

Hochschule Luzern  
Departement Technik & Architektur

Studiengang Maschinentechnik

---

**Thermische Speicherfähigkeit von  
Gebäuden aus zeitaufgelösten  
Energieverbrauchsdaten**

---

**Bachelor-Thesis** im Themengebiet  
Thermische Energiespeicher  
(BAT)

*Author:*

Michael ULRICH

*Betreuer:*

Prof. Dr. Philipp SCHÜTZ  
Andreas MELILLO

*Experte:*

Dr. Kai LIEBALL

Horw, 5. Juli 2019



# 1 Formelverzeichnis

|            |                               |            |
|------------|-------------------------------|------------|
| <i>g</i>   | Gesamtenergiedurchlassfaktor  | –          |
| <i>C</i>   | Kapazität                     | $J/(Km^2)$ |
| <i>H</i>   | Transmissionswärmekoeffizient | $W/(Km^2)$ |
| <i>COP</i> | Leistungszahl                 | –          |

## Abkürzungen

|            |                          |
|------------|--------------------------|
| <i>WP</i>  | Wärmepumpe               |
| <i>SW</i>  | Sole Wasser Wärmepumpe   |
| <i>WW</i>  | Wasser Wasser Wärmepumpe |
| <i>LW</i>  | Luft Wasser Wärmepumpe   |
| <i>SH</i>  | space heating            |
| <i>DHW</i> | domestic hot water       |

# Abstract

## 1.1 Deutsch

In der vorliegenden Arbeit wird der Heizwärmebedarf aus Verbrauchszeitreihen von 40 Wärmepumpen aus verschiedenen Gebäuden ermittelt. Für die Separation des Heizwärmebedarfs und des Brauchwarmwasserbedarfs existiert bereits ein teilweise funktionierendes Verfahren, welches vom Verfasser geprüft worden ist. Anschliessend sind die erfolgreich klassifizierten Objekte als Richtwert für die Entwicklung eines neuen Verfahrens verwendet worden. Über ein Jahr lang ist der aufsummierte Heimwärmebedarf des alten Verfahrens mit demjenigen des neuen verglichen worden. Daraus sind vielversprechende Ergebnisse resultiert. Die Verbrauchsspuren weisen meist nur geringfügige Abweichungen zueinander auf. Anschliessend ist aus dem extrahierten Heizwärmebedarf, mit einem bereits entwickelten Simulationstool, ein Gebäudemodell erstellt worden. Obwohl der Heizwärmebedarf aus den beiden Separationsverfahren nahezu identisch ist, erzeugt das Simulationstool sehr unterschiedliche Gebäudemodelle.

## 1.2 English

In this paper, the heating demand is determined from consumption time series of 40 heat pumps from different buildings. For the separation of the heating demand and the domestic hot water demand a partially functioning procedure already exists, which was examined by the author. Subsequently, the successfully classified objects were used as a guideline for the development of a new process. For more than a year, the total home heating requirement of the old process was compared with that of the new one. The results are promising. The traces of consumption usually show only minor deviations from each other. Subsequently, a building model was created from the extracted heat demand using a simulation tool that had already been developed. Although the heating demand from the two separation processes is almost identical, the simulation tool generates very different building models.

# Inhaltsverzeichnis

|   |            |
|---|------------|
| <b>Selbstständigkeitserklärung</b>                        | <b>i</b>   |
| <b>1 Formelverzeichnis</b>                                | <b>ii</b>  |
| <b>Abstract</b>   | <b>iii</b> |
| 1.1 Deutsch . . . . .                                     | iii        |
| 1.2 English . . . . .                                     | iii        |
| <b>2 Einleitung</b>                                       | <b>vi</b>  |
| 2.1 Motivation . . . . .                                  | vi         |
| 2.2 Stand der Forschung . . . . .                         | vii        |
| 2.3 Zielsetzung . . . . .                                 | vii        |
| <b>3 Methode</b>  | <b>2</b>   |
| 3.1 Abschätzung Warmwasserbedarf . . . . .                | 2          |
| 3.2 Daten . . . . .                                       | 2          |
| 3.2.1 Wärmepumpenverbrauchszeitreihen . . . . .           | 2          |
| 3.2.2 Metadaten . . . . .                                 | 2          |
| 3.2.3 Wetterdaten . . . . .                               | 2          |
| 3.3 Plan: Zyklen Erkennung . . . . .                      | 3          |
| 3.4 Plan: Konstanter DHW Tagesverbrauch . . . . .         | 4          |
| 3.5 Gebäudemodell . . . . .                               | 4          |
| <b>4 Resultate</b>  | <b>6</b>   |
| 4.1 Daten . . . . .                                       | 6          |
| 4.2 Überprüfung des Plans: Zyklen Erkennung . . . . .     | 6          |
| 4.3 Extrahierung der SH Spur . . . . .                    | 7          |
| 4.3.1 Ferienerkennung . . . . .                           | 9          |
| 4.4 Gebäudemodell . . . . .                               | 11         |
| <b>5 Schlussfolgerung</b>                                 | <b>13</b>  |
| 5.1 Stärken . . . . .                                     | 13         |
| 5.1.1 Vollautomatische SH Separierung . . . . .           | 13         |
| 5.1.2 Stabile Separierung der Wärmespur . . . . .         | 13         |
| 5.2 Schwächen . . . . .                                   | 13         |
| 5.2.1 Konstanter COP für SW und WW . . . . .              | 13         |
| 5.2.2 Verfälschter DHW beim Plan konstanter DHW . . . . . | 13         |
| 5.3 Verbesserungsmöglichkeiten . . . . .                  | 13         |
| 5.3.1 Variabler COP für SW und WW . . . . .               | 13         |
| 5.3.2 Verbesserte DHW Ermittlung . . . . .                | 14         |
| 5.3.3 Verbraucherstudie . . . . .                         | 15         |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.3.4 Höhen abhängige Temperatur . . . . . | 15        |
| 5.4 Ausblick . . . . .                     | 15        |
| 5.5 Fazit . . . . .                        | 16        |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>               | <b>17</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>                 | <b>18</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                | <b>19</b> |
| <b>6 Danksagung</b>                        | <b>20</b> |
| <b>A Metadaten</b>                         | <b>21</b> |
| <b>B DHW Sommer Wochendarstellung</b>      | <b>23</b> |
| <b>C Metadaten</b>                         | <b>25</b> |

## 2 Einleitung

### 2.1 Motivation

Um die Ziele der Energiestrategie 2050 zu erreichen, muss unter anderem der Heizenergiebedarf der Schweizer Gebäude gesenkt werden. Aktuell verursachen die Privathaushalte rund 27.8 % des schweizerischen Gesamtenergieverbrauchs. Davon werden 70 % für die Raumwärme benötigt [5].

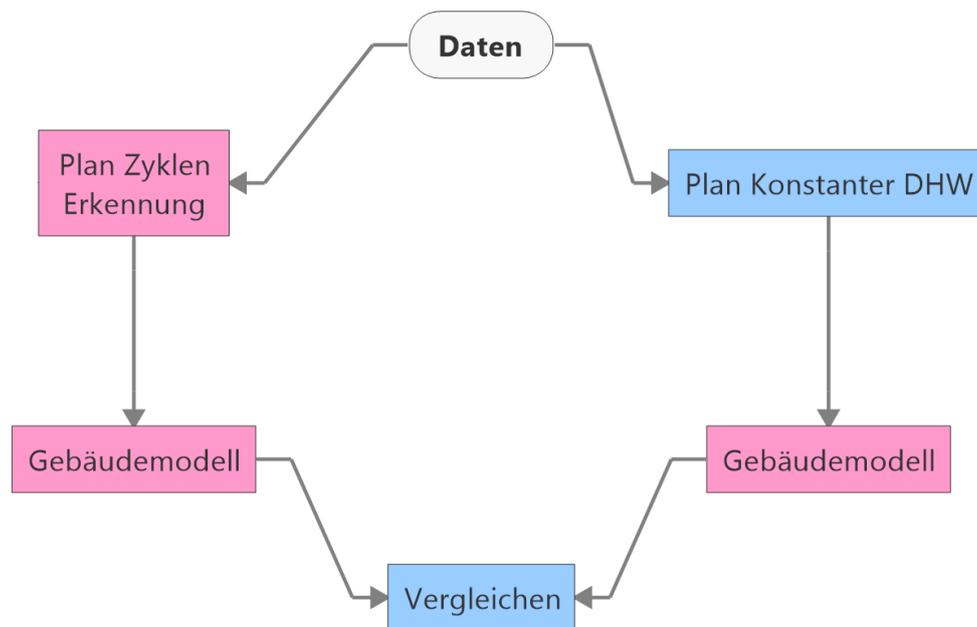
Im Gebäudepark der Schweiz sind in etwa 75 % der Wohnbauten vor 1980 erstellt worden. Daher entspricht die Gebäudehülle oftmals dem Stand der Technik zum Zeitpunkt der Erbauung. Neubauten benötigen zum heutigen Zeitpunkt nur noch einen Viertel der Heizenergie. Dies ist auf eine optimierte Isolation sowie Lüftung zurückzuführen. Auch unter dem Begriff *minergie* Häuser bekannt [3].

Die tiefe Renovationsrate der Schweiz von 1.5 % ist dafür verantwortlich, dass der Raumwärmebedarf nur geringfügig sinkt und somit die Ziele für die Energieeinsparungen nur schwer erreicht werden können [5].

Um sanierungswürdige Liegenschaften flächendeckend zu identifizieren, ist eine der zentralen Herausforderungen, die thermischen Eigenschaften der Gebäude in der Schweiz zu bestimmen. [9]

## 2.2 Stand der Forschung

In diesem Projekt wurde schon einiges an Vorarbeit geleistet, so sind alle rosagefärbten Elemente aus der Abbildung 2.1 bereits entwickelt worden. Alle blaugefärbten Elemente sowie die Verknüpfung zwischen Plan Zyklen Erkennung und Gebäudemodell werden in dieser Thesis erläutert.



**Abbildung 2.1:** Die rosa Felder sind bereits entwickelt worden. Die blauen Felder werden in dieser Thesis erläutert.

## 2.3 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob relevante Gebäudeparameter und Benutzerprofile aus den Energieverbrauchsdaten bestimmt werden können.

Ausgangspunkt für diese Arbeit ist ein am CC-TES entwickelter Prototyp, den es bei realen Messresultaten zu testen und erweitern gilt. Ein bestehendes Verfahren extrahiert aus den Verbrauchsdaten nur den Heizwärmebedarf. Für dieses Verfahren wird eine Übersicht über die Erfolgsrate und dessen Anwendbarkeit erstellt. Es wird eine weitere Methode entwickelt, wie man den Heizwärmebedarf extrahieren kann. Ein Vergleich soll zeigen, welches der beiden Verfahren sich besser für die Aufgabe eignet. Mit einem bereits entwickeltem Verfahren wird aus dem Heizwärmebedarf die Gebäudeeigenschaften geschätzt.

Anschliessend werden die gemachten Schätzungen mit einigen realen Gebäuden verglichen. So kann eine Aussage über die Verlässlichkeit des Verfahrens gefällt werden.

In einem letzten Schritt wird untersucht, wie genaue Vorhersagen für die Systemtypen (Gebäude und Heizsystem) gemacht werden können.

# 3 Methode

## 3.1 Abschätzung Warmwasserbedarf

Von tiko Energy Solutions werden Verbrauchszeitreihen von Wärmepumpen bereitgestellt. Aus diesen Verbrauchszeitreihen soll der Wärmebedarf für das Heizwarmwasser ermittelt werden. Der elektrische Verbrauch von LW wird mit einem temperaturabhängigen COP multipliziert, siehe Formel 3.1. Bei SW und WW wird mit einem konstanten COP von 4.4 gerechnet. Aus dem Zusammenhang in der Formel 3.2 resultiert die produzierte Wärmemenge für die Gebäudeheizung. In einem bereits entwickeltem Hausmodell werden mit Hilfe des Wärmebedarfs die wichtigsten Gebäudeeigenschaften wie Kapazität, solarer Beitrag und Wärmeverluste ermittelt.

$$COP = \zeta_{WP} \frac{T_K}{T_K(T_{VL}) - T_V(T_U)} = \zeta_{WP} \frac{T_K}{\Delta T_{HUB}(T_{VL}, T_U)} \quad (3.1)$$

$$\dot{Q}_{gen} = P_{el} * COP \quad (3.2)$$

## 3.2 Daten

### 3.2.1 Wärmepumpenverbrauchszeitreihen

Die Grundlage der Arbeit bilden elektrische Verbräuche von 40 Wärmepumpen in verschiedenen Gebäuden. Die Verbrauchsdaten sind lückenlos und weisen eine Sekundenauflösung auf. Von den meisten Gebäuden stehen Daten ab dem Jahr 2016 zur Verfügung. Die Daten werden vom Unternehmen tiko Energy Solutions AG zur Verfügung gestellt.

### 3.2.2 Metadaten

Die Metadaten (Anhang A) geben vollständigen Aufschluss über den Standort der Wärmepumpe. Es befinden sich nur bedingt Angaben zum Typ der Wärmepumpe (LW, SW oder WW), zum Hersteller und über den Emitter Typ (z.B. Radiator) im Anhang.

### 3.2.3 Wetterdaten

Für das Simulieren der Gebäudeeigenschaften sind Wetterdaten unabdingbar. Hierzu wird die nächst gelegene zur Verfügung stehende Wetterstation von Meteo Swiss ermittelt. Es sind die Postleitzahlen von den Wetterstationen und von den Wärmepumpen bekannt. Weiter liegen die Landeskoordinaten von den Zentren der Ortschaften mit den

dazugehörigen Postleitzahlen vor. Die Luftdistanzen zwischen den Gebäuden und allen Wetterstationen wird über die Formel 3.3[2] berechnet. Die Wetterstation, welche am nächsten liegt, wird der Wärmepumpe zugeordnet.

$$\text{Distanz} = 6378.388 * \arccos(\sin(b1) * \sin(b2) + \cos(b1) * \cos(b2) * \cos(l2 - l1)) \quad (3.3)$$

$$\text{Breitengrad1} = b1[\text{rad}], \text{Längengrad1} = l1[\text{rad}]$$

$$\text{Breitengrad2} = b2[\text{rad}], \text{Längengrad2} = l2[\text{rad}]$$



Abbildung 3.1: Die roten Punkte sind die Standorte der Wärmepumpen und die blauen diejenige aller Wetterstationen.[1]

### 3.3 Plan: Zyklen Erkennung

Um die Heizspur aus der Verbrauchszeitreihe zu isolieren, wurde bereits ein komplexes Verfahren an der HSLU von Roman Durrer entwickelt. Dieses Programm erkennt an der Form und Häufigkeit der Verbrauchsspur, ob es sich um einen Brauchwarmwasser / domestic hot water (DHW) oder Heizwarmwasser / space heating (SH) Zyklus handelt. In der Abbildung 3.2 ist eine Verbrauchsspur abgebildet. SH Zyklen kommen in der Regel häufiger vor. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Leistungsspitze der Zyklen. Meistens ist das DHW wärmer als das SH Wasser. Der rot markierte Zyklus kommt häufig vor und hat eine tiefe Leistung. Deswegen kann man davon ausgehen, dass es sich um einen SH Zyklus handelt.

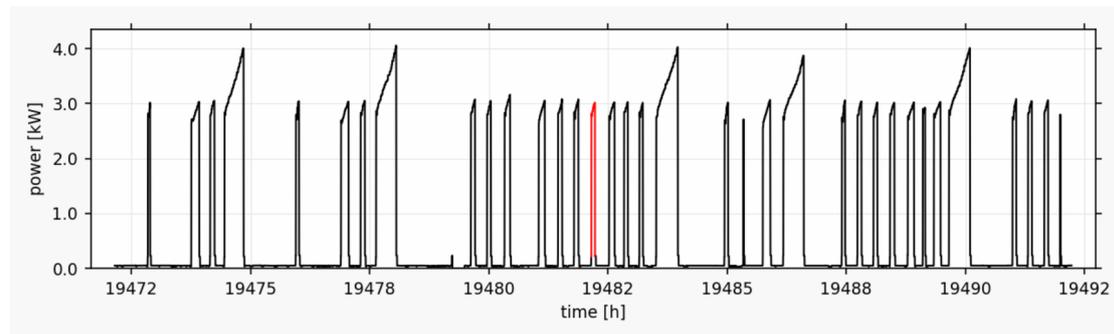


Abbildung 3.2: Verbrauchsspur einer Wärmepumpe.

Das Programm verfügt über zwei Modi. Beim vollautomatischen Modus wird die SH Spur automatisch mit einem machine learning Algorithmus berechnet. Beim halbautomatischen Modus wird der machine learning Algorithmus manuell angeleitet. Das Programm selektiert einen Zyklus, wie in der Abbildung 3.2 rot markiert, in der Verbrauchszeitreihe. Der Benutzer entscheidet, ob es sich um einen SH oder DHW Zyklus handelt. Nachdem genügend DHW und SH Zyklen erkannt worden sind, wird die SH Spur berechnet.[8]

### 3.4 Plan: Konstanter DHW Tagesverbrauch

Eine Alternative zum Plan Zyklen Erkennung, welcher im Kapitel 3.3 erläutert wurde, bietet der Plan Konstanter DHW. Das Ziel ist das selbe. Es wird wie im Plan Zyklen Erkennung aus der Verbrauchszeitreihe die SH Spur extrahiert.

Es wird der Durchschnittsverbrauch pro Stunde über die Sommermonate ermittelt. Dieser Verbrauch wird jeder Stunde im Jahr abgezogen. Falls der stündlich berechnete Verbrauch negativ ausfällt, wird der negative Anteil von der nächsten Stunde abgezogen, siehe Code 3.1. Nachdem der DHW von der Wärmespur abgezogen worden ist, resultiert eine Spur, die im Mittel keinen DHW-Anteil mehr enthält.

```
ueberschuss = 0
for i in range(len(waermespur_hr)):
    waermespur_hr[i] = waermespur_hr[i] - dhw_hr + ueberschuss
    ueberschuss = 0
    if waermespur_hr[i] < 0:
        ueberschuss = waermespur_hr[i]
        waermespur_hr[i] = 0
```

Listing 3.1: Code für die Isolierung der SH Spur.

### 3.5 Gebäudemodell

Im Rahmen einer Bachelor Arbeit wurde ein Verfahren an der HSLU entwickelt, welches die Kapazität  $C$ , Verluste  $H$  und solare Beiträge  $g$  eines Gebäudes ermittelt, siehe Formel 3.4.

Die Kapazität  $C$  beschreibt die Speicherfähigkeit des Gebäudes. Die Verluste des Gebäudes sind linear abhängig vom Temperaturgefälle zwischen der Soll 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 Abwärme von elektrischen Geräten und Bewohnern. Da die Benutzung der Geräte und die Anwesenheit von Bewohnern ändert, sind diese Grössen zeitabhängig.[9]

Die Input Parameter sind Wetterdaten und aufsummierte Heizwärme. Weiter benötigt das Programm Startwerte für die Simulation.

$$C \frac{\partial T_R}{\partial t} = -H(T_R(t) - T_U(t)) - g * I(t) + \dot{Q}_{H(t)} + \dot{Q}_{intern(t)} \quad (3.4)$$

Die Startwerte  $g$  und  $H$  haben einen grossen Einfluss auf das Resultat der Methode. Um die Startwerte möglichst genau abzuschätzen, wird für eine Reihe von Startwerten für  $g$  und  $H$  eine Simulation ohne Optimierung durchgeführt. Daraus wird ein simulierter Wärmebedarf erzeugt und mit dem realen Wärmebedarf verglichen. Je ähnlicher die Kurven sind, desto besser sind die Startwerte. Mittels der L2-Norm [4] wird die Abweichung zwischen den beiden Verbrauchsspuren berechnet. Die beiden Startwerte ( $g$  und  $H$ ) mit der geringsten Abweichung wird mit einem rechenintensiven Programm optimiert. Um sicher zu sein, dass die Startwerte mit der geringsten Abweichung das bestmögliche Resultat erzeugen, werden die Startwerte mit der zweitkleinsten Abweichung auch optimiert. [6]

## 4 Resultate

In diesem Kapitel werden die Resultate zu den im Kapitel 3 vorgestellten Methoden präsentiert.

### 4.1 Daten

Die stündlich aufgelösten Wetterdaten sind nicht komplett. Es fehlen zwischen sechs bis 57 Einträge. Die fehlenden Daten sind mit Werten vom vorherigen Tag ersetzt worden. Welche Wetterdaten für welches Objekt benutzt worden sind, ist in der Tabelle 4.1 ersichtlich.

**Tabelle 4.1:** *Wetterdaten*

| ID | Wetterstation | Anzahl der fehlenden Einträgen |
|----|---------------|--------------------------------|
| 1  | Ilanz         | 15                             |
| 4  | Ilanz         | 15                             |
| 5  | Bad Ragaz     | 38                             |
| 19 | Aadorf        | 6                              |
| 12 | Bad Ragaz     | 38                             |
| 13 | Aadorf        | 6                              |
| 15 | St. Gallen    | 57                             |
| 17 | Chur          | 0                              |
| 18 | Aadorf        | 6                              |
| 3  | Koppingen     | 11                             |
| 6  | Zürich Kloten | 0                              |
| 7  | Basel         | 46                             |
| 11 | Koppingen     | 11                             |

### 4.2 Überprüfung des Plans: Zyklen Erkennung

Der Plan Zyklen Erkennung verfügt über einen halbautomatischen Klassifizierungsmodus. Um den Einfluss des Bedieners zu untersuchen, sind die Verbrauchszeitreihen von 40 Anlagen jeweils von drei Personen (Roman Durrer, Ivo Brand und Michael Ulrich) untersucht worden. Dabei ist vorerst geprüft worden, ob das Objekt mit dem Verfahren klassifiziert werden kann.

In einem nächsten Schritt sind die erfolgreich klassifizierte Daten genauer untersucht worden. Das Verfahren Zyklen Erkennung erkennt alle Zyklen und ordnet diese zu SH oder DHW zu. Um die Unterschiede zwischen den Benutzern zu quantifizieren, werden

die Zuordnungen nachfolgend miteinander verglichen. Die entsprechende Auswertung ist in der Tabelle 4.2 zu finden.

**Tabelle 4.2:** *Validierung des Plans Zyklen Erkennung.*

| ID | Brand | Durrer | Ulrich | Übereinstimmung<br>Durrer-Ulrich [%] | Übereinstimmung<br>Brand-Ulrich [%] | Übereinstimmung<br>Durrer-Brand [%] |
|----|-------|--------|--------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | Y     | Y      | Y      | 99.0                                 | 99.6                                | 99.5                                |
| 2  | Y     | Y      | Y      | 99.4                                 | 99.1                                | 99.0                                |
| 3  | Y     | Y      | Y      | 98.1                                 | 99.5                                | 98.6                                |
| 4  | Y     | Y      | Y      | 99.9                                 | 99.9                                | 99.8                                |
| 5  | Y     | Y      | Y      | 99.2                                 | 76.8                                | 99.1                                |
| 6  | Y     | Y      | Y      | 97.9                                 | 99.5                                | 100.0                               |
| 7  | Y     | N      | Y      | -                                    | 99.8                                | -                                   |
| 8  | Y     | Y      | Y      | 99.8                                 | 88.3                                | 98.1                                |
| 9  | Y     | Y      | Y      | 98.2                                 | 99.9                                | 99.6                                |
| 10 | Y     | Y      | Y      | 98.9                                 | 99.3                                | 98.4                                |
| 11 | Y     | Y      | Y      | 99.0                                 | 99.4                                | 99.3                                |
| 12 | Y     | Y      | Y      | 99.5                                 | 99.4                                | 98.7                                |
| 13 | Y     | Y      | Y      | 99.0                                 | 99.3                                | 99.6                                |
| 14 | Y     | Y      | Y      | 98.5                                 | 98.9                                | 98.5                                |
| 15 | Y     | Y      | Y      | 98.2                                 | 97.3                                | 99.2                                |
| 16 | Y     | N      | Y      | -                                    | 98.5                                | -                                   |
| 17 | Y     | Y      | Y      | 99.1                                 | 97.0                                | 96.7                                |
| 18 | N     | Y      | Y      | 93.7                                 | -                                   | -                                   |
| 19 | Y     | Y      | Y      | 99.1                                 | 98.5                                | 99.3                                |
|    |       |        |        | <b>98.6</b>                          | <b>97.2</b>                         | <b>98.9</b>                         |

Y = klassifizierbar und N = nicht klassifizierbar

### 4.3 Extrahierung der SH Spur

Nach dem Anlernen des Programms gibt das Programm den aufsummierten DHW und SH Verbrauchs als Plot aus, siehe Abbildung 4.1. Der Erfolg der Klassifikation wird anhand der integrierten Wärmemengen-Zeitdiagrammen beurteilt. Dabei sind die Qualitätsmerkmal, ob die DHW Spur eine (mehrheitlich) lineare Abhängigkeit zeigt und die SH Spur im Sommer jeweils ein deutliches Plateau aufweist. Die Abbildung 4.1 zeigt eine gelungene Klassifizierung.

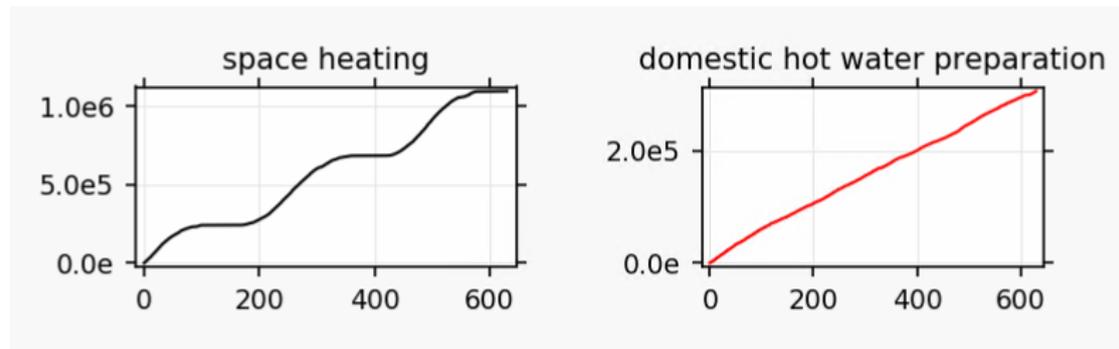


Abbildung 4.1: Eine plausible Klassifizierung. ID 13

Diese Verfahren hat bei 21 von 40 untersuchten Objekten ein unbefriedigendes Resultat hervor gebracht. Ein Beispiel für die misslungene Klassifikation ist in der Abbildung 4.2 dargestellt. Die SH Spur weist keine ausgeprägten Platous auf und die DHW Spur ist abgehackt anstatt gerade. Aus diesem Grund, und weil das Verfahren vollautomatisch funktionieren muss, wurde eine alternative Methode zur Extrahierung der SH Spur entwickelt, der Plan Konstanter DHW. Sie verzichtet, wie im Kapitel 3.4 beschrieben, auf ein Anlernen durch den Benutzer.

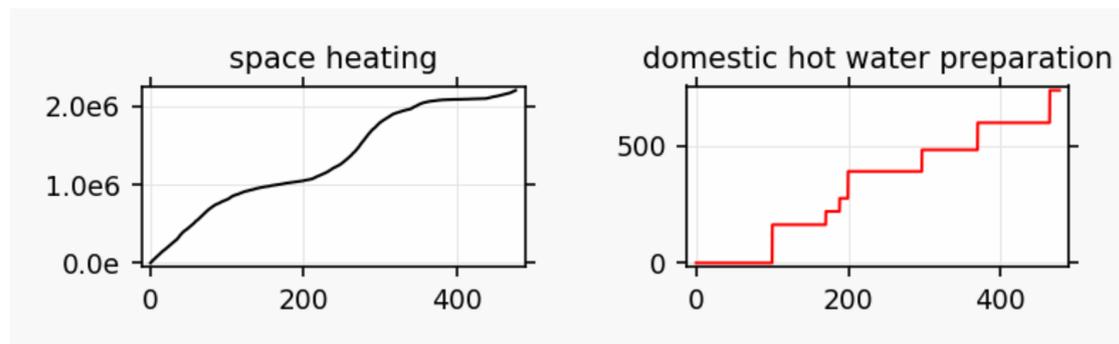


Abbildung 4.2: Eine inkonsistente Klassifizierung. ID 20

Um die Sommermonate zu definieren, wird der tägliche Durchschnittsverbrauch betrachtet. Bei den untersuchten Objekten entspricht das vom 190. Tag im Jahr bis am 250. Tag im Jahr. Wie vom Autor erwartet, sinkt der Verbrauch drastisch über den Sommer, siehe Abbildung 4.3.

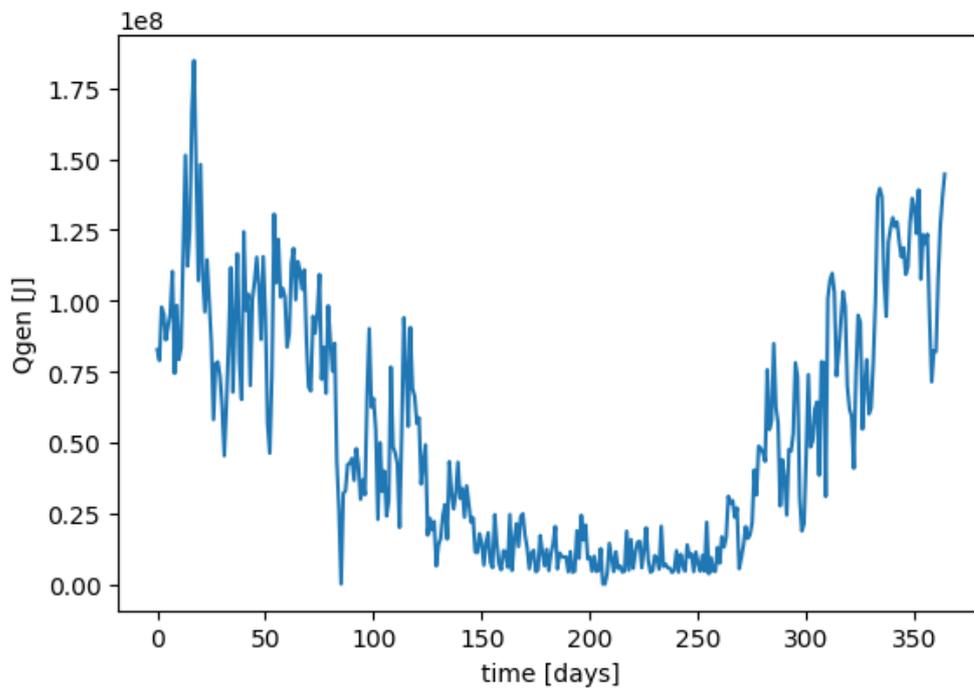


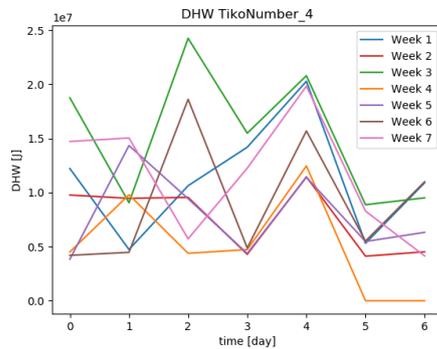
Abbildung 4.3: Der durchschnittliche Tagesbedarf einer Wärmepumpe.

### 4.3.1 Ferienerkennung

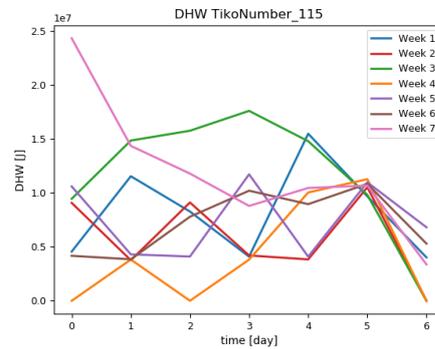
Die Abwesenheit der Bewohner haben einen direkten Einfluss auf den DHW Verbrauch. Beim Erfassen des DHW Verbrauchs über die Sommerzeit ist das Problem, dass die meisten Personen über einen bestimmten Zeitraum nicht Zuhause sind. Somit wird der DHW Verbrauch unterschätzt.

Deshalb ist man bemüht gewesen, die Abwesenheit der Bewohner zu erkennen. Dazu ist der Tagesverbrauch über die Sommermonate untersucht worden. Eine Ferienwoche sollte deutlich unter dem Durchschnitt liegen. Jedoch sind keine eindeutige Ausreisser nach unten entdeckt worden. In den Abbildungen 4.5, 4.6, 4.7 und 4.8 sind vier Beispiele ersichtlich. Alle weiteren Plots sind im Anhang B.

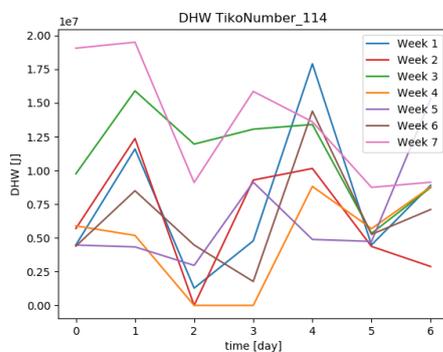
**Abbildung 4.4:** Die x-Achse ist so zu lesen: Time = 0 = Freitag, time = 1 = Samstag, usw..



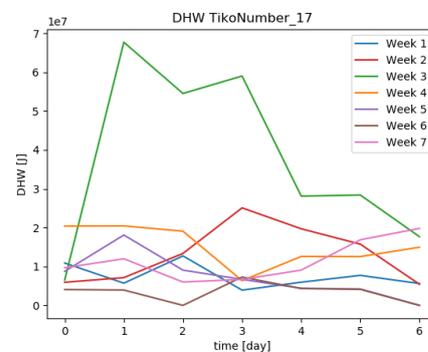
**Abbildung 4.5:** DHW Verbrauch von dem Objekt vier.



**Abbildung 4.6:** DHW Verbrauch von dem Objekt 115.



**Abbildung 4.7:** DHW Verbrauch von dem Objekt 114.



**Abbildung 4.8:** DHW Verbrauch von dem Objekt 17.

Die Auswirkung der Ferien ist nicht klar erkenntlich, wenn es sich um ein Heizsystem eines Mehrfamilienhauses handelt. Die Abwesenheit einer einzelnen Person/einer Familie hat keinen markanten Einfluss auf den DHW Verbrauch. Jedoch ist der durchschnittliche DHW Verbrauch tiefer.

Es wird angenommen, dass die Bewohner 10 Tage im Sommer nicht Zuhause sind. Der definierte Sommer beginnt am 8. Juli 2016 und endet am 6. September 2016 (60 Tage). Das entspricht einer Abwesenheit von 16.7%. Wenn die Bewohner nicht Zuhause sind, sinkt der DHW Verbrauch gegen null, da weder fürs Duschen noch fürs Kleiderwaschen Wasser benötigt wird. Weiter wird angenommen, dass im restlichen Jahr 20 Tage Ferien gemacht werden. Das entspricht einer Abwesenheit von 6.6%. Die Bewohner sind über die Sommerzeit überdurchschnittlich viel in den Ferien. Dies führt zu einer Unterschätzung des DHW Verbrauchs. Als Gegenmassnahme wird ein Korrekturfaktor eingeführt, siehe Formel 4.1.

$$\text{Korrekturfaktor} = \frac{\text{AnwesenheitSommer}[\%]}{\text{AnwesenheitrestlichesJahr}[\%]} \quad (4.1)$$

Mit Berücksichtigung des Korrekturfaktors wurden vier schlechte Ergebnisse gut und

vier gute Ergebnisse wurden schlecht. Bei der ID 6 wurde die WP über mehrere Tage komplett abgeschaltet. Deswegen versagt der Plan Konstanter DHW. Bei der ID 10 wurde ein grosser Ausschlag während der Sommerzeit entdeckt.

Es wurde kein Merkmal entdeckt, wann der Korrekturfaktor verwendet werden soll und wann nicht.

**Tabelle 4.3:** *Ergebnisse mit und ohne Korrekturfaktor.*

| ID | Ergebnis ohne Korrekturfaktor | Ergebnis mit Korrekturfaktor |
|----|-------------------------------|------------------------------|
| 3  | schlecht                      | gut                          |
| 6  | schlecht                      | schlecht                     |
| 11 | schlecht                      | gut                          |
| 1  | schlecht                      | gut                          |
| 4  | gut                           | schlecht                     |
| 5  | gut                           | gut                          |
| 10 | schlecht                      | schlecht                     |
| 12 | schlecht                      | gut                          |
| 13 | schlecht                      | gut                          |
| 15 | gut                           | schlecht                     |
| 17 | gut                           | schlecht                     |
| 18 | gut                           | schlecht                     |

## 4.4 Gebäudemodell

Anhand des Heizwärmebedarfs für die Gebäudeheizung, sollen die thermischen Gebäudeeigenschaften ( $C$ ,  $H$  und  $g$ ) simuliert werden.

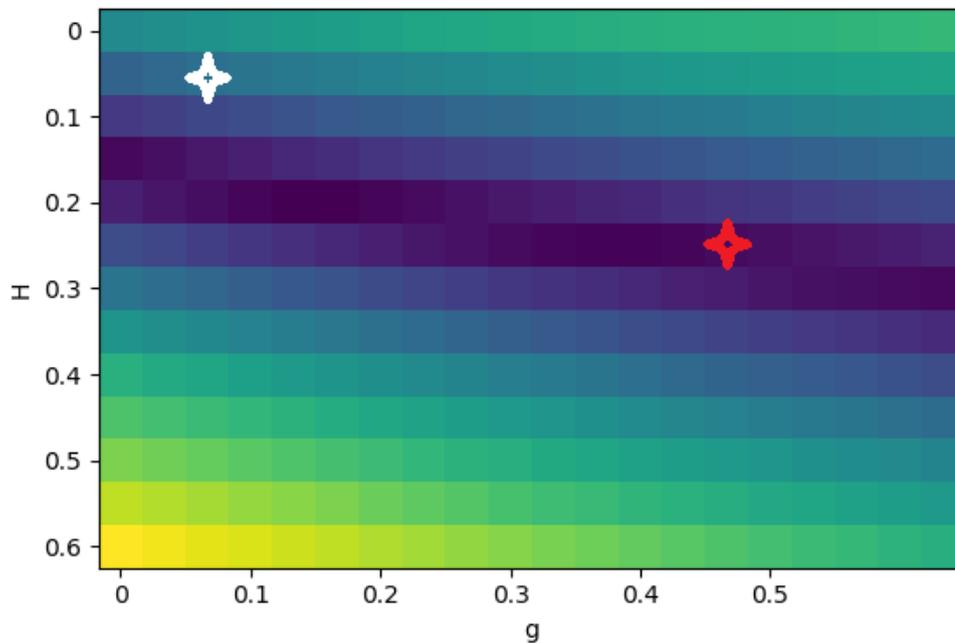
Gebäude sind träge thermodynamische Systeme auf Grund der hohen Kapazität  $C$ . Das Variieren des Startwerts  $C$  hat keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis, siehe Tabelle 4.4. Der Startwert für den Parameter  $C$  beträgt für alle Simulationen  $300'000 \text{ J}/(\text{Km}^2)$ .

**Tabelle 4.4:** *In der Tabelle wird gezeigt, dass der Parameter  $C$  die Abweichung nicht stark beeinflusst.*

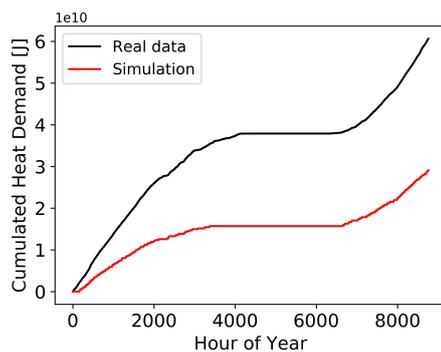
| ID            | C           | H           | g           | Abweichung  |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 15            | 13713333    | 0.19        | 0.11        | 5.98E+10    |
| 15            | 200000      | 0.17        | 0.09        | 4.86E+10    |
| <b>Faktor</b> | <b>68.6</b> | <b>1.12</b> | <b>1.22</b> | <b>1.23</b> |

In den Abbildungen 4.11 und 4.10 sind reale und simulierte Wärmebedarfe abgebildet. Je ähnlicher die Kurven sind, desto besser sind die Startwerte. In der Abbildung 4.9 ist die Abweichung mit den dazugehörigen  $g$  und  $H$  Werten dargestellt. Die beiden Startwerte ( $g$  und  $H$ ) mit der geringste Abweichung wird mit einem rechenintensiven Programm optimiert. Um sicher zu sein, dass die Startwerte mit der geringsten Abweichung das bestmögliche Resultat erzeugen, werden die Startwerte mit der zweitkleinsten Abweichung auch optimiert. Bei den bisher untersuchten Objekten ergibt die kleinste

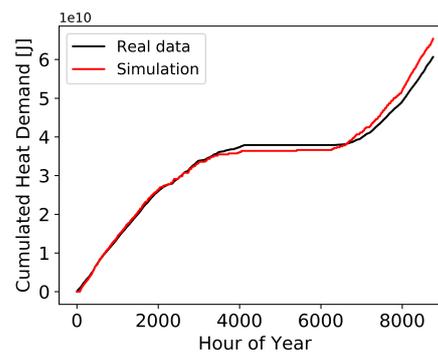
Abweichung das beste Resultat.



**Abbildung 4.9:** Abweichung der ID 1 mit den dazugehörigen  $g$  und  $H$  Werten. Es ist ersichtlich, dass sich ein Tal und kein globales Minimum bildet. Dies erschwert die Suche nach den besten Startwerten.



**Abbildung 4.10:** Simulierter und realer Wärmebedarf von der ID 1 mit Startwerten  $C = 300'000$ ,  $H = 0.05$  und  $g = 0.075$ . Siehe die weiße Markierung in der Abbildung 4.9.



**Abbildung 4.11:** Simulierter und realer Wärmebedarf von der ID 1 mit Startwerten  $C = 300'000$ ,  $H = 0.25$  und  $g = 0.475$ . Siehe die rote Markierung in der Abbildung 4.9.

# 5 Schlussfolgerung

## 5.1 Stärken

### 5.1.1 Vollautomatische SH Separierung

In dieser Arbeit ist eine neue Methode zur Extraktion der SH Spur entwickelt worden, siehe Kapitel 3.4. Weiter wird der aussentemperaturabhängige COP für die LW Wärmepumpen berechnet. Innert kürzester Zeit wird die SH Spur vollautomatisch berechnet und als CSV File ausgegeben.

### 5.1.2 Stabile Separierung der Wärmespur

Im Vergleich zum Plan Zyklen Erkennung ist der Plan Konstanter DHW nicht von der Form der Zyklen abhängig. So kann auf eine komplex und fehleranfällige Zyklen Erkennung verzichtet werden.

## 5.2 Schwächen

### 5.2.1 Konstanter COP für SW und WW

Bis anhin wird der COP für die SW und WW Wärmepumpen als konstant betrachtet. Der Emittertyp, z.B. Radiator oder Fussbodenheizung, beeinflusst die Vorlauftemperatur signifikant. Je nach Emitter Typ variiert der COP stark zwischen 2.72 und 4.72 [9], da er direkt von der Vorlauftemperatur abhängig ist.

### 5.2.2 Verfälschter DHW beim Plan konstanter DHW

Der DHW Verbrauch wird von dem 190. bis am 250. Tag im Jahr bestimmt. Der Mittelwert der generierten Wärme über diese Zeitspanne bildet den DHW. Falls sich ein ungewöhnliches Ereignis in dieser Zeitspanne abspielt, wie z.B. das Aufheizen eines Swimmingpools oder ähnliches, verfälscht dies den DHW signifikant.

## 5.3 Verbesserungsmöglichkeiten

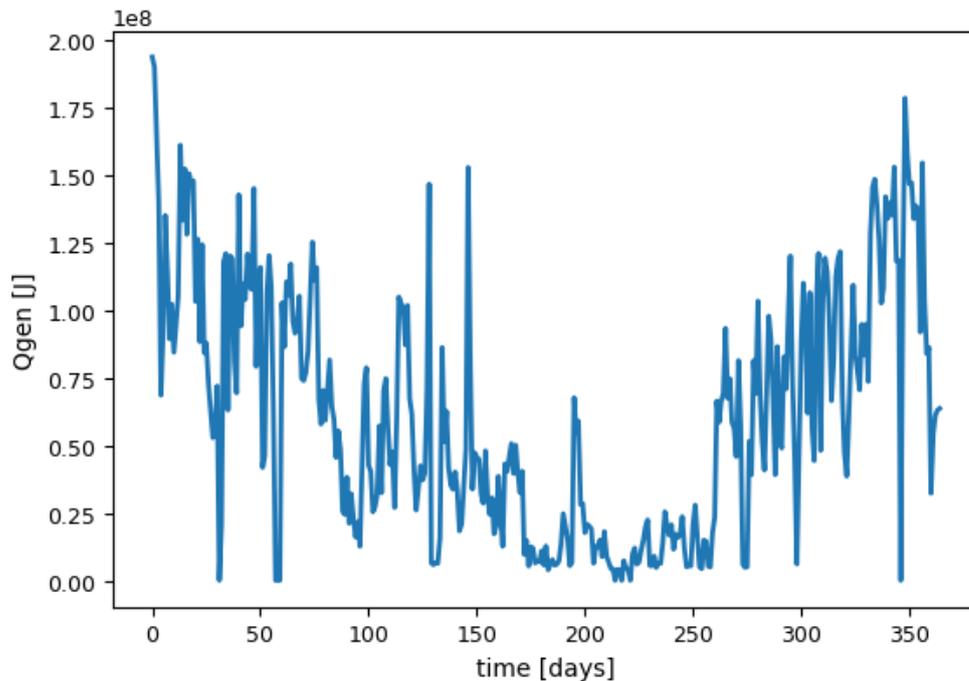
### 5.3.1 Variabler COP für SW und WW

Wie im Kapitel 5.2.1 beschrieben ist ein konstanter COP suboptimal. In den Datenblätter, siehe Anhang C, der Wärmepumpen ist der COP für bestimmte Vorlauftemperaturen

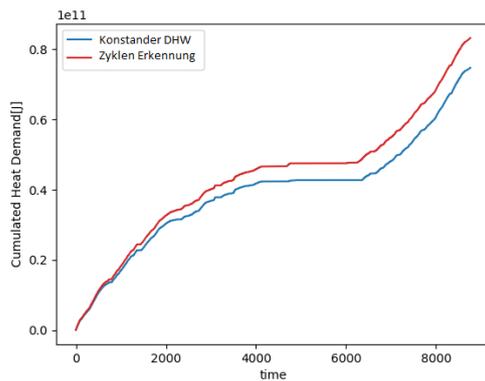
bekannt. Um einen genauen COP zu ermitteln, muss der Emitter und der Wärmepumpe Typ gegeben sein. Für einen variablen COP müssten diese Informationen zuverlässig zu jedem Datensatz mitgeliefert werden.

### 5.3.2 Verbesserte DHW Ermittlung

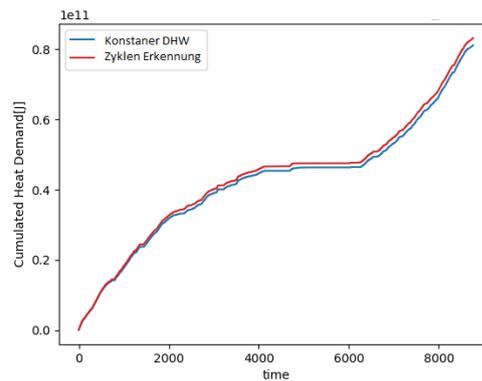
Im Kapitel 5.2.2 wird die Problemstellung zur DHW Ermittlung erläutert. In der Abbildung 5.1 ist die generierte Wärme der WP von der ID 10 dargestellt. Zwischen  $\text{time} = 190$  bis  $\text{time} = 205$  ist ein grosser Ausschlag ersichtlich. In der Abbildung 5.2 wird die aufsummierte SH Spur vom Plan konstanter DHW mit dem Plan Zyklen Erkennung verglichen. In der Abbildung 5.3 wird der selbe Vergleich gezeigt. Jedoch wurde zur Erzeugung der SH Kurve vom Plan konstanter DHW der DHW zwischen dem 205. bis am 250. Tag im Jahr bestimmt. Dies führt zu einer deutlich besseren Übereinstimmung der beiden Methoden. Mit einer Analyse der Sommerzeit könnten solche Ausreisser, wie oben im Textabschnitt beschrieben, erkannt und berücksichtigt werden.



**Abbildung 5.1:** Die generierte Wärmemenge von dem Jahr 2016 der WP von der ID 10.



**Abbildung 5.2:** Hier wird die aufsummierte Wärmespur von Plan Zyklen Erkennung mit Plan konstanter DHW verglichen. Der DHW wurde von dem 190. bis am 250. Tag im Jahr bestimmt.



**Abbildung 5.3:** Hier wird die aufsummierte Wärmespur von Plan Zyklen Erkennung mit Plan konstanter DHW verglichen. Der DHW wurde von dem 205. bis am 250. Tag im Jahr bestimmt.

### 5.3.3 Verbraucherstudie

Es wird angenommen, dass der Brauchwarmwasserbedarf über das Jahr konstant bleibt. Dabei werden Gewohnheiten, z.B. dass im Winter öfters ein Bad genommen wird, nicht berücksichtigt. Dies führt zu einer Fehleinschätzung des DHW.

Mit einer Verbraucherstudie können Verhaltensmuster der Bewohner aufgezeigt werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse könnte zu einem Zeit abhängigen DHW führen.

### 5.3.4 Höhen abhängige Temperatur

Für das Gebäudemodell werden die Wetterdaten der nächst gelegene Wetterstation verwendet. Dabei wird nicht überprüft, ob die Wetterstation und die Wärmepumpe auf der selben Höhe liegen. Die aus der Höhendifferenz resultierende Temperaturabweichung kann mit der Formel 5.1 kompensiert werden.

$$\frac{dT}{dh} = -0.976 \frac{K}{100m} \quad (5.1)$$

[7]

## 5.4 Ausblick

Der Plan konstanter DHW wird in dieser Arbeit an dem Resultat von dem Plan Zyklen Erkennung gemessen. Jedoch konnte bisher noch nicht belegt werden, ob die Resultate vom Plan Zyklen Erkennung der Realität entsprechen. Um die beiden Verfahren zu validieren, braucht es verlässliche Referenzwerte.

Weiter sollten die Verbesserungsmöglichkeiten im Kapitel 5.3 berücksichtigt werden.

## 5.5 Fazit

Bei dem einfach gehaltenen Plan konstanter DHW und dem Plan Zyklen Erkennung handelt es sich um zwei ganz unterschiedliche Verfahren. Da die beiden Verfahren sehr ähnliche Resultate liefern, bestätigen sie ihre Richtigkeit. Jedoch unterscheiden sich die daraus modellierten Gebäudeeigenschaften sehr. Um die beiden Separationsverfahren eindeutig zu validieren, müssen sie mit verlässlichen Daten geprüft werden.

# Abbildungsverzeichnis

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 2.1  | Die rosa Felder sind bereits entwickelt worden. Die blauen Felder werden in dieser Thesis erläutert. . . . .  | vii |
| 3.1  | Die roten Punkte sind die Standorte der Wärmepumpen und die blauen diejenige aller Wetterstationen.[1] . . . . .  | 3   |
| 3.2  | Verbrauchsspur einer Wärmepumpe. . . . .  | 4   |
| 4.1  | Eine plausible Klassifizierung. ID 13 . . . . .   | 8   |
| 4.2  | Eine inkonsistente Klassifizierung. ID 20 . . . . .   | 8   |
| 4.3  | Der durchschnittliche Tagesbedarf einer Wärmepumpe. . . . .   | 9   |
| 4.4  | Die x-Achse ist so zu lesen: Time = 0 = Freitag, time = 1 = Samstag, usw..  | 10  |
| 4.5  | DHW Verbrauch von dem Objekt vier. . . . .  | 10  |
| 4.6  | DHW Verbrauch von dem Objekt 115. . . . .   | 10  |
| 4.7  | DHW Verbrauch von dem Objekt 114. . . . .   | 10  |
| 4.8  | DHW Verbrauch von dem Objekt 17. . . . .  | 10  |
| 4.9  | Abweichung der ID 1 mit den dazugehörigen $g$ und $H$ Werten. Es ist ersichtlich, dass sich ein Tal und kein globales Minimum bildet. Dies erschwert die Suche nach den besten Startwerten. . . . . | 12  |
| 4.10 | Simulierter und realer Wärmebedarf von der ID 1 mit Startwerten $C = 300'000$ , $H = 0.05$ und $g = 0.075$ . Siehe die weisse Markierung in der Abbildung 4.9. . . . .                              | 12  |
| 4.11 | Simulierter und realer Wärmebedarf von der ID 1 mit Startwerten $C = 300'000$ , $H = 0.25$ und $g = 0.475$ . Siehe die rote Markierung in der Abbildung 4.9. . . . .                                | 12  |
| 5.1  | Die generierte Wärmemenge von dem Jahr 2016 der WP von der ID 10. .   | 14  |
| 5.2  | Hier wird die aufsummierte Wärmespur von Plan Zyklen Erkennung mit Plan konstanter DHW verglichen. Der DHW wurde von dem 190. bis am 250. Tag im Jahr bestimmt. . . . .                             | 15  |
| 5.3  | Hier wird die aufsummierte Wärmespur von Plan Zyklen Erkennung mit Plan konstanter DHW verglichen. Der DHW wurde von dem 205. bis am 250. Tag im Jahr bestimmt. . . . .                             | 15  |

# Tabellenverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.1 | Wetterdaten . . . . .   | 6  |
| 4.2 | Validierung des Plans Zyklen Erkennung. . . . .   | 7  |
| 4.3 | Ergebnisse mit und ohne Korrekturfaktor. . . . .  | 11 |
| 4.4 | In der Tabelle wird gezeigt, dass der Parameter C die Abweichung nicht stark beeinflusst. . . . . | 11 |

# Literaturverzeichnis

- [1] Batchgeo, <https://de.batchgeo.com/map/9827f347110519d40b55742c15f896b8>.
- [2] Entfernungsberechnung, <https://www.kompf.de/gps/distcalc.html>.
- [3] Minergie, [www.minergie.ch](http://www.minergie.ch).
- [4] Alt, H. W. *Lineare Funktionalanalysis. Eine anwendungsorientierte Einführung*.
- [5] Bundesamt für Energie BFE. SCHWEIZERISCHE GESAMTSTATISTIK 2017.
- [6] Nelder, J. A. R. M. *A simplex method for function minimization*.
- [7] Roedel, W. *Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage*.
- [8] Schuetz, P. *Computer Science - Research and Development*.
- [9] Thi, Y.-P. Reverse engineering der speicherfähigkeit des schweizer gebäudeparks.

## 6 Danksagung

Ein spezieller Dank geht an Philipp Schütz und Andreas Melillo für die Unterstützung und Betreuung. Ihre Kompetenzen verhalfen der vorliegenden Arbeit immens.

Ein weiteres Dankeschön gehen an den auserwählten Experten Dr. Kai Lieball.

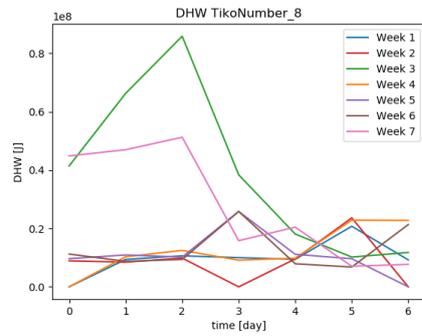
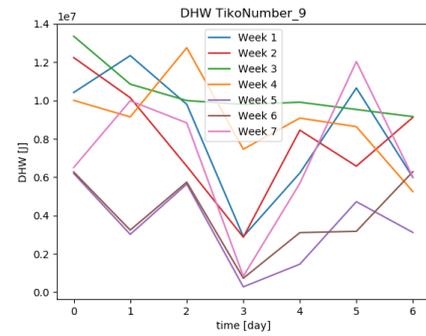
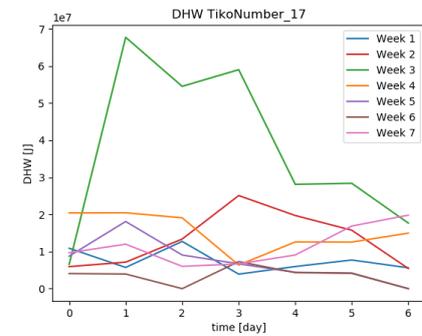
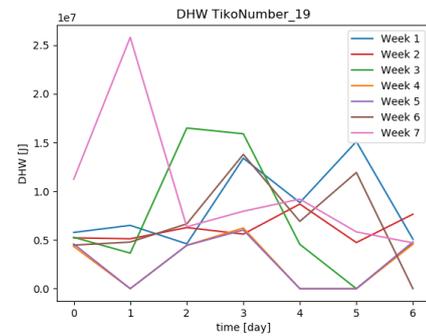
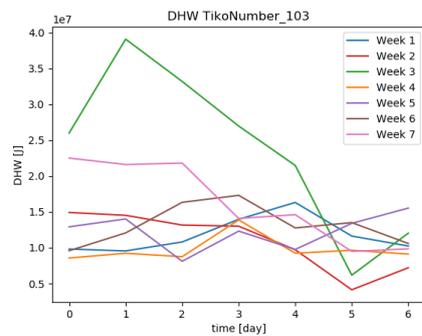
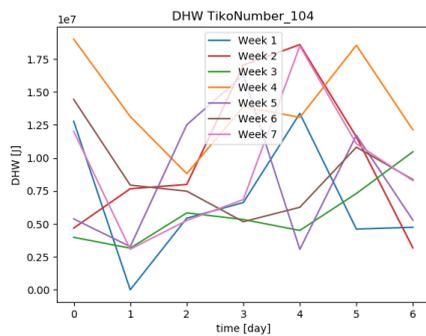
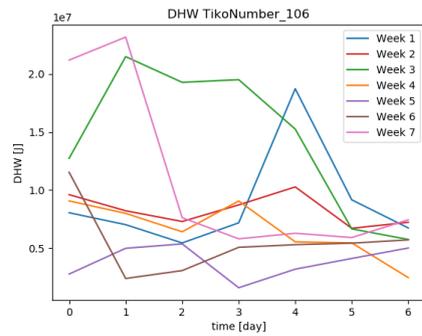
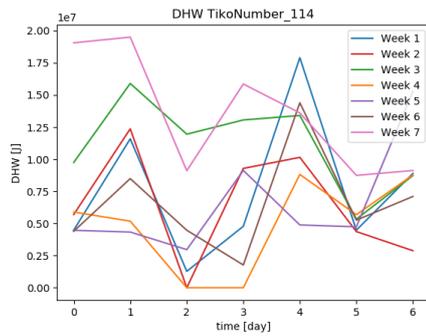
Schlussendlich danke ich meinem Industriepartner für die zur Verfügung gestellten Daten, die den Grundstein dieser Thesis bilden.

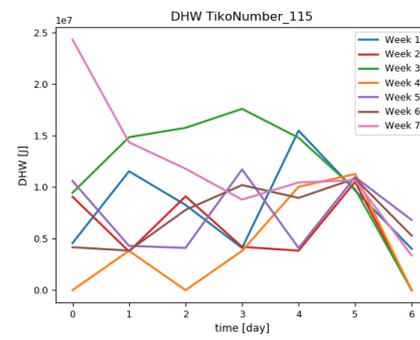
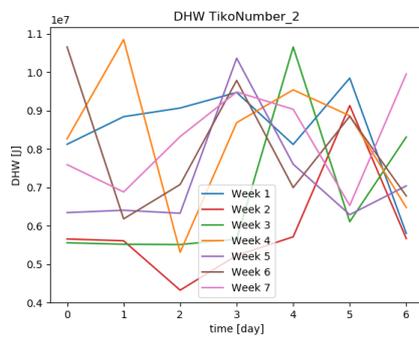
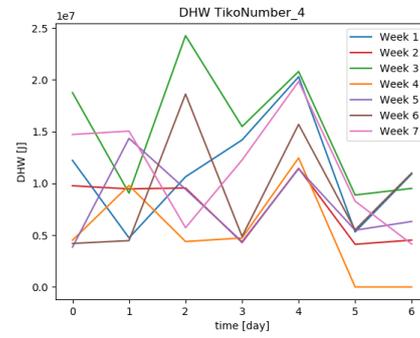
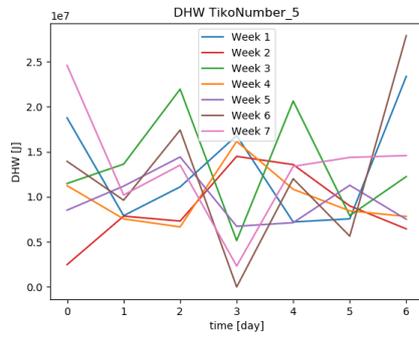
## A Metadaten

| Typ    | hpu_type    | emitter_type | integrated_b | construction_floors | has_thermo_sola | inhabitants | minergie | renovation_year | surface |     |
|--------|-------------|--------------|--------------|---------------------|-----------------|-------------|----------|-----------------|---------|-----|
| HPU_LW | LW          | FLO          | True         | 2012                | 3               | False       | 5        | False           | 0       | 0   |
| HPU_LW | LW          | FLO          | True         | 2014                | 2               | False       | 4        | False           | 0       | 185 |
| HPU_LW | LW          | FLO          | False        | 2004                | 3               | False       | 3        | True            | 0       | 270 |
| HPU_LW | LW          | FLO          | True         | 2011                | 2               | False       | 4        | True            | 0       | 230 |
| HPU_LW | LW          | FLO          | True         | 2015                | 2               | False       | 5        | False           | 0       | 180 |
| HPU_LW | LW          | FLO          | True         | 2015                | 3               | False       | 4        | True            | 0       | 196 |
| HPU_LW | LW          | FLO          | True         | 0                   | 0               | False       | 0        | False           | 0       | 0   |
| HPU_SW | SW          | False        | True         | 2006                | 2               | False       | 5        | False           | 0       | 240 |
| HPU_SW | KEINE DATEN |              |              |                     |                 |             |          |                 |         |     |
| HPU_SW | SW          | RAD          | True         | 1908                | 3               | False       | 3        | False           | 0       | 136 |
| HPU_SW | SW          | FLO          | True         | 2011                | 3               | False       | 4        | False           | 0       | 180 |
| HPU_SW | SW          | False        | True         | 2012                | 2               | False       | 4        | True            | 0       | 350 |
| HPU_SW | SW          | RAD          | True         | 1908                | 3               | False       | 3        | False           | 0       | 136 |
| HPU_SW | SW          | FLO          | False        | 0                   | 0               | False       | 0        | False           | 0       | 0   |
| HPU_SW | SW          | FLO          | True         | 0                   | 0               | False       | 0        | False           | 0       | 0   |
| HPU_SW | KEINE DATEN |              |              |                     |                 |             |          |                 |         |     |
| HPU_SW | SW          | FLO          | True         | 0                   | 0               | False       | 0        | False           | 0       | 0   |
| HPU_SW | SW          | FLO          | True         | 0                   | 0               | False       | 0        | False           | 0       | 0   |
| HPU_WW | KEINE DATEN |              |              |                     |                 |             |          |                 |         |     |

| type_house | windows | brand        | model          |
|------------|---------|--------------|----------------|
| PRI        | False   | CTAAG        | CS8isbwwd      |
| PRI        | THR     | SixmadunAG   | smlk-xp-14e    |
| PRI        | TWO     | SixmadunAG   | SML811c,RDO354 |
| PRI        | THR     | Viessmann    | WP950DS        |
| PRI        | THR     | thermolink   | w374           |
| PRI        | False   | SixmadunAG   | SMLIK-XP-14E   |
| PRI        | False   | Alpha-Innote | LWC100         |
| PRI        | TWO     | CTAAG        | CTA-BWWS-400   |
| PRI        | TWO     | SatagThermc  | BW116          |
| PRI        | TWO     | Alpha-Innote | swc70h         |
| PRI        | TWO     | HeimAG       | SWH1-10        |
| PRI        | TWO     | SatagThermc  | BW116          |
| PRI        | False   | SatagThermc  | BWH106         |
| PRI        | False   | SixmadunAG   | Smlikxp14e     |
| PRI        | False   | SatagThermc  | BWC110         |
| PRI        | False   | Alpha-Innote | swc120h        |

# B DHW Sommer Wochendarstellung





# C Metadaten

| TA  | Hoval Belaia 4 |     |      | Hoval Belaria 6 |     |      | Hoval Belaria 8 |     |      | Hoval Belaria 11 |     |      | Hoval Belaria 14 |     |      | Hoval Belaria 16 |     |      |
|-----|----------------|-----|------|-----------------|-----|------|-----------------|-----|------|------------------|-----|------|------------------|-----|------|------------------|-----|------|
|     | QH             | P   | COP  | QH              | P   | COP  | QH              | P   | COP  | QH               | P   | COP  | QH               | P   | COP  | QH               | P   | 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               | 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               | 1.8 | 2.72 | 6               | 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   | 5.3  | 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              | 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 | 7.2  | 10              | 1.8 | 5.6  | 12              | 2.3 | 5.28 | 14.0             | 2.2 | 6.36 | 17.3             | 3.0 | 5.85 | 18.8             | 3.4 | 5.60 |
| 20  | 6              | 0.7 | 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 | 1.8  | 4               | 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              | 1.7 | 2.36 | 4.8             | 2   | 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   | 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   | 3.1  | 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   | 4.2  | 10              | 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               | 2   | 4.6  | 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 | 4.8  | 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   | 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              | 1.9 | 2.12 | 4.7             | 2.3 | 2.1  | 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 | 2.4  | 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               | 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    | 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              | 1.3 | 3.82 | 8.2             | 2.2 | 3.8  | 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   | 5    | 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   | 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   | 5.97 | 10.9            | 2.1 | 5.29 | 13              | 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 | 1.1  | 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 | 1.8  | 8.0              | 4.3 | 1.87 | 10.2             | 5.6 | 1.83 | 10.7             | 6.3 | 1.71 |
| -7  | 4.3            | 2.1 | 2.1  | 5.2             | 2.4 | 2.19 | 6.3             | 3   | 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 | 2.5  | 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 | 3.4  | 8               | 2.3 | 3.43 | 9.5             | 3   | 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 | 1.4  | 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 | 1.8  | 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   | 2.5 | 2.04 | 6    | 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   | 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   | 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    | 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   | 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   | 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   | 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 | 1.2  | 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   | 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    | 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 | 3.3  | 9.8  | 3.2 | 3.1  | 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 |