit dem $COP(t)$ multipliziert (durch die Zeitabhängigkeit der Umgebungstemperatur ist auch der COP implizit zeitabhängig). Daraus ergibt sich eine Wärmebedarfszeitreihen wie in Abbildung 2 (rot).

$$\dot{Q}(t) = P_{el}(t) * COP(t) \quad (2-3)$$

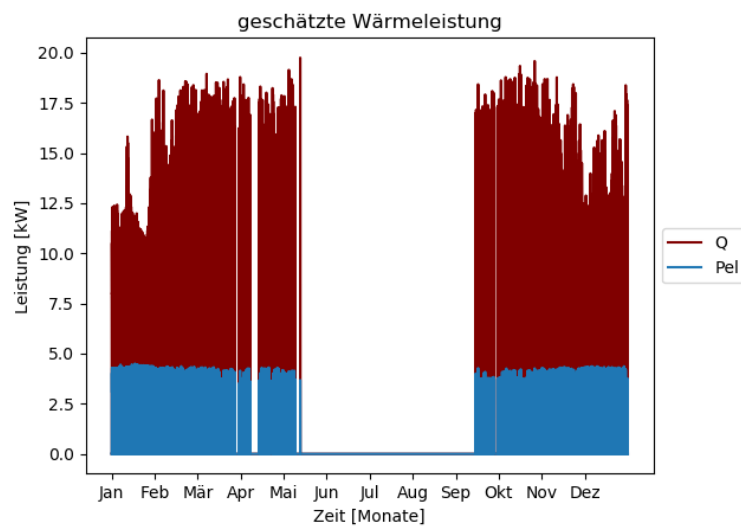


Abbildung 2: geschätzter Wärmestrom aus der elektrischen Leistung

2.3.5 Flowchart für Schätzung der erzeugten Wärmeleistung

Um den Prozess zur Schätzung des erzeugten Wärmestrom $\dot{Q}$ für Luft-Wasser-Wärmepumpen zu verstehen, wird zusätzlich der Prozess in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst und in Abbildung 3 visuell dargestellt.

Für die Schätzung des erzeugten Wärmestrom $\dot{Q}$ wird zunächst aus den Breiten- und Längengraden auf die Temperaturdaten der nächstgelegenen Wetterstation aus dem Wetterdatensatz Alpha (siehe Kapitel 2.1.3) zurückgegriffen. Anhand des Baujahrs der Liegenschaft wird der Emittertyp geschätzt (siehe Kapitel 2.3.1). Aus dem Heizungstyp wird die konstante Vorlauftemperatur bestimmt (siehe Kapitel 2.3.2). Aus dem maximalen Eintrag in den Verbrauchszeitreihen wird die passende Referenz Wärmepumpe (siehe Kapitel 2.3.3) bestimmt.

Danach kann der COP zum Zeitpunkt t mit den Wetterdaten, der Vorlauftemperatur und den COP-Werten von der Referenzwärmepumpe bestimmt werden.

Der erzeugte Wärmestrom $\dot{Q}(t)$ ergibt aus der Multiplikation der elektrischen Leistung $P_{el}(t)$ und dem $COP(t)$.

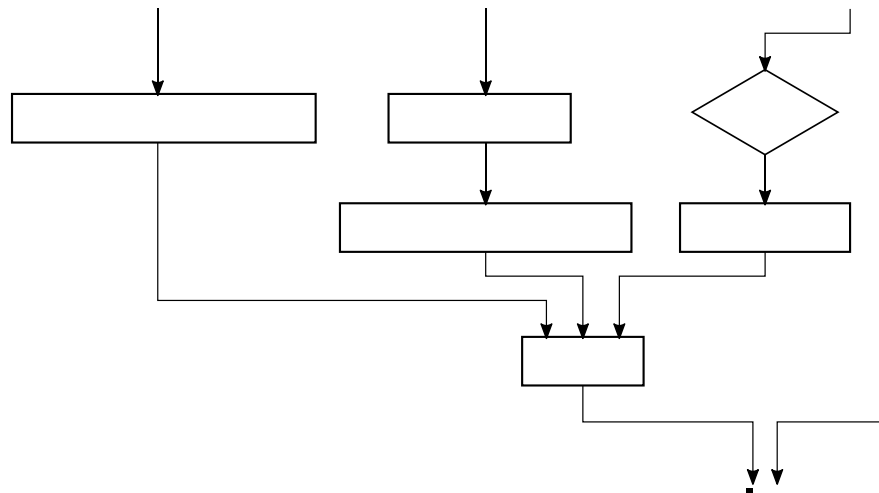


Abbildung 3: Flowchart für die Bestimmung des erzeugten Wärmestroms für Luft-Wasser-Wärmepumpen

Die Schätzung des erzeugten Wärmestrom $\dot{Q}$ für Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen umfasst die gleichen Schritte, ausser dass die Temperaturdaten für die Bestimmung des COP nicht erforderlich sind (siehe Abbildung 4). Des Weiteren bleibt der COP ganzjährig konstant (siehe Kapitel 2.3.3).

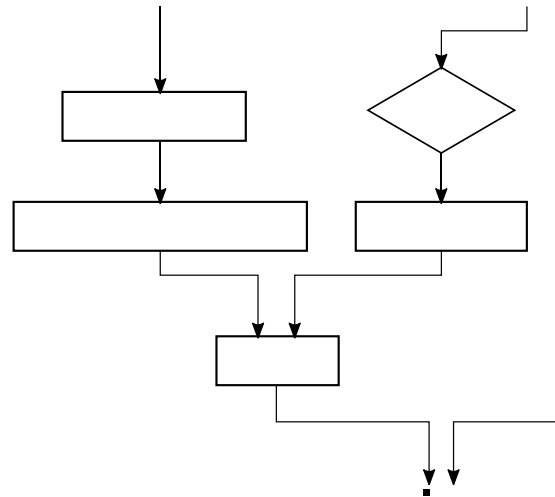


Abbildung 4: Flowchart für die Bestimmung des erzeugten Wärmestroms für Sole-Wasser-Wärmepumpen und Wasser-Wasser-Wärmepumpen

2.4 Gebäudesimulation

2.4.1 Heizleistungszeitreihe

Für die Simulation wird die erzeugte Wärmeleistung vom 1. Januar bis 31. Dezember (siehe Abbildung 5, links) über das Jahr aufsummiert (siehe Abbildung 5, rechts). Typischerweise entsteht ein Plateau in der Jahresmitte. Dieser Zeitraum sollte eine Wärmepumpe nicht mehr im aktiven Heizbetrieb sein, wenn überhaupt kühlt die Wärmepumpe das Gebäude durch die Regeneration des Erdreichs oder läuft im Stand-by-Modus.

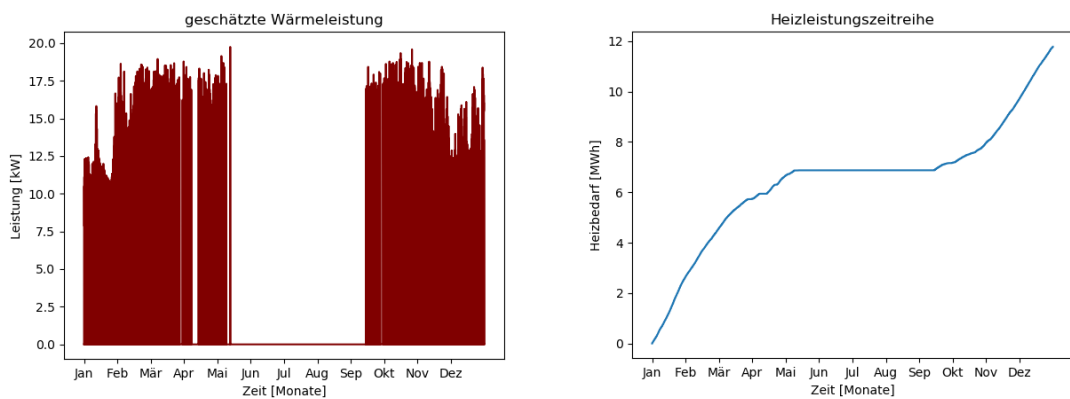


Abbildung 5: geschätzte Wärmeleistung (links) und daraus resultierende Heizleistungszeitreihe (rechts)

2.4.2 Simulationsmodell

Für das Simulationsmodell werden die geschätzten Heizbedarfszeitreihen für eine verkürzte Rechenzeit und Kompatibilität mit den Wetterdaten Bravo auf eine Auflösung von 60 Minuten umgerechnet. Ansonsten sind keine Anpassungen erforderlich. Das Simulationsmodell wurde im Rahmen eines Europäischen Forschungsprojekts entwickelt und in einer vorherigen Arbeit für die Schätzung der Gebäudeparameter angepasst. Dazu generiert das Simulationsmodell eine simulierte Heizleistungszeitreihe (siehe Abbildung 6) mit den Parameter C, H, g und den Wetterdaten Bravo.

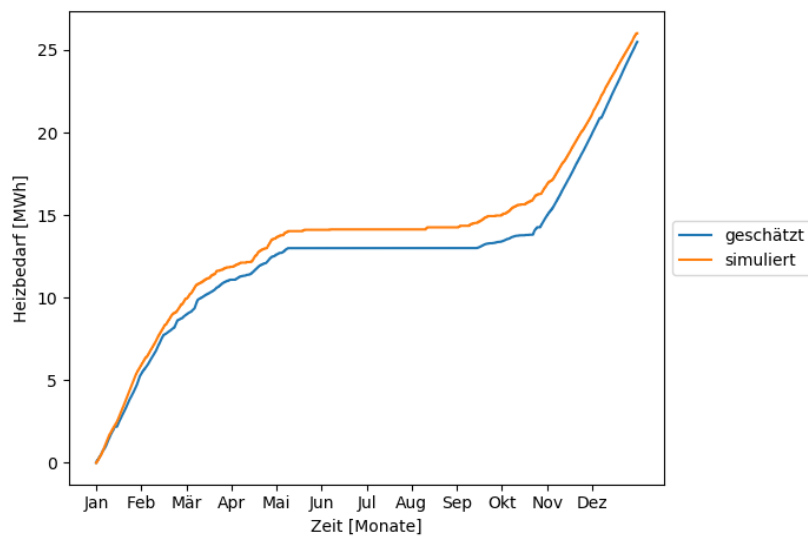


Abbildung 6: Beispiel von simulierter (orange) und geschätzter Heizleistungszeitreihe (blau)

2.4.3 Gebäudemodell

Das dynamische Verhalten des Gebäudes lässt sich vereinfacht mit nachfolgender Energiebilanz-Gleichung (siehe Formel 2-4) beschreiben. Dabei wird die zeitliche Änderung der Raumtemperatur betrachtet [4].

$$C \frac{\partial T_R}{\partial t} = -H(T_R(t) - T_U(t)) - g * I(t) + \dot{Q}_H(t) + \dot{Q}_{intern}(t) \quad (2-4)$$

Die Kapazität C beschreibt die Speicherfähigkeit des Gebäudes. Die Verluste des Gebäudes $H(T_R - T_U)$ sind linear abhängig vom Temperaturgefälle zwischen der gezielten Raumtemperatur T_R und der Umgebungstemperatur T_U mit dem Transmissionswärmetransferkoeffizient H . Der Gesamtenergiedurchlassfaktor g (auch g -Wert) und die direkte und diffuse Strahlung I bilden den Beitrag, der durch die solare Einstrahlung über die Fensterflächen gewonnen wird.

$\dot{Q}_H$ ist die von der Emittersystem gelieferte Heizleistung und $\dot{Q}_{intern}$ berücksichtigt interne Wärmequellen wie von Bewohner und Abwärme von elektrischen Geräten. Da die Benutzung der Geräte und die Anwesenheit ändert, sind diese Grössen zeitabhängig. Es werden die Profile von Dott et al. [10] verwendet.

2.4.4 Optimierer

Der bei dieser Arbeit eingesetzte SCIPY-Optimierer arbeitet mit dem Nelder-Mead-Verfahren. Das Verfahren kommt ohne Ableitungen der Funktion aus. Der Grundidee des Nelder-Mead-Verfahrens besteht darin für die Optimierung von n Grössen, Simplexen mit $n+1$ Ecken zu erzeugen, die im Idealfall immer kleiner werdende Kantenlängen aufweisen und sich schliesslich um das gesuchte globale Minimum herumscharen. Mögliche Fehler können auftreten, wenn die Simplexe gegen ein lokales Minimum konvergieren.

In dieser Anwendung des Gebäudemodells sind die freien Parameter C , H und g . Deshalb entspricht die Form der Simplexe eines Tetraeders im 3-dimensionalen Raum.

Die Simulation des Gebäudemodells startet mit unterschiedlichen Werten für die C, H, g -Parameter. Der Optimierer sucht danach nach besseren Werten. Aus der Optimierung gehen daher passende C, H, g -Parameter hervor.

Die maximale Anzahl Iterationen lässt sich einstellen. Ebenfalls wurde ein Konvergenzkriterium implementiert, die den iterativen Prozess vorzeitig beendet, sofern sich Änderung der optimierten Parameter unter 1% beträgt.

2.4.5 Durchführung der Simulation und Optimierungen

Für die Simulation müssen die Wetterdaten mit Solarstrahlungsdaten sowie Heizbedarfskurve eingelesen werden. Die Simulation wird jeweils für ein Gebäude mit gleichbleibenden Startparameter durchgeführt.

Da keine genauen für die Gebäude spezifischen Schätzwerte für C,H,g-Parameter vorhanden sind, wird die Simulation mit verschiedenen Startparameter durchgeführt. Der Optimierungsalgorithmus sucht anschliessend nach optimierten C,H,g-Parameter und erreicht abhängig vom Verlauf der Optimierung unterschiedliche Minimalstellen. Wie in Tabelle 2 gezeigt wurde für jedes Gebäuden 10 unterschiedliche Optimierungsdurchläufe erstellt.

Tabelle 2: Startparameter für Simulation mit Optimierer

Durchlauf	Startparameter C	Startparameter H	Startparameter g
1	26000	0.25	0.25
2	26000	0.85	0.25
3	30000	0.1	0.1
4	30000	0.1	0.2
5	30000	0.2	0.2
6	30000	0.4	0.2
7	40000	0.5	0.3
8	60000	0.2	0.2
9	60000	0.4	0.4
10	80000	0.4	0.4

Um die Qualität der Vorhersage mit den unterschiedlichen Simulationsparametern zu validieren, wurde die Diskrepanzen zwischen der geschätzte und simulierten Heizbedarfskurve nach der L^2 -Norm untersucht. Je kleiner die L^2 -Norm, desto eher entspricht die simulierte Heizbedarfskurve dem realen Bedarf.

2.5 Analyse des Parameterraums Transmissionswärmetransferkoeffizient H und Gesamtenergiedurchlassfaktor g

Für die Validierung der aus der Optimierung hervorgehenden Parameter, wird für die gebäudecharakterisierende Parameter Transmissionswärmetransferkoeffizient H und Gesamtenergiedurchlassfaktor g eine Parameterstudie durchgeführt. Für die Parameterstudie durch die Werte in einem Netz wird die Kapazität C auf 300'000 festgelegt. Für H und g starten die Werte bei 0.025 bis 1 für H bzw. 2 für g in einem Intervall von 0.025.

Dabei wird für verschiedene Kombinationen die Simulation (ohne Optimierung) durchgeführt und der Fehler zwischen geschätzter und simulierten Heizbedarfskurve nach der L^2 -Norm evaluiert. Danach erfolgt eine Darstellung des Fehlers in Abhängigkeit von H und g .

3 Resultate

3.1 Manuelle Zuordnung der Wetterdaten Bravo zu den Gebäuden

Einerseits erfolgt die Zuordnung der Wetterdatensatz Alpha zu den Gebäuden automatisch über die geographischen Koordinaten im Python-Skript. Andererseits muss für die Gebäudesimulation der Wetterdatensatz Bravo mit Solarstrahlungsdaten manuell den Gebäuden zugeordnet werden.

In Abbildung 7 sind die Wetterstationen zum Wetterdatensatz Bravo und die 17 tiko-Gebäude nach den Längen- und Breitengraden dargestellt.

Für die 17 tiko-Gebäude sind 12 von 46 Wetterdaten relevant, da die Gebäude teilweise auf dieselben Wetterdaten zugreifen. Die Zuordnung der Wetterdaten zu den Gebäuden ist in Tabelle 3 ersichtlich. Innerhalb eines Umkreises von 20 km ist zu jedem Gebäude eine Wetterstation verfügbar (siehe Tabelle 3).

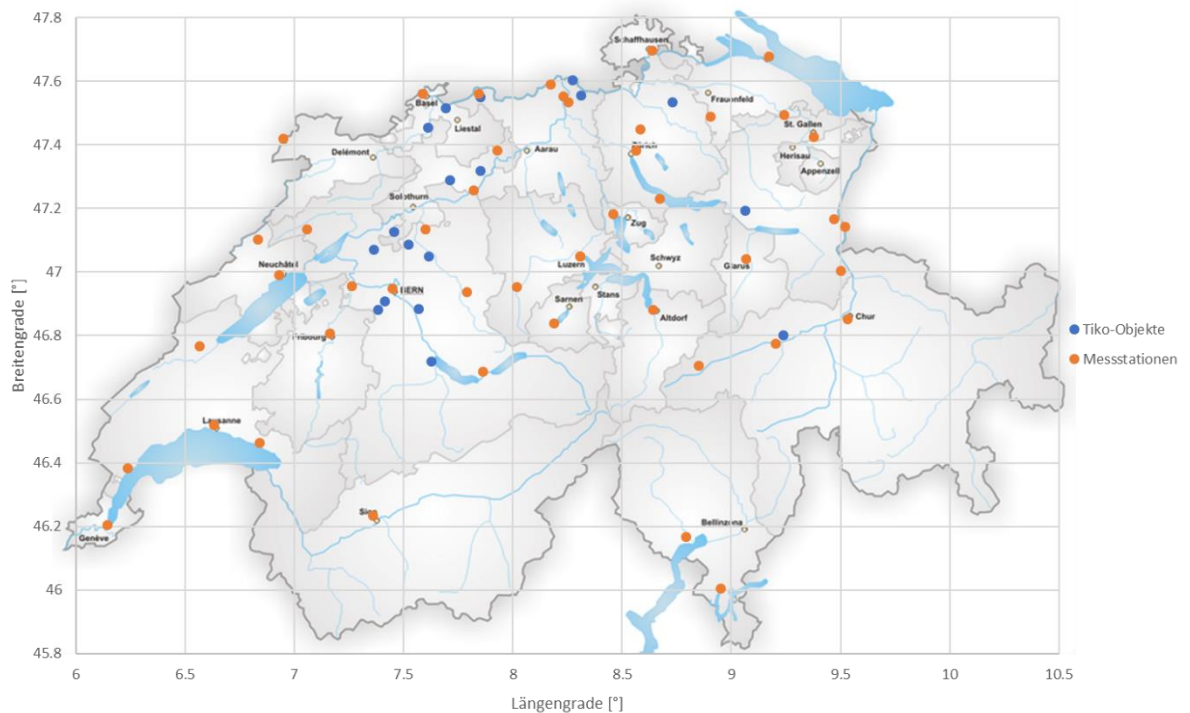


Abbildung 7: geographischen Positionen der tiko-Gebäude und der Wetterstationen Bravo [7]

Tabelle 3: Zuordnung der Wetterstationen zu tiko-Gebäuden mit Angabe der Distanz

ID	Zugeordnete Station	Distanz [km]
1	Koppingen	7.99
2	Bern	8.86
3	Mühleberg	14.94
4	Aadorf	13.93
5	Basel	12.03
6	Bern	11.63
7	Möhlin	1.13
8	Beznau	6.67
9	Wynau	8.98
10	Glarus	16.84
11	Ilanz	4.01
12	Interlaken	18.42
13	Bern	5.10
14	Koppingen	9.56
15	Würelingen	4.84
16	Basel	9.32
17	Koppingen	11.11

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wurde auf eine explizite Nennung des Gebäudestandorts verzichtet.

3.2 Geschätzter jährlicher Heizenergiebedarf

3.2.1 Schätzung von Emitter und COP

Um den Heizenergiebedarf zu schätzen, müssen zunächst Emittersystem und COP-Werte geschätzt werden. In der nachfolgenden Tabelle 4-6 ist die Art des Emitters für jedes Gebäude aufgeführt. Die Annahmen (siehe Kapitel 2.3.1) sind entsprechend durch Stern gekennzeichnet. Des Weiteren beinhalten die Tabellen den maximalen elektrischen Verbrauch $P_{el,max}$ aus den Verbrauchszeitreihen und Informationen darüber, welcher Anlagentyp (siehe Anhang A2) für die Abschätzung der COP-Werte verwendet wird. Für die Luft-Wasser-Wärmepumpen wird ein COP-Mittelwert für den Zeitbereich, in welchem die Wärmepumpe im Betrieb war, angegeben.

Tabelle 4: Angaben zu Emitter und COP für Luft-Wasser-Wärmepumpen

ID	Baujahr	Emitter	$P_{el,max}$ [W]	Referenz Wärmepumpe	Mittlerer COP [-]
1	2009	Fussboden*	3420	Belaria SRM 11	3.38
4	1951	Radiator*	6530	Belaria SRM 16	1.89
5	2004	Fussboden	1812	Belaria SRM 6	3.58
6	1964	Radiator	5720	Belaria SRM 14	2.23
7	1998	Fussboden*	4500	Belaria SRM 14	3.28
8	2006	Fussboden*	3210	Belaria SRM 11	3.35
9	1982	Fussboden*	6364	Belaria SRM 14	3.01
10	1979	Radiator*	8850	Belaria SRM 16	1.78
16	1984	Fussboden	3834	Belaria SRM 11	3.62

*Angaben zum Emitter aus Baujahr geschätzt

Tabelle 5: Angaben zu Emitter und COP für Sole-Wasser-Wärmepumpen

ID	Baujahr	Emitter	$P_{el,max}$ [W]	Referenz Wärmepumpe	COP [-]
2	1985	Fussboden*	4287	Thermalia comfort 16	4.72
3	1999	Fussboden*	4577	Thermalia comfort 16	4.72
11	2006	Fussboden	3220	Thermalia comfort 16	4.72
12	1964	Radiator*	2800	Thermalia comfort 10	2.78
14	2008	Fussboden*	3462	Thermalia comfort 16	4.72
15	1954	Radiator*	3870	Thermalia comfort 13	2.96
17	1928	Radiator*	4173	Thermalia comfort 13	2.96

*Angaben zum Emitter aus Baujahr geschätzt

Tabelle 6: Angaben zu Emitter und COP für Wasser-Wasser-Wärmepumpen

ID	Baujahr	Emitter	$P_{el,max}$ [W]	Referenz Wärmepumpe	COP [-]
13	2009	Fussboden*	2000	Thermalia comfort 10	6.08

*Angaben zum Emitter aus Baujahr geschätzt

3.2.2 Herausforderung Referenzwärmepumpen zu identifizieren

Bei einigen Gebäuden übersteigt die gemessene elektrische Leistung die maximale elektrische Leistung der Referenzwärmepumpen. Aus den Datenblätter (siehe Anhang A2) geht hervor, dass Wärmepumpen bei höherer Vorlauftemperatur mehr Strom verbrauchen.

Wenn bei Gebäuden mit vermuteter Fussbodenheizung keine passende Wärmepumpe zur Verfügung steht, könnte davon ausgegangen werden, dass nicht eine Fussbodenheizung, sondern eine Radiatorheizung verbaut ist. Dadurch würde sich zwar ein höherer Stromverbrauch begründen lassen. Jedoch würden so tiefere COP-Werte und somit tiefere spezifische Heizbedarfswerte resultieren. Ein Beispiel dafür ist Gebäude 9 mit Baujahr 1982.

Durch den monoenergetischen Betrieb (siehe Kapitel 2.2.1) können ebenfalls hohe elektrische Leistungen entstehen, sodass keine passende Referenzwärmepumpe identifiziert werden kann. Falls keine Referenzwärmepumpe passend ist, wird die Wärmepumpen mit der höchsten elektrischen Leistung als Referenzwärmepumpe verwendet.

3.2.3 Geschätzter jährlicher spezifischer Heizenergiebedarf

Ein Anhaltspunkt für die Plausibilität des jährlichen Heizenergiebedarf ist dieser in Tabelle 7 flächenspezifisch aufgeführt.

Tabelle 7: Spezifischer jährlicher Gesamtenergieverbrauch

ID	Baujahr	Emitter	Wohnfläche [m ²]	Geschätzter jährlicher Gesamtenergieverbrauch [kWh/a]	Geschätzter spezifischer jährlicher Gesamt- energieverbrauch [kWh/m ² a]
1	2009	Fussboden*	160	8382	52.38
2	1985	Fussboden*	165	6909	41.87
3	1999	Fussboden*	160	33648	210.30
4	1951	Radiator*	104	13709	131.80
5	2004	Fussboden	170	5248	30.87
6	1964	Radiator*	168	15791	94.00
7	1998	Fussboden*	130	11775	90.57
8	2006	Fussboden*	976	6940	7.11
9	1982	Fussboden*	220	6163	28.01
10	1979	Radiator*	k. A.	12264	-
11	2006	Fussboden	230	22160	96.35
12	1964	Radiator*	180	10209	128.13
13	2009	Fussboden*	120	9069	75.58
14	2008	Fussboden*	380	10953	28.82
15	1954	Radiator*	220	14462	65.74
16	1984	Fussboden	200	25487	127.4
17	1928	Radiator*	200	16000	80.00

*Angaben zum Emitter aus Baujahr geschätzt

Die Gebäude 5, 8, 13 und 14 entsprechen laut Metadaten (siehe Tabelle 1) dem Minergiestandard. Der spezifischer Gesamtenergieverbrauch sollte maximal im Bereich von 38 kWh/m² liegen. Bei Gebäude 13 liegt die Schätzung jedoch bei 75.58 kWh/m².

3.3 Ergebnisse des Simulationsmodells

Im Simulationsmodell und im Optimierer werden nachfolgende Einstellungen vorgenommen. Der Optimierer hat als Einstellung die 30-malige Erzeugung von Simplexen mit maximal 20 Iterationen. Der Optimierer benötigte jedoch nie 20 Iterationen, da sich nach maximal 13 Iterationen die optimierten Werte nicht mehr ändern, und weitere Iterationen aufgrund des implementierten Konvergenzkriteriums unterbunden werden.

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse aufgelistet, die die Simulationen mit bester Übereinstimmung erzeugen.

Tabelle 8: optimierte Parameter nach Simulation auf 3 signifikanten Stellen gerundet

ID	Startparameter C,H,g			Optimierte Parameter C,H,g			Simulierter spezifischer Gesamtenergieverbrauch [kWh/m ² a]
1	800'000	0.4	0.4	1'490'000	0.00973	0.120	56.83
2	300'000	0.4	0.2	1'560'000	0.0762	0.600	45.90
3	260'000	0.25	0.25	887'000	0.843	0.844	220.02
4	800'000	0.4	0.4	884'000	0.267	0.479	142.19
5	-	-	-	-	-	-	-
6	800'000	0.4	0.4	911'000	0.220	0.209	93.46
7	300'000	0.4	0.2	489'000	0.164	0.160	93.21
8	800'000	0.4	0.4	884'000	0.157	0.542	7.68
9	300'000	0.4	0.2	434'000	0.0478	0.138	28.15
10	300'000	0.1	0.1	140'000	0.212	0.683	-
11	800'000	0.4	0.4	1'780'000	0.245	0.0678	97.43
12	260'000	0.85	0.25	303'000	0.587	1.17	137.63
13	400'000	0.5	0.3	1'020'000	0.109	0.192	76.01
14	600'000	0.2	0.2	1'460'000	0.166	0.279	29.91
15	600'000	0.4	0.4	44'500	0.205	0.240	64.00
16	300'000	0.4	0.2	115'000	0.611	0.964	120.73
17	400'000	0.5	0.3	307'000	0.213	0.175	81.11

Für das Gebäude 5 kann keine aussagekräftige Simulation durchgeführt werden. Aus den Stromverbrauchsreihen ist ersichtlich, dass das Monitoringsystem oder die Wärmepumpe während dem zweiten Halbjahr vom Messnetz/Stromnetz getrennt wurde (siehe Abbildung 8).

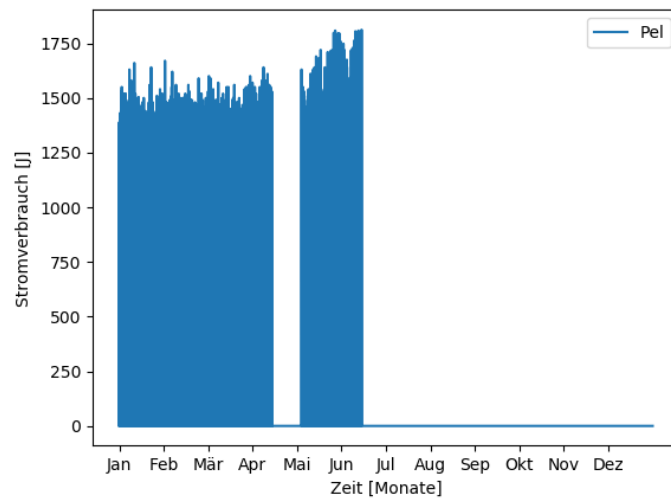


Abbildung 8: Elektrischer Verbrauch von Gebäude 5 über das Jahr 2017

3.4 Analyse des Parameterraums Transmissionswärmetransferkoeffizient H und Gesamtenergiedurchlassfaktor g

Die Ergebnisse aus der Parameterstudie sind in Tabelle 9 aufgeführt. Die Ergebnisse aus der Simulation mit Optimierer liegen idealerweise im Bereich des kleinsten Fehlers.

Tabelle 9: Vergleich der Parameter H und g aus Simulation und der Parameterstudie

ID	Optimierte Parameter H, g		Parameter H, g bei Minima	
1	0.00973	0.120	0.01	0.15
2	0.0762	0.600	0.125	0.45
3	0.843	0.844	0.975	1.25
4	0.267	0.479	0.25	0.425
5	-	-	-	-
6	0.220	0.209	0.225	0.25
7	0.164	0.160	0.175	0.225
8	0.157	0.542	0.125	0.35
9	0.0478	0.138	0.05	0.15
10	0.212	0.683	0.2	0.55
11	0.245	0.0678	0.25	0.1
12	0.587	1.17	0.6	1.225
13	0.109	0.192	0.125	0.275
14	0.166	0.279	0.175	0.35
15	0.205	0.240	0.175	0.075
16	0.611	0.964	0.55	0.675
17	0.213	0.175	0.225	0.225

3.4.1 Interpretation Resultate aus Parameterstudie

Die optimalen Parameter aus der Optimierung (siehe Kapitel 3.4) liegen für den Gesamtenergiedurchlassfaktor g über dem Wert 1. Die Gebäudesimulation führt die Simulation auf ein Einfamilienhaus (EFH) mit 140 m^2 Wohnfläche und 10% Fensterflächen Anteil aus. Bei einem Gesamtenergiedurchlassfaktor g über 1 wird die Fensterfläche im Modell unterschätzt.

Für die Simulation wurden die Daten nicht auf eine Fläche von 140 m^2 skaliert. Ein Grossteil der Gebäude verfügt über eine grössere Wohnfläche (siehe Tabelle 1). Ausserdem entsprechen nicht alle tiko-Gebäude einem freistehende EFH, sodass der Anteil an Gebäudehüllfläche und Fensterflächen variiert.

Die durchgeführte Parameterstudie deckt sich nur teilweise mit den Resultaten aus der Gebäudesimulation mit Optimierer (siehe Tabelle 9). Ein Grund für die Abweichung sind die zu klein gewählten Schritte von 0.025, da die optimierten Parameter in der gleichen Grössenordnung sind.

Aus der Parameterstudie ist jedoch ersichtlich, dass sich ein Tal im Bereich des tiefsten Fehlers bildet (siehe Abbildung 9). Da keine ausschöpfenden Optimierer verwendet wurden, kann es sein, dass auf die Suche nach einem globalen Minimum in einem lokalen Minimum feststeckte.

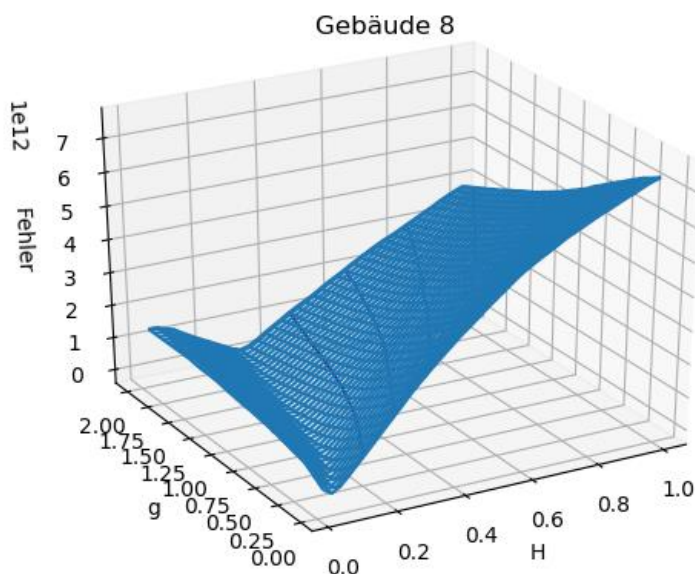


Abbildung 9: Resultierendes Grid aus Parameterstudie für Gebäude 8

Die dominanten thermischen Gebäudeparameter, die das Gebäude charakterisieren sind der Transmissionswärmetransferkoeffizient H und der Gesamtenergiedurchlassfaktor g . Dies wird auch durch Änderung der Kapazität C auf 900'000 bestätigt, da sich das Minimalfehler aus der Simulation nur geringfügig verschiebt.

4 Schlussfolgerungen

4.1 Stärken

4.1.1 Gebäudesimulation mit Optimierer

Der im Simulationsmodell integrierte Optimierungsalgorithmus funktioniert mit den gewählten Spezifikationen sehr gut. Er findet bei unterschiedlichen Startwerte einen optimalen Wert für H und g . Rein visuell sind die Diskrepanzen zwischen geschätzten und simulierten Heizleistungszeitreihen sehr gering. In Abbildung 10 sind geschätzte und simulierte Heizleistungszeitreihe mit grösstem Fehler (links) und kleinstem Fehler (rechts) ersichtlich. Im Anhang A4 befinden sich weitere Abbildungen der Heizleistungszeitreihen zu den tiko-Gebäuden.

Im Mittel beträgt die Abweichung des Gesamtwärmebedarfs weniger als 4.6 % und die Fläche unter den Kurven ist kleiner als 0.4 % des Integrals unter der Kurve.

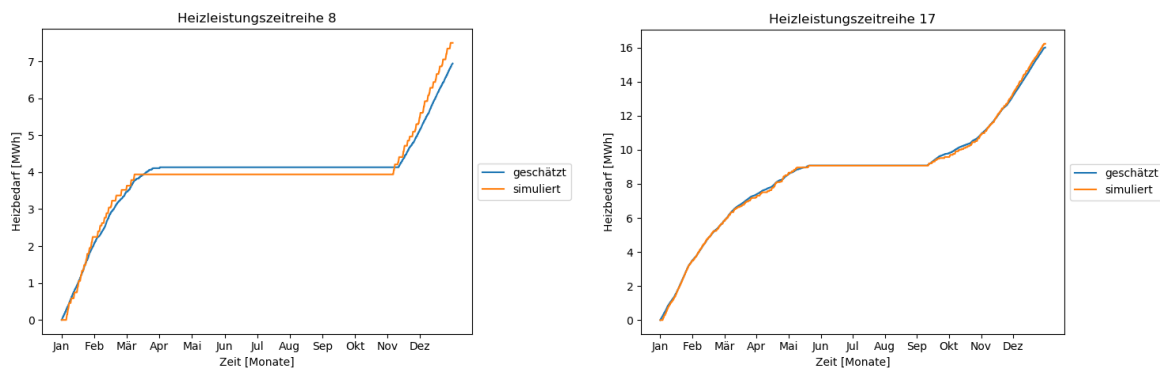


Abbildung 10: Heizleistungszeitreihen nach schlechtester (links) und bester Optimierung (rechts)

4.1.2 Sekündliche Auflösung der Leistungsdaten

Obwohl die Auflösung für die Gebäudesimulation bei 60 Minuten liegt, bringt die sekundliche Auflösung des elektrischen Stromverbrauchs wesentlichen Vorteil mit sich, so dass eine COP-Absenkung durch eine Ein-Aus-Taktung nicht berücksichtigt werden muss. Um die Absenkung zu berücksichtigen müssten deutlich mehr Informationen zum Heizsystem vorhanden sein.

4.2 Schwächen

4.2.1 Diskrepanzen zum realen System

Die Schätzung der Heizleistung wurde mit konstanter Senken- und Vorlauftemperatur durchgeführt, jedoch ist es auf Grund der Kosten und Einfachheit wahrscheinlicher, dass sich der Massenstrom konstant gehalten wird und sich die Vorlauftemperatur bei Änderung des Heizbedarfs entsprechend einer Heizkurve ändert (siehe Kapitel 2.2). Bei einem Beimischsystem kann sich die Senktemperatur immer noch konstant verhalten, wenn sich die Vorlauftemperatur aus dem Mischen des Wassers vom Kondensator und des kälteren Wassers aus dem Rücklauf ergibt. Bei Beimischsystemen ist die Senktemperatur nicht mit der Vorlauftemperatur gleichzusetzen.

In Abbildung 11 ist eine mögliche Heizkurve dargestellt. Durch den kleineren Wärmebedarf sinkt die Vorlauftemperatur mit steigender Umgebungstemperatur.

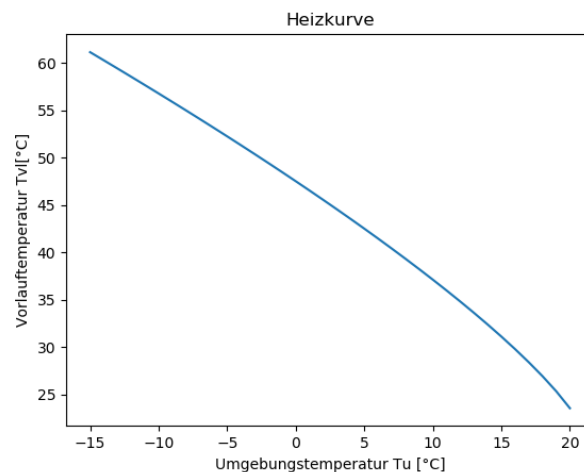


Abbildung 11: Heizkurve für Radiatorheizungen [9]

Für Luft-Wasser-Wärmepumpen fällt die Berücksichtigung einer Heizkurve (siehe Abbildung 11) besonders ins Gewicht. In Abbildung 12 sind die COP-Verläufe für die Hoval Belaria SRM 14 mit und ohne Berücksichtigung der Heizkurve nach Abbildung 11 (bei nicht konstanter Senkentemperatur) ersichtlich. Die COP-Werte unterscheiden sich bei tieferen Vorlauftemperaturen bzw. höheren Umgebungstemperatur deutlich. Die Nichtberücksichtigung einer Heizkurve führt folglich zu einer Unterschätzung des erzeugten Wärmestroms und somit auch dem spezifischen Wärmebedarf der Liegenschaft.

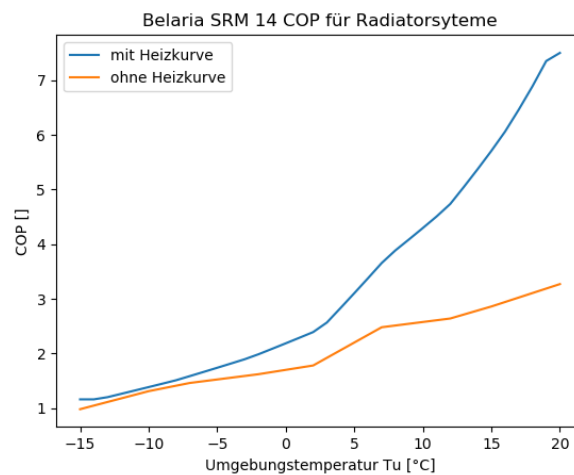


Abbildung 12: COP-Verlauf für Luft-Wasser-Wärmepumpe Hoval Belaria SRM 14

4.3 Verbesserungsmöglichkeiten

4.3.1 Angabe zum Emittertyp

Der Emittertyp ist essentiell für die Schätzung des Heizbedarfs der Gebäude. Zwar wurde die Art des Emitters anhand des Baujahrs geschätzt, jedoch gab es in den 70er und 90er Jahren einen Übergangsbereich, in dem vermehrt die Fussbodenheizung die Radiatorheizungen als Standardlösungen ablösten. Auch wurde der Fakt vernachlässigt, dass bei einer Sanierung des Gebäudes das Heizsystem ebenfalls saniert bzw. geändert wurde.

Für Fussbodenheizungen ergeben sich durch die niedrigere Vorlauftemperatur höhere COP-Werte (siehe Formel 2-2) als bei Radiatorheizungen. Sodass der jährlicher Heizenergiebedarf über 50% variieren kann.

4.3.2 Verwendung von einheitlichen Wetterdaten

In dieser Arbeit werden für Luft-Wasser-Wärmepumpen 2 verschiedenen Wetterdatensätze verwendet. Zu einem Datensatz Alpha für die Schätzung der erbrachten Heizleistung, zu anderem Datensatz Bravo für die Gebäudesimulation. Es lässt sich annehmen, dass bei Verwendung der gleichen Temperaturdaten, die Abweichung für die geschätzte und simulierter Heizbedarfskurve noch geringer sein wird, und die C,H,g-Parameter noch näher am realen System sein werden.

4.3.3 Unterscheidung von Ein-Aus-Regelung und kontinuierliche Leistungsregelung

Auf Grund der COP-Bestimmung (siehe Kapitel 2.3.3) werden als Referenzwärmepumpen mit einer Ein-Aus-Regelung verwendet. Aus den Stromverbrauchszeitreihen ist erkennbar, dass sich auch leistungsgeregelte Wärmepumpen in Gebäudeportfolio befinden. Der elektrische Verbrauch schwankt über das Jahr deutlich mehr (siehe Abbildung 13). Für COP-Bestimmung sollten hier andere Datenblätter beigezogen werden.

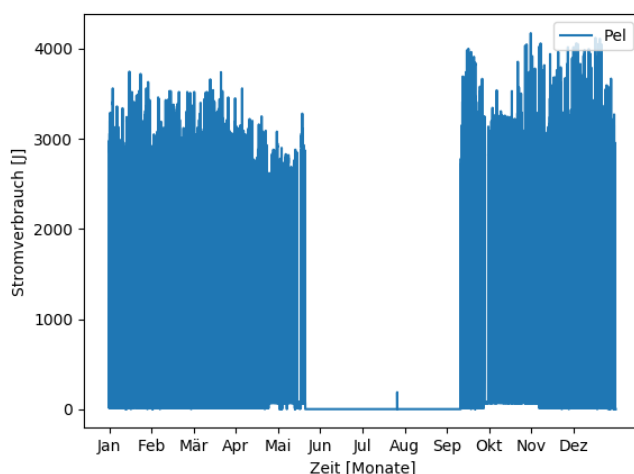


Abbildung 13: Stromverbrauchszeitreihen von Gebäude 17 mit Leistungsregelung

4.3.4 Unterscheidung zwischen Monovalentem und Monoenergetischer Betrieb

Bei Betrachtung der Stromverbrauchszeitreihen ist ersichtlich, dass sich mehrere Spitzenleistungen über das Jahr gebildet haben (siehe Abbildung 14). Dabei war die Wärmepumpe wahrscheinlich im monoenergetischen Betrieb, d.h. die Wärmepumpe konnte die geforderte Wärmeleistung nicht liefern, sodass eine sekundäre Wärmequelle in Form eines elektrischen Heizstabs dazugeschaltet wird. Bestätigt wird dies, wenn die Temperaturdaten betrachtet werden. Die Umgebungstemperatur liegt meist im negativen Bereich.

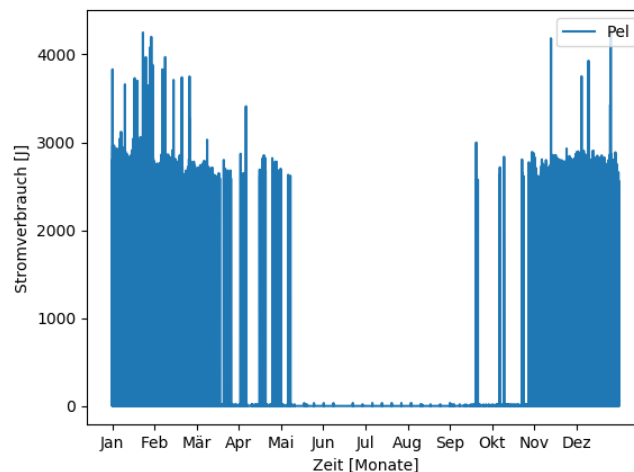


Abbildung 14: In der Stromverbrauchszeitreihe von Gebäude 2 ist ein monoenergetischer Betrieb sichtbar

Der Anteil der sekundären elektrischen Wärmequelle muss mit einem COP von 1 separat in die Schätzung einbezogen werden. Aktuell wird nicht zwischen monovalentem und monoenergetischem Betrieb unterschieden.

Die Wärmeleistung aus einem bivalenten Betrieb (Ergänzungsheizung) wird nicht berücksichtigt. Der Anteil wird sich wahrscheinlich im kleinen Rahmen zur Gesamtwärmeleistung halten, da die Wärmepumpe die Primäre Wärmequelle ist.

4.3.5 Skalierung der erzeugten Wärmeleistung für das Simulationsmodell

Um den Einfluss der Wohnfläche zu minimieren, ist es sinnvoll die erzeugte Wärmeleistung für die Simulation auf 140 m^2 zu skalieren. Durch die Skalierung werden auch Gebäudehüllflächen und Fensterflächen skaliert.

4.4 Ausblick

Zunächst sollen die Verbesserungsmöglichkeiten (siehe Kapitel 4.3) berücksichtigt werden.

Das Schätzverfahren zur Bestimmung des Wärmestroms sollte auf ihre Plausibilität überprüft werden. Im Idealfall stehen Messreihen zur bezogenen elektrischen Leistung und die gelieferte Wärmeleistung zur Verfügung.

Danach sollte der Einfluss von den Vereinfachungen untersucht werden und gewichtet werden. Wie die Vereinfachung einer konstanten Vorlauftemperatur durch die Implementation einer Heizkurve, sodass die Vorlauftemperatur nicht mehr konstant ist. Daraus würde folgen, dass bei Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen die COP-Werte ebenfalls als nicht mehr konstant betrachtet werden kann.

Der monoenergetischer und bivalenter Wärmeleistung kann, wenn der Anteil klein zur Gesamtwärmeleistung ist, sehr wahrscheinlich vernachlässigt werden. Um sicher zu sein, müsste dies noch genauer untersucht werden.

Falls Messreihen nicht in Sekundenaufösung zur Verfügung stehen, muss eine COP-Absenkung im Teillast von ein-aus-geregelten Wärmepumpen berücksichtigt werden. Dazu muss zunächst evaluiert werden ob die Wärmepumpe ein-aus-geregelt ist.

4.5 Fazit

Es wurden diverse Verbesserungspunkte für weiterführende Arbeiten gefunden, sodass das Verfahren kontinuierlich optimiert werden kann.

Die Schätzung der erzeugten Wärmeleistung aus dem elektrischen Verbrauch gestaltet sich als schwierig. Der COP-Wert spielt hier die tragende Rolle. Nun sollte mit dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt werden, mit möglichst wenigen Angaben, auf den COP-Wert zum Zeitpunkt t zu schliessen. Dabei wurden Vereinfachungen getroffen, die viele andere Einflüsse eliminieren. Vielleicht wurde eine zu grobe Vereinfachung mit der konstanter Vorlauftemperatur getroffen. Leider kann die geschätzte Wärmeleistung nicht überprüft werden, da keine Messdaten zur erzeugten Wärmeleistung zur Verfügung stehen. Wie nahe die Schätzung der Realität entspricht bleibt offen.

Die Gebäudesimulation mit dem integrierten Optimierer funktioniert sehr gut, da sie meistens passende Zeitreihen liefert. Die Richtigkeit der Optimierten Parameter (siehe Tabelle 8) bleibt durch die nicht überprüfbare Schätzung der Heizleistungszeitreihe offen.

5 Symbolverzeichnis

Formelzeichen

$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
C	J/K	Kapazität
COP	-	<i>Coefficient of Performance</i>
g	m^2	Gesamtenergiedurchlassfaktor
H	W/K	Transmissionswärmetransferkoeffizient
I	W/m ²	Solarstrahlung
m	kg	Masse
P	W	elektrische Leistung
Q	J	Wärmemenge
T	K	Temperatur
ζ	-	Gütegrad

Indizes

el	elektrisch
Hub	Hub
h	Heizung
intern	intern
K	Kondensator
max	maximal Wert
Q	Quelle
R	Raum
RL	Rücklauf
U	Umgebung
V	Verdampfer
VL	Vorlauf

Abkürzungen

B	<i>Brine</i> (englisch für Sole)
COP	<i>Coefficient of Performance</i> (Leistungszahl)
EFH	Einfamilienhaus
k. A.	Keine Angabe
W	Wasser

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des vereinfachten Gesamtheizsystems. Zur Bilanzierung sind 3 unterschiedliche Systemgrenzen eingezeichnet.	9
Abbildung 2: geschätzter Wärmestrom aus der elektrischen Leistung	12
Abbildung 3: Flowchart für die Bestimmung des erzeugten Wärmestroms für Luft-Wasser-Wärmepumpen.....	13
Abbildung 4: Flowchart für die Bestimmung des erzeugten Wärmestroms für Sole-Wasser-Wärmepumpen und Wasser-Wasser-Wärmepumpen.....	14
Abbildung 5: geschätzte Wärmeleistung (links) und daraus resultierende Heizleistungszeitreihe (rechts).....	15
Abbildung 6: Beispiel von simulierter (orange) und geschätzter Heizleistungszeitreihe (blau)	16
Abbildung 7: geographischen Positionen der tiko-Gebäude und der Wetterstationen Bravo [7]	19
Abbildung 8: Elektrischer Verbrauch von Gebäude 5 über das Jahr 2017	25
Abbildung 9: Resultierendes Grid aus Parameterstudie für Gebäude 8	27
Abbildung 10: Heizleistungszeitreihen nach schlechtester (links) und bester Optimierung (rechts).....	28
Abbildung 11: Heizkurve für Radiatorheizungen [9].....	29
Abbildung 12: COP-Verlauf für Luft-Wasser-Wärmepumpe Hoval Belaria SRM 14	30
Abbildung 13: Stromverbrauchszeitreihen von Gebäude 17 mit Leistungsregelung.....	31
Abbildung 14: In der Stromverbrauchzeitreihe von Gebäude 2 ist ein monoenergetischer Betrieb sichtbar.....	32

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausschnitt aus den zur Verfügung stehenden Meta-Daten.....	7
Tabelle 2: Startparameter für Simulation mit Optimierer	18
Tabelle 3: Zuordnung der Wetterstationen zu tiko-Gebäuden mit Angabe der Distanz.....	20
Tabelle 4: Angaben zu Emitter und COP für Luft-Wasser-Wärmepumpen.....	21
Tabelle 5: Angaben zu Emitter und COP für Sole-Wasser-Wärmepumpen.....	21
Tabelle 6: Angaben zu Emitter und COP für Wasser-Wasser-Wärmepumpen.....	22
Tabelle 7: Spezifischer jährlicher Gesamtenergieverbrauch	23
Tabelle 8: optimierte Parameter nach Simulation auf 3 signifikanten Stellen gerundet.....	24
Tabelle 9: Vergleich der Parameter H und g aus Simulation und der Parameterstudie.....	26

8 Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich zunächst beim Betreuerteam bedanken.

Ich bedanke mich bei Philipp Schütz als betreuender Dozent für die grossartige Betreuung während dieser Bachelorthesis und die Arbeit in die richtige Richtung lenkte.

Ein Dankeschön an Roman Durrer und Andreas Melillo, die betreuenden Assistenten, die Vorarbeiten leisteten, die Einführung in Python übernahmen, bei Problemen geholfen haben und mir mit Rat und Tat unterschützten.

Ebenfalls möchte ich mich an Professor Dr. Jörg Worlitschek, der die Durchführung dieser Bachelorthesis in die Wege geleitet hat und trotz des vollen Terminkalenders sich Zeit für Vorgespräche genommen hatte.

Als Schluss danke ich dem Industriepartner tiko Energy Solutions für die zur Verfügung gestellten Verbrauchszeitreihen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] SCHWEIZERISCHE GESAMTSTATISTIK 2017 805.006.17, Bundesamt für Energie BFE, 2018
- [2] Altmann-Mavaddat, N.: "EPISCOPE" – TYPOLOGISCHE KLASSIFIZIERUNG UND ENERGIEEFFIZIENZ-MONITORING VON WOHNGEBÄUDEBESTAND IN ÖSTERREICH, 2015. https://www.energyagency.at/projekte-forschung/archiv/detail/artikel/episcopes-typologische-klassifizierung-und-energieeffizienz-monitoring-von-wohngebaeudebestanden.html?no_cache=1, abgerufen am: 04.01.2019
- [3] Altmann-Mavaddat, N., Amtmann, M., Simader, G. u. Stumpf, W.: EINE TYPOLOGIE ÖSTERREICHISCHER WOHNGEBÄUDE. Ein Nachschlagewerk mit charakteristischen, energierelevanten Merkmalen von 32 Modellgebäuden – im Bestand und für jeweils zwei Sanierungsvarianten, März 2015. https://www.energyagency.at/projekte-forschung/archiv/detail/artikel/episcopes-typologische-klassifizierung-und-energieeffizienz-monitoring-von-wohngebaeudebestanden.html?no_cache=1, abgerufen am: 04.01.2019
- [4] Fast assessment platform for energy consumption of different configurations in residential heating with thermal storages, Schütz, P., Rossano, S., Gwerder, D., Waser, R., Sturzenegger, D., Elguezal, P., Arregi, B., Tsagkrasoulis, D., Sivieri, A., Armijo, A., Aprile, Macello u. Worlitschek, J.
- [5] Laasch, T. u. Laasch, E.: Haustechnik. Grundlagen - Planung - Ausführung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint; Springer Vieweg 2013
- [6] Informationsblatt Nr. 57, Interessengemeinschaft Energie Umwelt Feuerungen GmbH, 2014
- [7] Wikipedia. https://als.wikipedia.org/wiki/Datei:Karte_Schweiz.png
- [8] Energien, Fluide, Prozesse, Engineering EFP Eng DEUTSCH, Hochschule Luzern Technik & Architektur, 2018
- [9] Exergie-Analyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen, Gasser, L., Wellig, B. u. Hilfiker, K., 2008
- [10] Dott, R., Haller, M., Ruschenburg, J., Ochs, F. u. Bony, J.: The Reference Framework for System Simulation of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Part B: Buildings and Space Heat Load. A technical report of subtask C. 2013

A1 Metadaten

ID	Stockwerk	Verglasung	Geak	Solarthermie
1	4	Triple	FALSCH	FALSCH
2	3	Triple	FALSCH	FALSCH
3	2	Double	FALSCH	FALSCH
4	2	Double	FALSCH	FALSCH
5	3	Double		FALSCH
6	2	Triple		FALSCH
7	2	Double	FALSCH	FALSCH
8	2	Triple	WAHR	FALSCH
9	2	Double	FALSCH	FALSCH
10		Double		FALSCH
11	4	Double	FALSCH	FALSCH
12	3	Triple	FALSCH	FALSCH
13	3	Triple		FALSCH
14	3	Triple	WAHR	FALSCH
15	2	Double	FALSCH	FALSCH
16	3	Double	FALSCH	FALSCH
17	2	Double	FALSCH	FALSCH

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wurde auf eine explizite Nennung des Gebäudestandorts verzichtet.

ID	material_ids/number_of_devices	Hersteller	Modell
1	Heat Pump,Boiler,Sensor Classic	Elco	Elcotherm aquatop 8
2	Heat Pump,Boiler,Sensor Classic		
3	Heat Pump,Sensor Classic		
4	Boiler,Heat Pump,Sensor Classic		
5	Heat Pump,Integrated,Sensor Classic		
6	Heat Pump,Integrated,Sensor Classic		
7	Boiler,Heat Pump,Sensor Classic,Sensor Classic		
8	Integrated,Heat Pump,Sensor Classic		
9	Heat Pump,Integrated,Sensor Classic		
10	Integrated,Heat Pump,Sensor Classic		
11	Heat Pump,Integrated,Sensor Classic		
12	Boiler,Heat Pump,Sensor Classic		
13	Integrated,Heat Pump,Sensor Classic		
14	Integrated,Heat Pump,Sensor Classic		
15	Integrated,Heat Pump,Swimming Pool,Sensor Classic		
16	Heat Pump,Integrated,Sensor Classic		
17	Integrated,Heat Pump,Sensor Classic		

ID	Photovoltaik	Haustyp
1	FALSCH	Principal
2	FALSCH	Principal
3	FALSCH	Principal
4	FALSCH	Principal
5	FALSCH	Principal
6	FALSCH	Principal
7	FALSCH	Principal
8	FALSCH	Principal
9	FALSCH	Principal
10	FALSCH	Principal
11	FALSCH	Principal
12	FALSCH	Principal
13	FALSCH	Principal
14	FALSCH	Principal
15	FALSCH	Principal
16	FALSCH	Principal
17	FALSCH	Principal

A2 Datenblätter

Hoval Belaria® SRM (4-16)

Angaben gemäss EN14511

Typ	tVL	tQ °C	Qh kW	(4)		(6)		(8)		(11)		(14)		(16)					
				P kW	COP	Qh kW	P kW	COP	Qh kW	P kW	COP	Qh kW	P kW	COP					
30	-20	2,3	1,5	1,48	3,2	1,9	1,67	3,8	2,4	1,57	7,3	3,7	1,98	9,0	4,9	1,82	9,6	5,6	1,71
	-15	3,3	1,5	2,16	4,1	1,9	2,22	5,0	2,4	2,08	8,8	3,9	2,25	10,3	5,0	2,08	10,6	5,8	1,84
	-10	4,2	1,5	2,73	5,0	1,8	2,72	6,0	2,3	2,55	9,0	3,4	2,63	11,3	4,7	2,44	11,8	5,3	2,25
	-7	4,7	1,5	3,07	5,5	1,8	3,03	6,6	2,3	2,84	9,1	3,1	2,91	11,9	4,5	2,68	12,6	5,0	2,53
	-2	4,8	1,4	3,56	6,2	1,8	3,44	7,4	2,3	3,24	9,6	2,9	3,29	11,4	3,7	3,06	12,1	4,2	2,86
	2	4,9	1,2	4,12	6,6	1,8	3,74	7,9	2,3	3,51	9,5	2,6	3,71	11,2	3,3	3,46	11,7	3,7	3,21
	7	5,3	1,0	5,30	8,5	1,8	4,61	10,2	2,4	4,33	11,9	2,3	5,21	15,1	3,1	4,92	16,6	3,5	4,81
	12	5,3	0,8	6,87	9,2	1,8	5,05	11,0	2,3	4,76	12,9	2,2	5,82	16,0	3,0	5,38	17,3	3,4	5,16
	15	5,5	0,8	7,20	10,0	1,8	5,60	12,0	2,3	5,28	14,0	2,2	6,36	17,3	3,0	5,85	18,8	3,4	5,60
	20	6,0	0,7	8,14	11,5	1,8	6,54	13,8	2,3	6,14	15,9	2,1	7,43	19,8	2,9	6,75	21,5	3,3	6,43
35	-20	2,2	1,7	1,29	3,1	2,1	1,47	3,7	2,7	1,38	7,3	4,1	1,80	8,9	5,3	1,70	9,7	5,9	1,64
	-15	3,1	1,7	1,80	4,0	2,1	1,94	4,8	2,6	1,82	8,7	4,3	2,03	10,2	5,3	1,91	10,6	6,2	1,71
	-10	4,0	1,7	2,36	4,8	2,0	2,37	5,8	2,6	2,23	8,8	3,8	2,34	11,1	5,0	2,20	11,7	5,7	2,04
	-7	4,6	1,7	2,81	5,3	2,0	2,64	6,4	2,6	2,48	8,8	3,4	2,57	11,7	4,9	2,40	12,3	5,4	2,28
	-2	4,8	1,5	3,13	6,1	2,0	3,10	7,3	2,5	2,92	9,2	3,2	2,88	11,1	4,1	2,72	11,8	4,6	2,55
	2	4,8	1,3	3,59	6,4	1,9	3,37	7,7	2,4	3,17	9,1	2,8	3,20	10,9	3,6	3,05	11,4	4,0	2,85
	7	5,1	1,1	4,57	8,4	2,0	4,20	10,0	2,5	3,94	11,4	2,6	4,46	14,6	3,3	4,36	16,1	3,7	4,30
	12	5,2	0,9	6,05	9,0	2,0	4,60	10,8	2,5	4,32	12,3	2,5	4,98	15,4	3,3	4,70	16,7	3,7	4,54
	15	5,3	0,8	6,53	9,8	1,9	5,12	11,7	2,4	4,80	13,3	2,5	5,44	16,7	3,3	5,11	18,2	3,7	4,92
	20	5,9	0,8	7,22	11,2	1,9	5,99	13,5	2,4	5,66	15,2	2,4	6,33	19,0	3,2	5,88	20,8	3,7	5,64
40	-20	2,2	1,9	1,15	2,9	2,4	1,24	3,5	3,0	1,16	7,3	4,5	1,63	8,8	5,6	1,57	9,6	6,3	1,52
	-15	3,2	1,9	1,67	3,8	2,3	1,64	4,5	2,9	1,54	8,5	4,7	1,82	9,7	5,6	1,75	9,9	6,2	1,59
	-10	4,0	1,9	2,12	4,7	2,3	2,10	5,7	2,9	1,98	8,5	4,1	2,07	10,8	5,4	1,99	11,2	6,0	1,87
	-7	4,5	1,9	2,40	5,3	2,2	2,38	6,4	2,8	2,24	8,5	3,8	2,26	11,4	5,3	2,14	12,0	5,9	2,05
	-2	4,6	1,7	2,71	6,0	2,1	2,82	7,3	2,7	2,66	8,8	3,5	2,51	10,8	4,5	2,41	11,5	5,1	2,27
	2	4,7	1,5	3,05	6,2	2,1	3,00	7,4	2,6	2,83	8,6	3,1	2,75	10,5	3,9	2,69	11,1	4,4	2,52
	7	5,0	1,3	3,82	8,2	2,2	3,80	9,8	2,7	3,58	11,2	2,8	3,95	13,9	3,7	3,74	15,5	4,2	3,71
	12	5,1	1,0	5,00	8,7	2,1	4,14	10,5	2,7	3,88	12,2	2,8	4,42	14,7	3,6	4,07	16,1	4,1	3,97
	15	5,2	1,0	5,27	9,5	2,1	4,55	11,4	2,7	4,27	13,2	2,7	4,83	16,0	3,6	4,43	17,5	4,1	4,30
	20	5,7	1,0	5,97	10,9	2,1	5,29	13,0	2,6	4,97	15,1	2,7	5,60	18,3	3,6	5,10	20,0	4,1	4,94
45	-20	2,2	2,1	1,01	2,8	2,5	1,10	3,3	3,2	1,03	6,8	4,7	1,44	7,2	5,6	1,28	7,7	6,3	1,22
	-15	2,9	2,2	1,36	3,6	2,5	1,47	4,3	3,1	1,39	7,8	4,7	1,67	8,9	5,6	1,60	9,6	6,3	1,53
	-10	3,8	2,1	1,81	4,6	2,4	1,91	5,5	3,1	1,80	8,0	4,3	1,87	10,2	5,6	1,83	10,7	6,3	1,71
	-7	4,3	2,1	2,10	5,2	2,4	2,19	6,3	3,0	2,06	8,2	4,1	2,01	11,0	5,6	1,97	11,4	6,3	1,82
	-2	4,5	1,9	2,41	5,7	2,3	2,50	6,8	2,9	2,34	8,6	3,8	2,25	10,5	4,8	2,17	11,4	5,5	2,06
	2	4,6	1,7	2,71	6,1	2,2	2,77	7,3	2,8	2,61	8,9	3,4	2,58	10,7	4,3	2,45	11,4	4,8	2,39
	7	4,9	1,4	3,40	8,0	2,3	3,43	9,5	3,0	3,22	11,0	3,2	3,48	13,6	4,1	3,29	15,2	4,6	3,29
	12	4,9	1,2	4,06	8,4	2,3	3,66	10,1	2,9	3,44	12,0	3,1	3,89	14,4	4,0	3,59	15,8	4,5	3,51
	15	5,1	1,2	4,22	9,1	2,3	4,03	10,9	2,9	3,78	13,1	3,1	4,24	15,6	4,0	3,90	17,1	4,5	3,81
	20	5,5	1,1	4,88	10,4	2,2	4,66	12,5	2,9	4,39	15,0	3,0	4,93	17,9	4,0	4,48	19,6	4,5	4,35
50	-20	2,1	2,3	0,89	2,7	2,6	1,05	3,3	3,2	1,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-15	2,9	2,3	1,22	3,5	2,5	1,40	4,2	3,2	1,32	6,9	4,7	1,47	8,2	5,6	1,47	8,8	6,3	1,40
	-10	3,6	2,3	1,57	4,5	2,5	1,80	5,3	3,2	1,69	7,6	4,6	1,64	9,2	5,6	1,65	9,7	6,3	1,55
	-7	4,1	2,3	1,78	5,0	2,5	2,04	6,0	3,1	1,91	8,0	4,6	1,74	9,8	5,6	1,75	10,3	6,3	1,63
	-2	4,3	2,1	2,03	5,6	2,4	2,35	6,7	3,0	2,22	8,6	4,3	2,00	10,2	5,2	1,95	10,4	5,8	1,81
	2	4,4	1,9	2,29	6,0	2,3	2,61	7,2	2,9	2,45	8,4	3,8	2,21	10,3	4,7	2,19	11,0	5,4	2,04
	7	4,7	1,7	2,83	7,5	2,4	3,14	9,0	3,1	2,94	10,7	3,5	3,03	13,4	4,6	2,93	14,5	5,1	2,86
	12	4,7	1,5	3,22	8,0	2,4	3,35	9,6	3,1	3,15	11,7	3,5	3,38	14,2	4,4	3,19	15,1	5,0	3,05
	15	4,8	1,4	3,47	8,7	2,4	3,65	10,4	3,0	3,43	12,7	3,5	3,69	15,4	4,5	3,46	16,4	5,0	3,31
	20	5,2	1,3	3,92	9,9	2,4	4,19	11,9	3,0	3,94	14,2	3,4	4,16	17,2	4,4	3,87	18,8	5,0	3,78
55	-15	2,6	2,4	1,08	3,3	2,6	1,28	3,9	3,3	1,20	4,5	4,8	0,94	6,6	6,2	1,06	7,0	7,1	0,98
	-10	3,4	2,4	1,39	4,1	2,5	1,61	4,9	3,2	1,52	6,3	4,7	1,34	8,2	5,8	1,41	8,6	6,6	1,31
	-7	3,8	2,4	1,58	4,6	2,5	1,82	5,5	3,2	1,71	7,1	4,7	1,52	8,7	5,6	1,56	9,2	6,3	1,46
	-2	4,1	2,2	1,85	5,1	2,5	2,09	6,2	3,1	1,96	7,8	4,6	1,70	8,9	5,2	1,70	9,3	5,8	1,62
	2	4,3	2,0	2,11	5,5	2,4	2,29	6,6	3,1	2,15	7,6	4,2	1,81	9,8	5,2	1,90	10,3	5,8	1,78
	7	4,5	1,8	2,58	7,1	2,5	2,85	8,5	3,2	2,69	10,0	3,9	2,54	12,7	5,1	2,52	13,9	5,6	2,48
	12	4,6	1,5	3,01	7,5	2,5	3,04	9,0	3,2	2,87	11,0	3,9	2,84	13,5	4,9	2,75	14,5	5,5	2,64
	15	4,6	1,5	3,13	8,1	2,5	3,30	9,8	3,2	3,10	12,0	3,9	3,11	14,7	4,9	2,99	15,8	5,5	2,86
	20	4,9	1,5	3,37	9,3	2,5	3,77	11,2	3,2	3,55	13,5	3,8	3,51	16,4	4,9	3,33	18,1	5,5	3,27

Hoval Thermalia® comfort (6-17)

Angaben gemäss EN14511

Typ tVL °C	tQ °C	Qh kW	(6) P kW	COP	Qh kW	(8) P kW	COP	Qh kW	(10) P kW	COP	Qh kW	(13) P kW	COP	Qh kW	(17) P kW	COP	
30	Brine (Sole)	-5	5,1	1,2	4,28	6,7	1,5	4,34	9,7	2,0	4,97	11,9	2,5	4,73	15,0	3,4	4,42
		-2	5,6	1,2	4,65	7,3	1,5	4,75	10,4	2,0	5,24	12,9	2,5	5,07	16,4	3,4	4,87
		0	5,9	1,2	4,90	7,7	1,5	5,03	10,8	2,0	5,41	13,5	2,6	5,29	17,4	3,4	5,18
		2	6,3	1,2	5,14	8,1	1,5	5,33	11,2	2,0	5,60	14,3	2,6	5,58	18,3	3,4	5,38
		5	6,8	1,2	5,49	8,9	1,5	5,78	11,8	2,0	5,89	15,4	2,6	6,00	19,6	3,4	5,68
	Wasser	7	6,5	1,2	5,47	8,9	1,5	5,95	12,4	1,9	6,49	16,1	2,7	5,97	21,7	3,5	6,23
		10	7,2	1,2	5,96	9,7	1,5	6,52	12,9	1,9	6,79	17,7	2,6	6,93	22,6	3,5	6,43
		12	7,6	1,2	6,29	10,2	1,5	6,92	13,2	1,7	7,75	18,8	2,4	7,87	23,3	3,5	6,56
		15	8,2	1,2	6,78	11,0	1,5	7,52	14,0	1,7	8,44	20,2	2,4	8,50	24,2	3,6	6,75
		35	Brine (Sole)	-5	5,1	1,3	3,91	6,6	1,7	3,95	9,5	2,1	4,42	11,7	2,7	4,29	14,9
-2	5,5			1,3	4,24	7,2	1,7	4,31	10,1	2,2	4,66	12,7	2,8	4,60	16,3	3,6	4,47
0	5,8			1,3	4,45	7,6	1,7	4,55	10,6	2,2	4,81	13,4	2,8	4,81	17,2	3,6	4,72
2	6,2			1,3	4,68	8,0	1,7	4,81	10,9	2,2	4,96	14,1	2,8	5,06	18,0	3,7	4,92
5	6,7			1,3	5,01	8,7	1,7	5,20	11,5	2,2	5,19	15,2	2,8	5,44	19,4	3,7	5,20
Wasser	7		6,6	1,3	5,00	8,9	1,7	5,38	12,1	2,1	5,78	16,0	3,0	5,37	21,3	3,8	5,66
	10		7,1	1,3	5,43	9,6	1,6	5,87	12,7	2,1	6,08	17,5	2,8	6,28	22,3	3,8	5,88
	12		7,5	1,3	5,71	10,1	1,6	6,21	13,1	1,9	6,73	18,5	2,7	6,96	23,0	3,8	6,02
	15		8,0	1,3	6,14	10,8	1,6	6,71	13,9	1,9	7,27	19,8	2,7	7,49	24,1	3,9	6,23
	40		Brine (Sole)	-5	4,9	1,4	3,46	6,5	1,9	3,46	9,1	2,4	3,75	11,5	3,1	3,76	14,7
-2		5,4		1,4	3,72	7,1	1,9	3,76	9,8	2,5	3,95	12,5	3,1	4,03	16,0	4,0	3,97
0		5,7		1,5	3,90	7,4	1,9	3,97	10,2	2,5	4,08	13,1	3,1	4,21	16,9	4,1	4,15
2		6,0		1,5	4,10	7,8	1,9	4,18	10,5	2,5	4,19	13,8	3,1	4,43	17,7	4,1	4,33
5		6,5		1,5	4,40	8,5	1,9	4,49	11,0	2,5	4,36	14,9	3,1	4,76	19,0	4,1	4,60
Wasser		7	6,6	1,5	4,43	8,9	1,9	4,71	11,8	2,4	4,93	15,9	3,2	4,91	20,8	4,2	4,95
		10	7,0	1,5	4,77	9,5	1,9	5,09	12,5	2,4	5,23	17,2	3,1	5,48	21,9	4,2	5,19
		12	7,4	1,5	5,00	9,9	1,9	5,36	12,9	2,3	5,60	18,1	3,1	5,89	22,6	4,2	5,34
		15	7,8	1,5	5,35	10,6	1,8	5,75	13,7	2,3	5,99	19,3	3,1	6,31	23,8	4,3	5,57
		45	Brine (Sole)	-5	4,8	1,6	3,08	6,4	2,1	3,07	8,8	2,7	3,23	11,3	3,4	3,33	14,6
-2	5,3			1,6	3,30	6,9	2,1	3,33	9,4	2,8	3,40	12,3	3,4	3,57	15,7	4,4	3,55
0	5,6			1,6	3,45	7,3	2,1	3,50	9,8	2,8	3,51	12,9	3,5	3,73	16,5	4,5	3,69
2	5,9			1,6	3,63	7,6	2,1	3,67	10,1	2,8	3,59	13,6	3,5	3,92	17,4	4,5	3,86
5	6,3			1,6	3,91	8,2	2,1	3,93	10,5	2,8	3,71	14,7	3,5	4,21	18,6	4,5	4,10
Wasser	7		6,6	1,7	3,98	8,9	2,1	4,18	11,5	2,7	4,27	15,8	3,5	4,51	20,2	4,6	4,38
	10		7,0	1,6	4,25	9,4	2,1	4,49	12,3	2,7	4,57	16,9	3,5	4,85	21,5	4,6	4,62
	12		7,2	1,6	4,43	9,8	2,1	4,69	12,8	2,7	4,77	17,7	3,5	5,08	22,3	4,7	4,79
	15		7,6	1,6	4,71	10,3	2,1	5,00	13,5	2,7	5,08	18,9	3,5	5,42	23,5	4,7	5,03
	50		Brine (Sole)	-5	4,7	1,7	2,73	6,2	2,3	2,71	8,6	3,0	2,86	11,1	3,8	2,95	14,3
-2		5,1		1,7	2,92	6,7	2,3	2,93	9,2	3,1	3,01	12,0	3,8	3,17	15,6	4,9	3,18
0		5,4		1,8	3,04	7,1	2,3	3,07	9,6	3,1	3,11	12,6	3,8	3,30	16,4	5,0	3,32
2		5,7		1,8	3,20	7,4	2,3	3,21	9,9	3,1	3,17	13,3	3,8	3,47	17,3	5,0	3,47
5		6,2		1,8	3,44	8,0	2,3	3,42	10,3	3,1	3,27	14,3	3,9	3,71	18,6	5,0	3,69
Wasser		7	6,4	1,8	3,54	8,6	2,4	3,63	11,4	3,0	3,74	15,5	3,9	3,97	19,6	5,1	3,83
		10	6,8	1,8	3,75	9,2	2,4	3,88	12,1	3,0	3,99	16,6	3,9	4,25	20,9	5,1	4,06
		12	7,1	1,8	3,90	9,5	2,4	4,05	12,6	3,0	4,15	17,3	3,9	4,43	21,7	5,2	4,20
		15	7,5	1,8	4,11	10,1	2,3	4,30	13,3	3,0	4,39	18,4	3,9	4,71	23,0	5,2	4,42
		55	Brine (Sole)	-5	4,5	1,9	2,44	5,9	2,5	2,40	8,4	3,3	2,55	10,9	4,1	2,64	14,0
-2	4,9			1,9	2,60	6,5	2,5	2,59	9,0	3,4	2,69	11,8	4,2	2,83	15,4	5,4	2,87
0	5,2			1,9	2,70	6,9	2,5	2,72	9,4	3,4	2,78	12,4	4,2	2,96	16,3	5,4	3,01
2	5,5			1,9	2,84	7,2	2,6	2,83	9,7	3,4	2,83	13,0	4,2	3,09	17,2	5,5	3,15
5	6,0			2,0	3,05	7,8	2,6	3,00	10,1	3,5	2,92	13,9	4,2	3,30	18,5	5,5	3,35
Wasser	7		6,3	2,0	3,18	8,4	2,6	3,19	11,2	3,4	3,33	15,2	4,3	3,53	19,0	5,6	3,39
	10		6,7	2,0	3,35	8,9	2,6	3,40	11,9	3,4	3,52	16,2	4,3	3,76	20,3	5,7	3,59
	12		6,9	2,0	3,46	9,3	2,6	3,54	12,4	3,4	3,65	16,9	4,3	3,91	21,1	5,7	3,72
	15		7,3	2,0	3,63	9,9	2,6	3,75	13,1	3,4	3,85	17,9	4,3	4,14	22,4	5,7	3,92
	62		Brine (Sole)	-5	4,4	2,0	2,13	5,9	2,8	2,13	8,2	3,7	2,20	10,6	4,6	2,29	13,8
-2		4,7		2,1	2,31	6,4	2,8	2,27	8,8	3,8	2,32	11,5	4,7	2,45	15,3	5,9	2,58
0		5,0		2,1	2,42	6,8	2,9	2,36	9,1	3,8	2,40	12,0	4,7	2,56	16,3	6,0	2,70
2		5,3		2,1	2,54	7,1	2,9	2,43	9,4	3,8	2,45	12,6	4,7	2,67	17,1	6,0	2,83
5		5,7		2,1	2,70	7,6	3,0	2,54	9,8	3,9	2,52	13,4	4,8	2,83	18,3	6,0	3,04
Wasser		7	5,9	2,1	2,76	8,2	2,9	2,85	11,0	3,9	2,86	14,8	4,9	3,04	18,3	6,1	3,01
		10	6,3	2,2	2,91	8,7	2,9	3,01	11,7	3,9	3,02	15,7	4,9	3,21	19,7	6,2	3,19
		12	6,6	2,2	3,03	9,1	2,9	3,15	12,2	3,9	3,12	16,3	4,9	3,33	20,6	6,2	3,32
		15	7,0	2,2	3,20	9,7	2,9	3,35	12,9	3,9	3,27	17,2	4,9	3,51	21,9	6,2	3,51

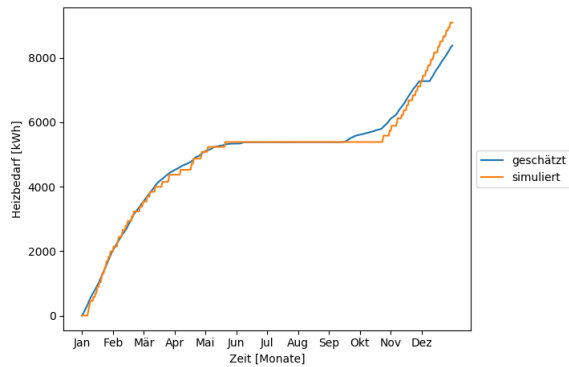
A3 Wetterstationen Bravo

Ort	Breitengrad	Längengrad
Aadorf	47.48843	8.90354
Altdorf	46.88213	8.64284
Badragaz	47.00341	9.50111
Basel	47.5596	7.58858
Bern	46.94797	7.44745
Beznau	47.552	8.23
Bischoffszell	47.4927	9.24365
Buchs	47.16554	9.47086
Cham	47.18123	8.45921
Chasseral	47.13301	7.05936
Chur	46.85078	9.53199
Disentis	46.70511	8.85238
Fahy	47.418	6.95023
Fribourg	46.80648	7.16197
Geneve	46.20439	6.14316
Giswil	46.83821	8.18728
Glarus	47.04043	9.06721
Gösgen	47.3813	7.92789
Ilanz	46.77421	9.20474
Interlaken	46.68635	7.8632
Konstanz	47.67795	9.17324
Koppingen	47.13372	7.60179
Lachauxdefonds	47.10349	6.83278
Langnau	46.93786	7.79068
Lausanne	46.51965	6.63227
Leibstadt	47.58994	8.17318
Locarno	46.167	8.79426
Lugano	46.00368	8.95105
Luzern	47.05017	8.30931
Luzern-fixed	47.05017	8.30931
Mathod	46.76743	6.56563
Möhlín	47.55913	7.84425
Mühleberg	46.95484	7.26248
Neuchatel	46.98999	6.92927
Nyon	46.38327	6.23479
Schaffhausen	47.69589	8.63805
Schüpfheim	46.95199	8.01636
Sion	46.23312	7.36063
St.Gallen	47.42448	9.37672
Vaduz	47.14103	9.52093

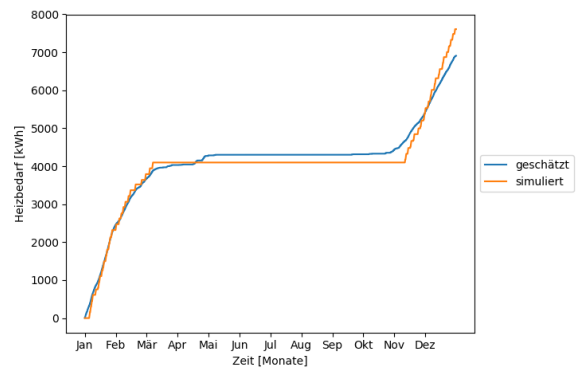
Vevey	46.46283	6.84192
Wädenswil	47.22969	8.67182
Würelingen	47.53387	8.25457
Wynau	47.25714	7.82102
Zürichflutern	47.38202	8.56635
Zürichkloten	47.44951	8.58216

A4 Grafiken zu Heizleistungszeitreihen

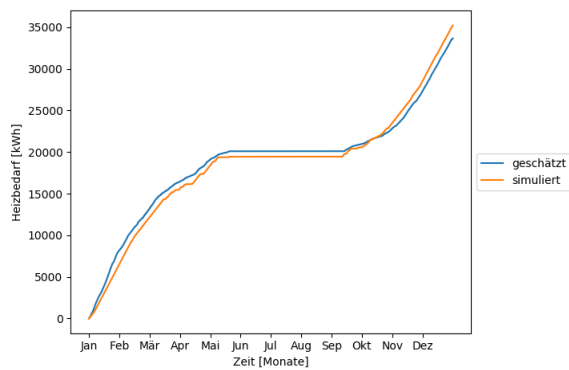
Gebäude 1



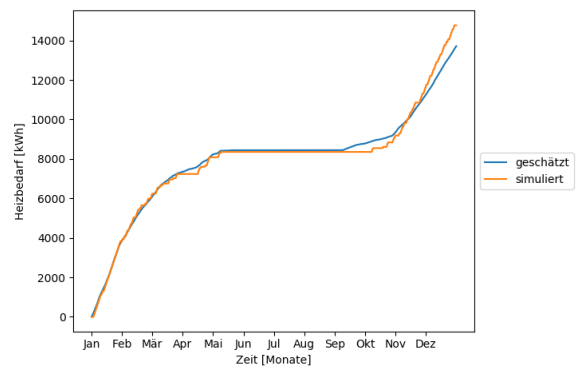
Gebäude 2



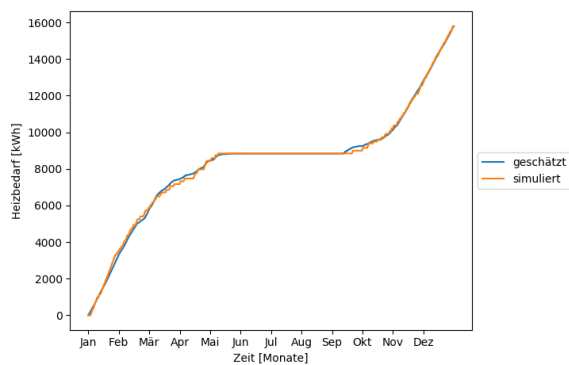
Gebäude 3



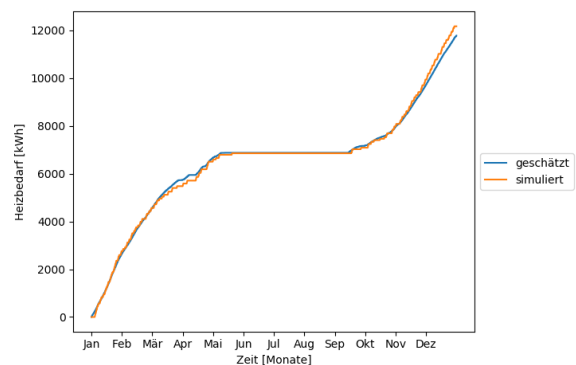
Gebäude 4



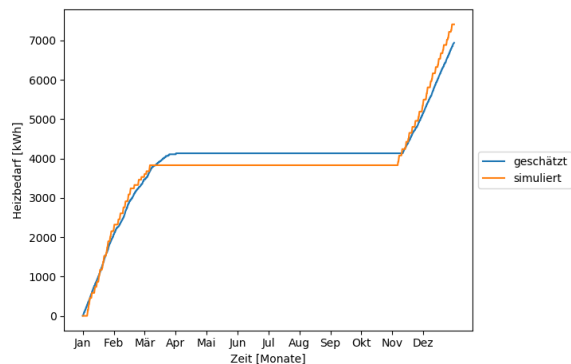
Gebäude 6



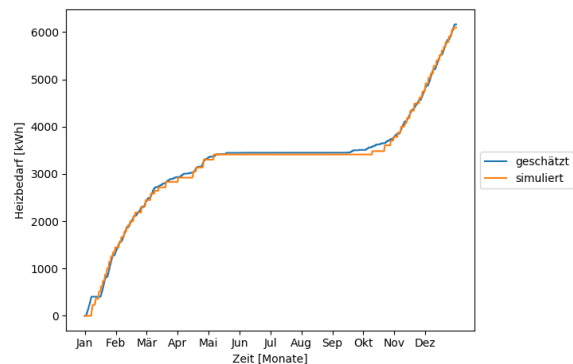
Gebäude 7



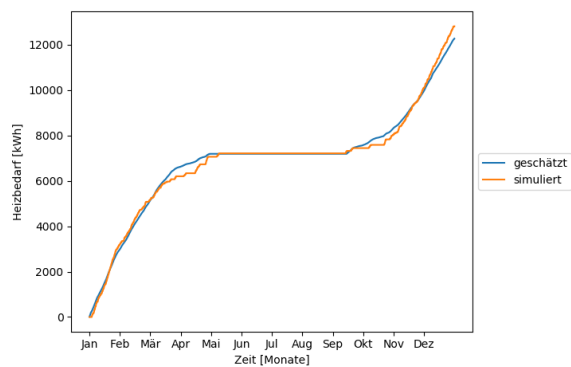
Gebäude 8



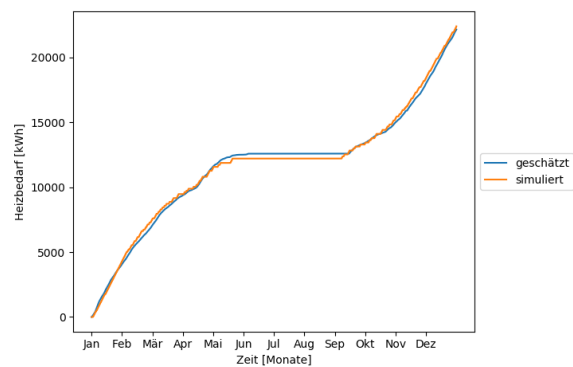
Gebäude 9



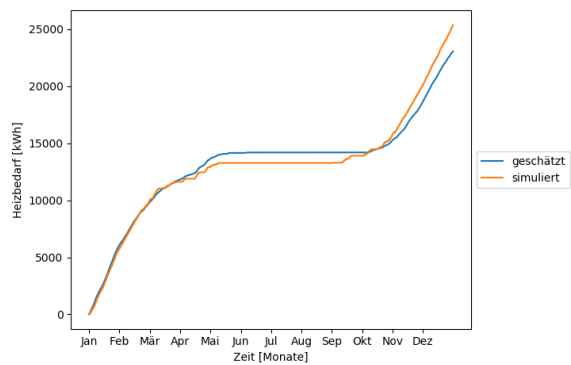
Gebäude 10



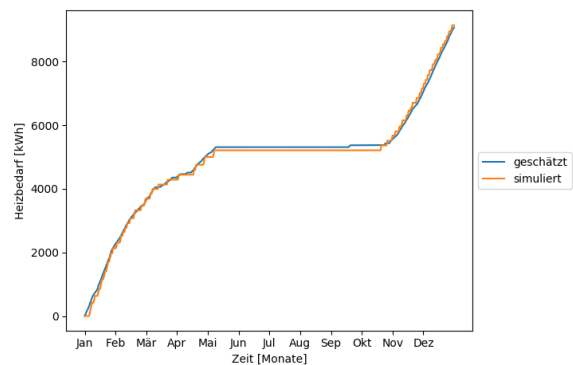
Gebäude 11



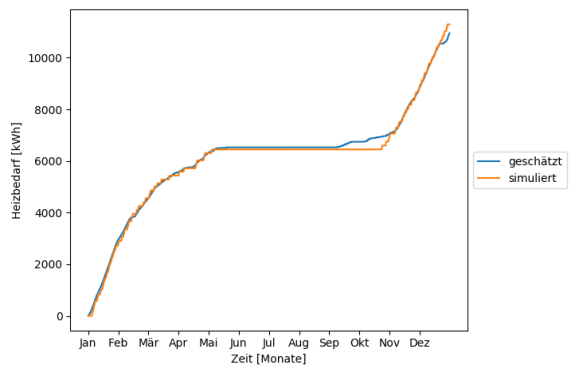
Gebäude 12



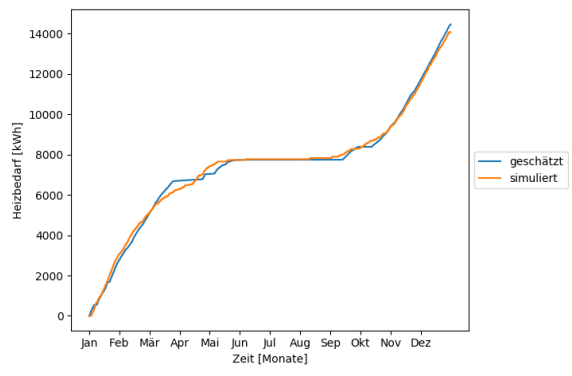
Gebäude 13



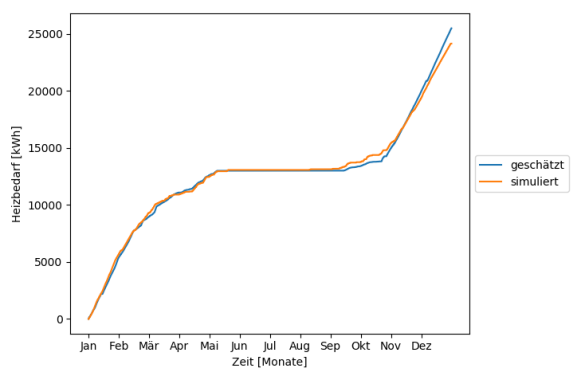
Gebäude 14



Gebäude 15



Gebäude 16



Gebäude 17

