

## Abschlussbericht

# Neue Regelstrategien für leistungsgeregelte Wärmepumpen

Studiengang	Energie- und Umwelttechnik
Vertiefungsrichtung	Energiesysteme
Student	Lukas Voramwald
Betreuer	Prof. Dr. David Zogg
Auftraggeber	BFE (Bundesamt für Energie)
Zuständig	Rita Kobler
Experte	Peter Dähler

## Management Summary

Die Luft/Wasser-Wärmepumpen ist ein beliebtes Mittel zur Bereitstellung von Heizenergie. Die weite Verbreitung basiert auf der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit und dem immer grösser werdenden Umweltbewusstsein der Nutzer. Die Effizienz nimmt dabei eine entscheidende Rolle ein. In diesem Zusammenhang taucht die kontinuierliche Leistungsregelung von Wärmepumpenanlagen auf. Diese Entwicklung wurde durch neuartige Kompressoren mit günstigen Teillastverhalten möglich. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Heizsystem als Ganzes. Das Ziel ist es, die regelungstechnisch optimale Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit und ohne Brauchwarmwasseraufbereitung zu finden.

Im zweiten Teil dieser Projektarbeit wurde das Heizsystem durch eine Photovoltaikanlage ergänzt. Mit der Energiestrategie 2050 werden die fluktuierenden erneuerbaren Energien stark ausgebaut. Dadurch geraten die elektrischen Netze an ihre Grenzen. Die Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs kann dieser Problematik entgegenwirken. Speziell von der kontinuierlich leistungsgeregelten Wärmepumpe, welche der Photovoltaikproduktion folgen kann, werden Spitzenwerte in den Kennzahlen Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis erwartet.

Als optimale Einbindung kontinuierlich leistungsgeregelter Wärmepumpen erwies sich die simultane Drehzahlregelung von Kompressor, Ventilator und Umwälzpumpe. Die Jahresarbeitszahl inklusive Umwälzpumpe und Ventilator konnte im Vergleich zur Zweipunktregelung zwischen 10% und 24% gesteigert werden. Mit dem Ventilator und der Umwälzpumpe kann aufgrund des Affinitätsgesetzes  $P_{el} \propto \dot{V}^3 \propto n^3$  viel Energie eingespart werden. Der Ventilator muss jedoch gewährleisten, dass der Luftvolumenstrom im Verdampfer nicht zu stark auskühlt. In diesem Fall würde das Kältemittel im Verdampfer nicht mehr vollständig verdampfen und das Expansionsventil reduziert den Verdampfungsdruck. Die Folge wäre ein erhöhter innerer Temperaturhub und eine schlechtere Effizienz. Im Bereich der Umwälzpumpe führt die Reduktion der Drehzahl zu einer erhöhten Temperatur der Wärmeabgabe. Dieser Effekt hat jedoch weniger starke Auswirkungen als die Energieersparnis durch die reduzierte Drehzahl.

Für die Untersuchung des lokalen Eigenverbrauchs wurde ein Regler entwickelt, welcher in Abhängigkeit der Photovoltaikproduktion und der Raumtemperatur ein Stellgrössensignal auf die Wärmepumpe gibt. Bereits durch einen sehr einfach aufgebauten Regler konnte die Photovoltaikproduktion sehr präzise nachgefahren werden. Die Voraussetzung ist ein optimales Verhältnis der Photovoltaikleistung zur Wärmepumpenleistung. Daher wurden die besten Ergebnisse im Gebäudemodell SFH 100 (Altbau,  $100\text{kWh}/\text{m}^2/\text{a}$ ) erzielt. Ohne Brauchwarmwasseraufbereitung konnte das Eigenverbrauchsverhältnis für den Altbau von 33% "natürlichem" Eigenverbrauch auf 43% gesteigert werden. Mit der Brauchwarmwasseraufbereitung lassen sich sogar Spitzenwerte von 54% Eigenverbrauchsverhältnis und 27% Autarkie erzielen.

Die Ergebnisse basieren auf Jahressimulationen mit dem Programm MATLAB und dem Zusatzprodukt Simulink. Das Simulationsmodell wurde mehrheitlich mit der Carnot (Conventional And Renewable eNergy systems Optimization blockset) Toolbox des Solar-Institutes Juelich aufgebaut. Zusätzlich konnte auf definierte Gebäudemodelle des Institutes für Energie am Bau der FHNW zurückgegriffen werden. Die Grundlagen für die Modellierung der Wärmepumpe stammen von der Untersuchung der Hochschule Luzern und den Datenblättern von Stiebel-Eltron.

# Neue Regelstrategien für leistungsgeregelte Wärmepumpen

## Einleitung

Luft/Wasser-Wärmepumpen sind ein beliebtes Mittel zur Bereitstellung von Heizenergie. Die weite Verbreitung basiert auf der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit und dem immer grösseren Umweltbewusstsein der Nutzer. Eine der neusten Entwicklungen ist die kontinuierliche Leistungsregelung von Wärmepumpen. Leistungsgeregelte Wärmepumpen passen die Wärmeleistung an die geforderten Heizleistung an. Gerade in dieser Technologie ist die regelungstechnische Einbindung in das Heizsystem von Bedeutung.

## Ziele:

- Aufbau und Übernahme sowie Parametrierung von Simulationsmodellen
- Regelungstechnisch optimale Einbindung leistungsgeregelter Luft/Wasser-Wärmepumpen in das Heizsystem
- Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs

## Ergebnisse zur optimalen Einbindung

Die besten Resultate wurden mit der simultanen Drehzahlregelung von Verdichter, Ventilator und Umwälzpumpe erreicht. Mit dieser Regelstrategie konnte der mittlere Temperaturhub während dem Betrieb der Wärmepumpe deutlich reduziert werden. Der zweite positive Effekt ist die Minimierung der elektrischen Energieaufnahme von Ventilator und Umwälzpumpe. Die Vergleichsbasis bietet die konventionelle ein/aus-Regelung von Wärmepumpen.

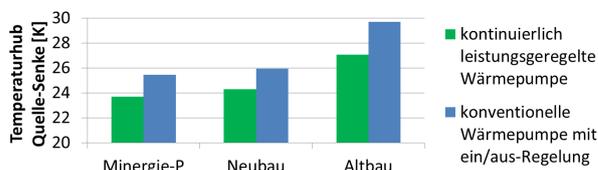


Abb. 2: Mittlerer Temperaturhub während des Heizbetriebes.

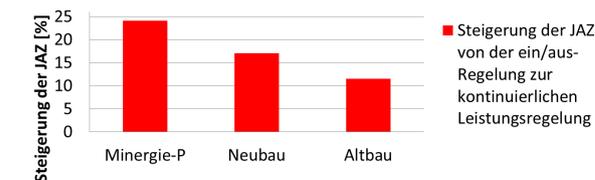


Abb. 3: Steigerung der JAZ von der ein/aus-Regelung zur kontinuierlichen Leistungsregelung.

**Diplomand:** Lukas Voramwald  
**Auftraggeber:** Bundesamt für Energie  
**Experte:** Peter Dähler  
**Examinator:** Prof. Dr. David Zogg  
david.zogg@fhnw.ch

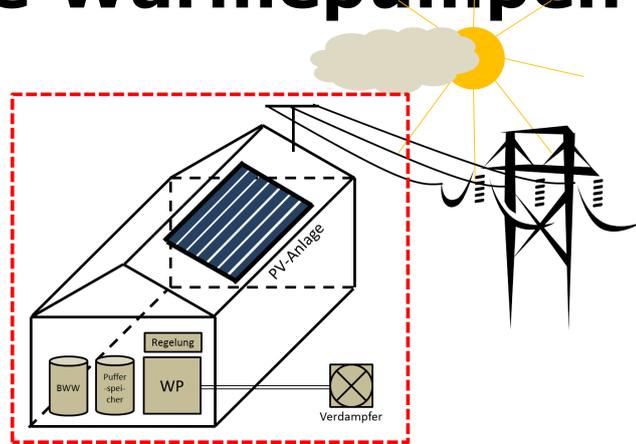


Abb. 1: Systemabgrenzung – Die Systemgrenze ist rot gestrichelt.

## Ergebnisse zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs

Mit der drehzahlvariablen Wärmepumpe kann die Produktionskurve der Photovoltaikanlage relativ gut abgefahren werden. Die Voraussetzung dafür ist die Abstimmung der Photovoltaikleistung auf die Wärmepumpenleistung. Dadurch kann die Autarkie, das Verhältnis der selbst genutzten Solarenergie zum totalen Energiebedarf, gesteigert werden.

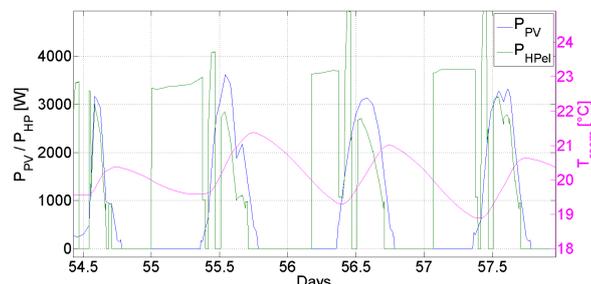


Abb. 4: Ausschnitt der Photovoltaikleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme einer Wärmepumpe.

Die Grundlage für einen hohen lokalen Eigenverbrauch ist eine Regelstrategie, die die Energiequelle (=Photovoltaikproduktion) und den Verbraucher/Speicher (=das Gebäude) miteinander verknüpft. Das Signal auf die Wärmepumpe ist deshalb eine Funktion der Raumtemperatur und der Photovoltaikproduktion.

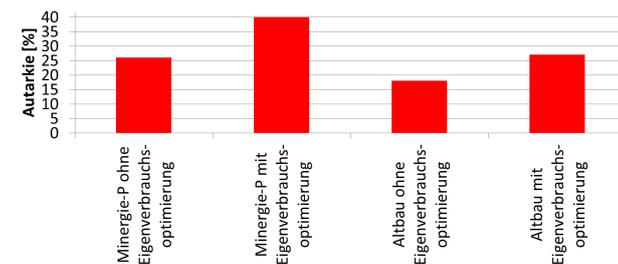


Abb. 5: Vergleich der Autarkie mit und ohne Eigenverbrauchsoptimierung.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ausgangslage / Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Systemabgrenzung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Verbesserung des Wärmepumpenmodells</b>	<b>4</b>
3.1	Stützpunkte und Teillastwirkungsgrad . . . . .	5
3.2	Validierung des Teillastverhaltens des Wärmepumpenmodells . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Annahmen und Vereinfachungen</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Optimale Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen</b>	<b>12</b>
5.1	Leistungsregler . . . . .	12
5.2	Theorie zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen . . . . .	15
5.3	Systematische Untersuchung der erreichbaren JAZ ohne Brauchwarmwasser . . . . .	16
5.3.1	Diskussion der Resultate zur optimalen Einbindung ohne Brauchwarmwasser . . . . .	17
5.4	Systematische Untersuchung der erreichbaren JAZ mit Brauchwarmwasseraufbereitung . . . . .	23
5.4.1	Diskussion der Resultate zur optimalen Einbindung mit Brauchwarmwasser . . . . .	24
<b>6</b>	<b>kritische Würdigung/Prüfung der Ergebnisse zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen</b>	<b>29</b>
6.1	Gebäudemodelle . . . . .	29
6.2	JAZ . . . . .	29
6.3	Realitätsbezug . . . . .	32
<b>7</b>	<b>Optimierung des Eigenverbrauchs mit leistungsgeregelter Wärmepumpe</b>	<b>35</b>
7.1	Eigenverbrauchsregler mit kontinuierlicher Stellgrösse auf die Wärmepumpe . . . . .	35
7.2	Erreichbarer Eigenverbrauch . . . . .	39
7.2.1	Auswertung ohne BWW . . . . .	41
7.2.2	Auswertung mit BWW . . . . .	45
7.3	Optimierungsmöglichkeiten des Reglers zur Optimierung des lokalen Eigenbedarfs . . . . .	48
7.3.1	Anpassung der PV-Leistung an die WP-Leistung . . . . .	48
7.3.2	Optimierungspotential des Reglers . . . . .	51
7.3.3	Weglassen der EW-Sperre . . . . .	52
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>54</b>
<b>9</b>	<b>Reflexion</b>	<b>55</b>
<b>10</b>	<b>Ehrlichkeitserklärung</b>	<b>61</b>
<b>A</b>	<b>Archivierung der Simulationsnummern</b>	<b>63</b>
A.1	Simulationsnummern der optimalen Einbindung ohne BWW . . . . .	63
A.2	Simulationsnummern der optimalen Einbindung mit BWW . . . . .	64
A.3	Simulationsnummern zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs . . . . .	65

<b>B</b>	<b>Aufbau der Simulation</b>	<b>66</b>
B.1	System . . . . .	66
B.1.1	Gebäudemodelle . . . . .	67
B.1.2	Innere Gewinne . . . . .	67
B.1.3	Photovoltaikanlage . . . . .	67
B.2	Controller . . . . .	67
B.3	Externe Einflüsse . . . . .	69
B.3.1	Meteodaten . . . . .	69
B.3.2	Energiepreise . . . . .	69
B.3.3	Sperrzeiten . . . . .	71
B.3.4	Brauchwarmwasserbezug - Zapfprofil . . . . .	71
B.4	Berechnungen . . . . .	72
B.4.1	Energetische Parameter . . . . .	72
B.4.2	Kosten . . . . .	72
B.4.3	Jahresarbeitszahlen und Definition . . . . .	72
B.4.4	Komfortparameter . . . . .	73
B.4.5	Betriebsparameter . . . . .	74
B.4.6	Eigenbedarfsparameter . . . . .	74
<b>C</b>	<b>Auslegung der Wärmepumpe</b>	<b>76</b>
C.1	Auslegung der Speicher nach STASCH . . . . .	77
C.2	Auslegung der Kombination Ventilator-Motor für den Verdampfer . . . . .	79
<b>D</b>	<b>STASCH - Hydraulische Schaltungen</b>	<b>80</b>

# 1 Ausgangslage / Einleitung

Die Luft/Wasser - Wärmepumpen ist ein beliebtes Mittel zur Bereitstellung von Heizenergie. Im Wärmepumpenprozess wird "Gratis-Energie" aus dem Erdreich, dem Grundwasser oder der Umgebungsluft auf ein höheres, brauchbares Temperaturniveau gepumpt. Die weite Verbreitung basiert auf der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit und dem immer grösser werdenden Umweltbewusstsein der Nutzer. Die Effizienz der L/W-WP nimmt dabei eine entscheidende Rolle ein. Das Mass für die Effizienz einer Wärmepumpe ist der COP (Coefficient of Performance). Der COP beschreibt das Verhältnis aus der Heizenergie und dem dafür nötigen elektrischen Aufwand. Jahrelang wurde die Leistungszahl gemäss dem Prüfverfahren EN 14511 optimiert. Neuste Entwicklungen tendieren dazu, nicht nur die Wärmepumpe als Gerät, sondern das Heizsystem als Ganzes zu verbessern. In diesem Zusammenhang taucht die kontinuierliche Leistungsregelung der Wärmepumpen auf dem Markt auf. Klassische Wärmepumpen werden über Zweipunktregler ein- und ausgeschaltet. Leistungsgeregelte Wärmepumpen passen die Kompressordrehzahl und damit den Kältemittelmassenstrom der geforderten Heizleistung an. Gerade mit dieser Technologie ist die regelungstechnische Einbindung in das Heizsystem von Bedeutung.

Diese Arbeit ist eine Weiterführung der Projektarbeit P5 mit dem gleichen Titel "Neue Regelstrategien für leistungsgeregelte Wärmepumpen". Die noch offenen Punkte der vorangegangenen Projektarbeit sollen in einer ersten Phase geklärt werden:

- Verbesserung des Wärmepumpenmodells, so dass der Einfluss des Ventilators untersucht werden kann.
- Einbindung der Brauchwarmwassererwärmung in das Heizsystem gemäss STASCH (Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen)
- Systematische Untersuchung der erreichbaren Jahresarbeitszahl (JAZ) für die Leistungsregelung des Kompressors/ Ventilators/ der Umwälzpumpe, für verschiedene Gebäudetypen und hydraulische Schaltungen. Dazu sind Jahressimulationen notwendig.

In einer zweiten Phase werden die bisherigen Erkenntnisse mit dem laufenden BFE-Projekt "Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs von Photovoltaik- Wärmepumpenanlagen" kombiniert. Das erarbeitete Simulationsmodell der leistungsgeregelten Wärmepumpe soll mit den Regelalgorithmen des BFE-Projektes kombiniert werden. Erwartet wird, dass die Grössen "Autarkie" und "Eigenverbrauchsverhältnis" deutlich besser ausfallen als mit einer konventionellen ein/aus-Regelung der Wärmepumpen. Zu dieser Untersuchung gehört:

- Aufbau bzw. Übernahme eines Simulationsmodells mit Kombination von Wärmepumpe und PV-Anlage, Anpassung auf leistungsgeregelte Wärmepumpe.
- Aufbau von klassischen Regelalgorithmen mit leistungsgeregelter Wärmepumpe zur Optimierung des Eigenverbrauchs bei hoher Energieeffizienz und Einhaltung des Raumkomforts.
- Durchführung systematischer Simulationen für verschiedene Regelalgorithmen, hydraulische Schaltungen und Gebäudetypen.
- Auswertung und Vergleich der Simulationsergebnisse bezüglich vorgegebener Kennzahlen. Dabei ist die Abstimmung mit Remo Waser essentiell, welcher im Bereich der Eigenverbrauchsoptimierung seine Bachelorthesis schreibt.

Die Simulationen werden mit dem Programm MATLAB durchgeführt. MATLAB ist eine Software des Unternehmens "The MathWorks". MATLAB dient zur Lösung von mathematischen Problemen mit Hilfe numerischen Berechnungen von Matrizen und deren Darstellungen. Simulink ist ein Zusatzprodukt zu MATLAB und wird zur Modellierung von Systemen verwendet. In diesem Projekt wird Simulink mit einer speziellen Toolbox des Solar-Institutes Juelich verwendet. Die Carnot Toolbox (Conventional And Renewable eNergy systems OpTimization blockset) bietet die Grundlage für die Simulation und Berechnung von thermischen Elementen[1].

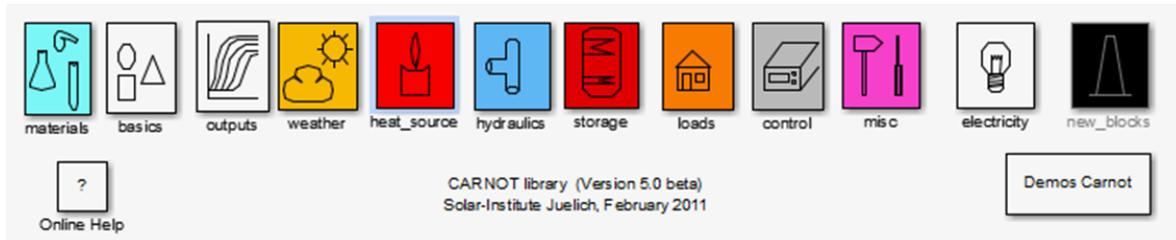


Abb. 1.1: Bild der Carnot Toolbox (Conventional And Renewable eNergy systems OpTimization blockset)

## 2 Systemabgrenzung

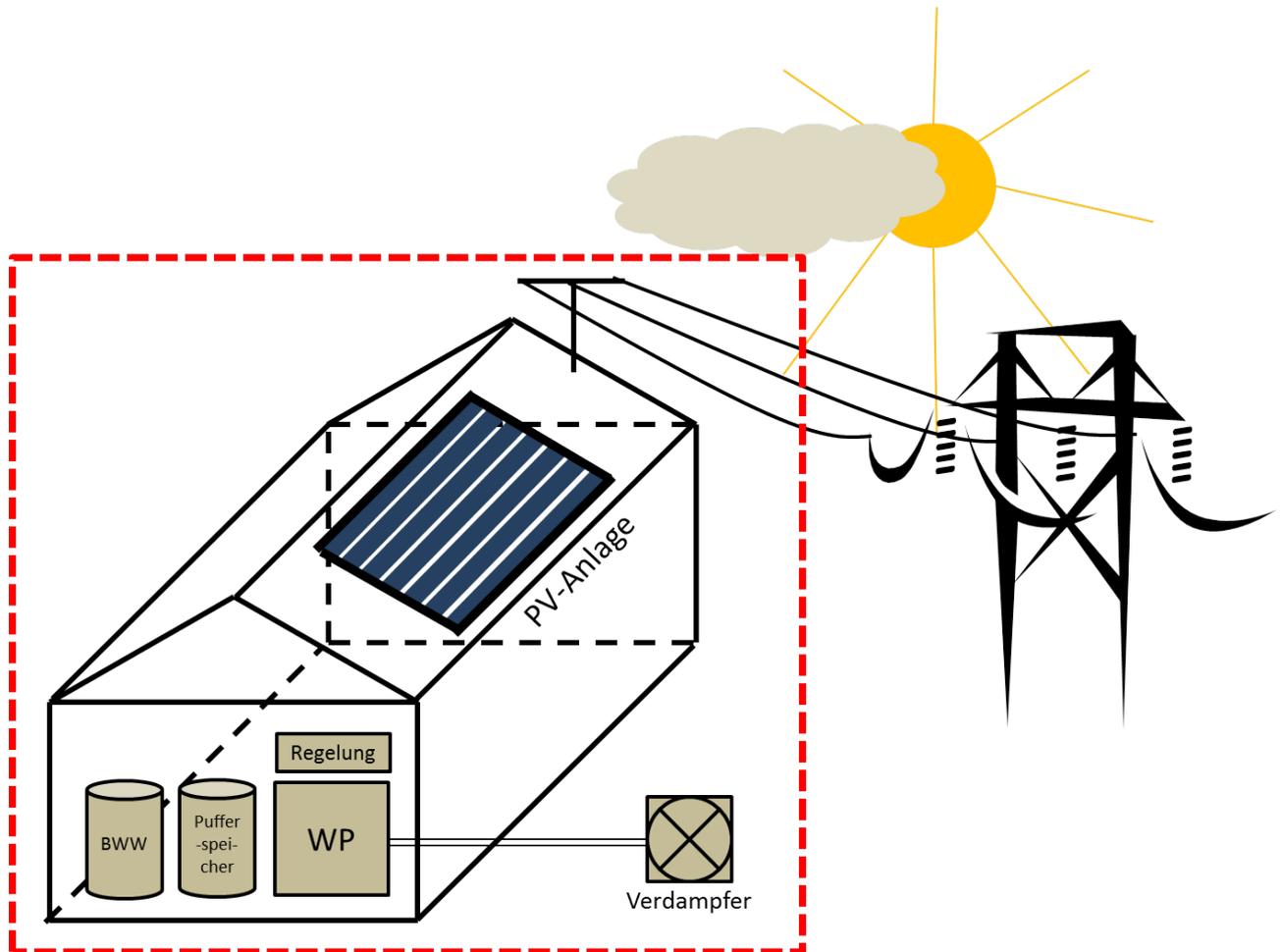


Abb. 2.1: Systemabgrenzung - rot gepunktet ist die Systemgrenze ersichtlich.

In die Untersuchung fließen folgende Punkte mit ein:

- Luft/Wasserwärmepumpe mit kontinuierlicher Leistungsregelung
- Gebäudemodelle
- Brauchwarmwasseraufbereitung
- Heizungssystem mit Umwälzpumpe, Brauchwarmwasser-Ladepumpe und Ventilator am Verdampfer
- Photovoltaikanlage
- Strombezug und Einspeisung sowie deren Kosten

### 3 Verbesserung des Wärmepumpenmodells

In der Projektarbeit P5 wurde festgestellt, dass das Wärmepumpenmodell der Carnot Toolbox zu wenig detailliert ist für die vorgesehenen Untersuchungen. Die Berechnung der Wärmepumpenparameter basierte nur auf zwei Punkten:

- der Quelleneintrittstemperatur (Aussentemperatur)
- der Senkenaustrittstemperatur

Der Einfluss des Ventilators konnte nicht erfasst werden, weil sich die Quelleneintrittstemperatur unabhängig von der Ventilator Drehzahl verhält. In der Realität ist die Effizienz der Wärmepumpe jedoch unter anderem eine Funktion des Luftmassenstromes durch den Verdampfer. David Zogg hat daraufhin ein neues Wärmepumpenmodell entworfen, welches die Abkühlung des Quellmassenstromes berücksichtigt.

Das verbesserte Wärmepumpenmodell berücksichtigt die Temperaturdifferenz über dem Verdampfer, welche  $\Delta T_{src, design}$  genannt wird. Liegt  $\Delta T_{src, design}$  über dem einstellbaren Grenzwert, wird die Eintrittstemperatur der Wärmequelle künstlich nach unten korrigiert. Die Korrektur der Quelleneintrittstemperatur wirkt sich dann auf die Effizienz der Wärmepumpe aus. Diese Massnahme lehnt sich stark an die Realität. Falls das Kühlmittel nicht genügend Wärme aufnehmen kann um zu verdampfen, so wird der Verdampfungsdruck mit dem Expansionsventil reduziert und das Temperaturniveau im Verdampfer sinkt.

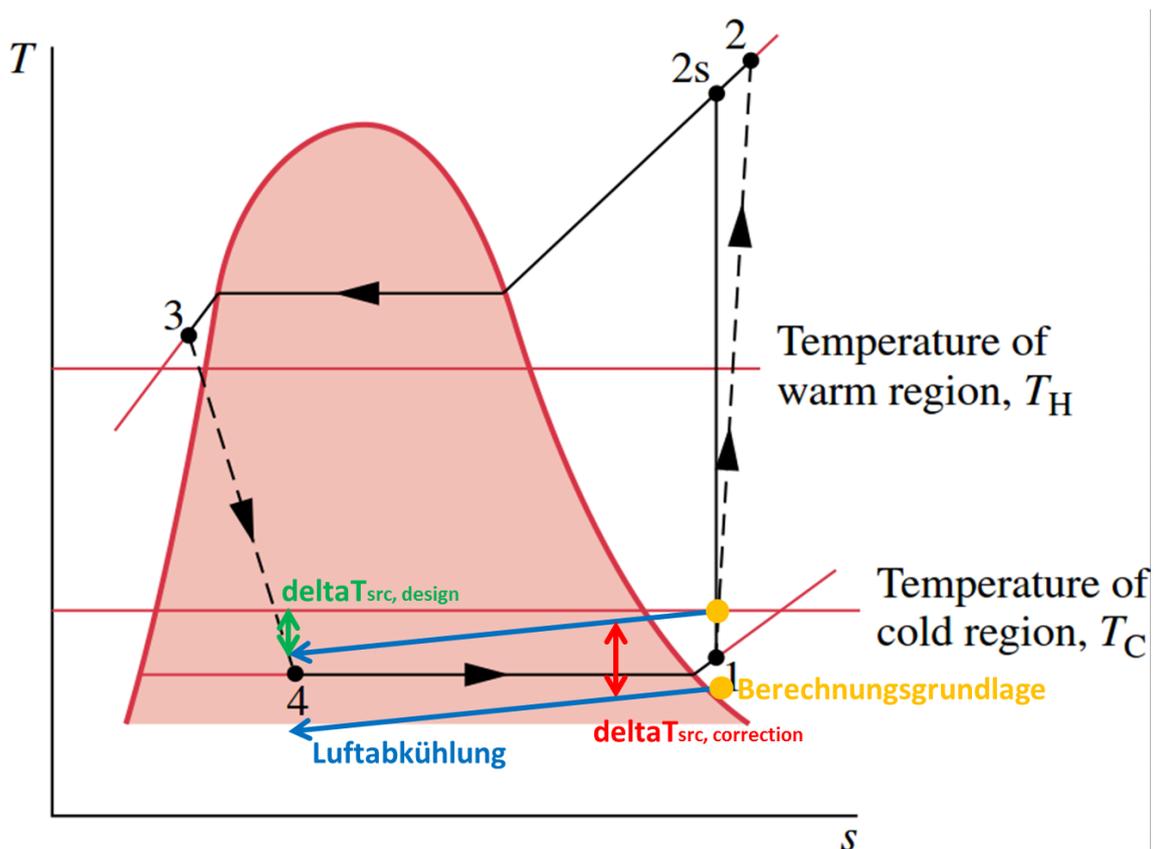


Abb. 3.1: TS-Diagramm des Wärmepumpenprozesses. Quelle: [2] ergänzt mit eigenen Pfeilen und Kommentaren. Übersteigt die Luftabkühlung den Grenzwert  $\Delta T_{src, design}$  wird die Lufteintrittstemperatur künstlich nach unten korrigiert.

### 3.1 Stützpunkte und Teillastwirkungsgrad

Das Wärmepumpenmodell arbeitet mit Stützpunkten für die Heiz- und Quellenleistung und die elektrische Leistungsaufnahme. Die Stützstellen basieren auf der Quelleneintrittstemperatur und der Senkenaustrittstemperatur. Diese Stützpunkte wurden mit Hilfe des Datenblattes der Wärmepumpe von Stiebel-Eltron WPL 15 berechnet [3]:

A [°C]	W [°C]	$\dot{Q}_h$ [kW]	$P_{el}$ [kW]	$\dot{Q}_{src}$ [kW]	$COP_{\text{Datenblatt}}$	$\eta_{\text{Carnot}}$	performance	$COP_{\text{berechnet}}$
-10	35	6.5	2.23	4.27	2.92	6.8	0.43	2.92
0	35	7.75	1.93	5.82	4.01	8.8	0.46	4.01
10	35	9.5	1.71	7.79		12.3	0.45	5.54
15	35	11	1.59	9.41		15.4	0.45	6.93
-10	45	6.9	2.65	4.25		5.8	0.45	2.60
0	45	8	2.52	5.48		7.1	0.45	3.18
10	45	10	2.45	7.55		9.1	0.45	4.09
15	45	11	2.31	8.69		10.6	0.45	4.77
-10	55	7.25	3.22	4.03	2.25	5.0	0.45	2.25
0	55	8.25	3.07	5.18		6.0	0.45	2.68
10	55	10	3.05	6.95		7.3	0.45	3.28
15	55	11	2.98	8.02		8.2	0.45	3.69

Tab. 3.1: Stützpunkte des Wärmepumpenmodelles.

Die kompletten Daten (Quellentemperatur, Wassertemperatur, Heiz- und Quellenleistung, elektrische Leistung sowie der COP) sind im Datenblatt von Stiebel-Eltron [3] nur für die drei grünen Zeilen gegeben. Die Heizleistung ist jedoch für alle in der Tabelle 3.1 aufgeführten Datenpunkte gegeben. Durch die Annahme, dass der Gütegrad konstant bleibt und dem Carnot-Wirkungsgrad für Wärmepumpenanlagen konnten alle anderen Datenpunkte berechnet werden.

$$\text{Gütegrad} = \frac{COP}{\eta_{\text{Carnot}}} \quad (3.1)$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (3.2)$$

$$COP_{\text{berechnet}} = \eta_{\text{Carnot}} * \text{Gütegrad} \quad (3.3)$$

$$P_{el} = \frac{\dot{Q}_h}{COP_{\text{berechnet}}} \quad (3.4)$$

$$\dot{Q}_{sink} = \dot{Q}_h - P_{el} \quad (3.5)$$

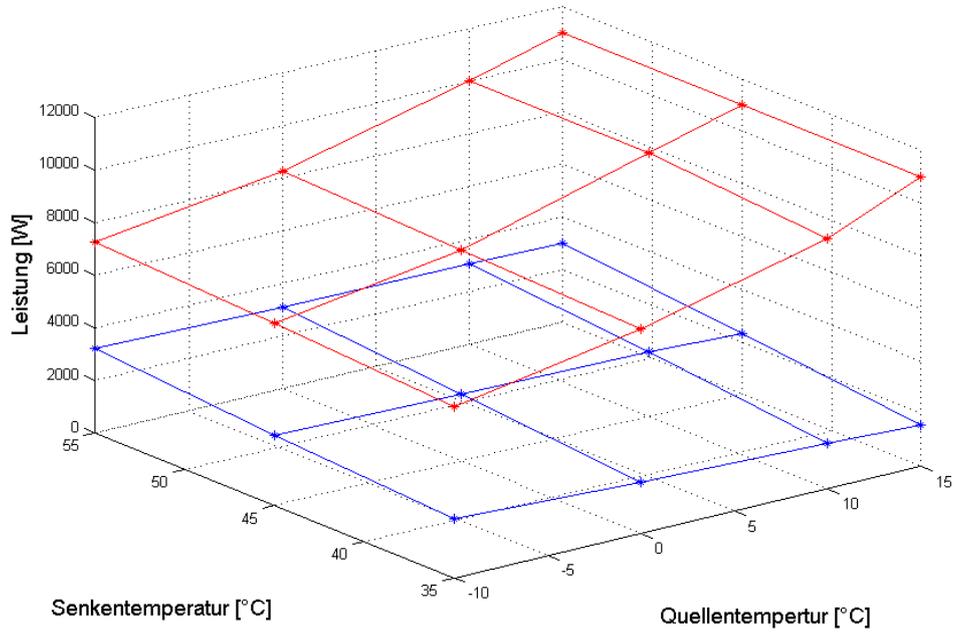


Abb. 3.2: Stützpunkte von Stiebel-Eltron.

In Rot ist der Verlauf der Heizleistung zu sehen und in Blau der Verlauf der elektrischen Leistungsaufnahme.

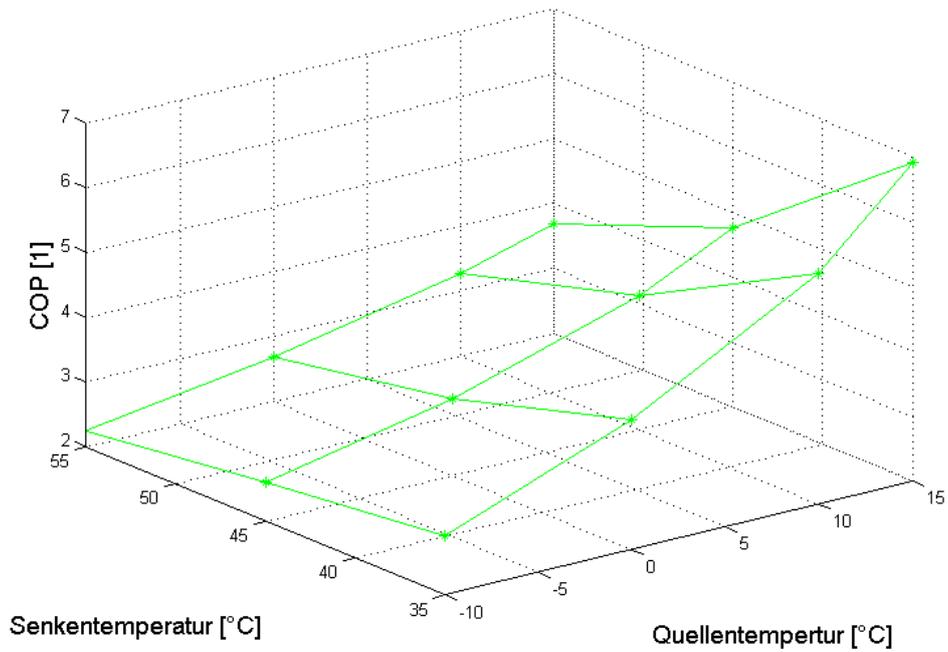


Abb. 3.3: Stützpunkte der Leistungszahl von Stiebel-Eltron.

Zu den Stützstellen wird der Kompressorleistung folgender Teillastwirkungsgrad überlagert:

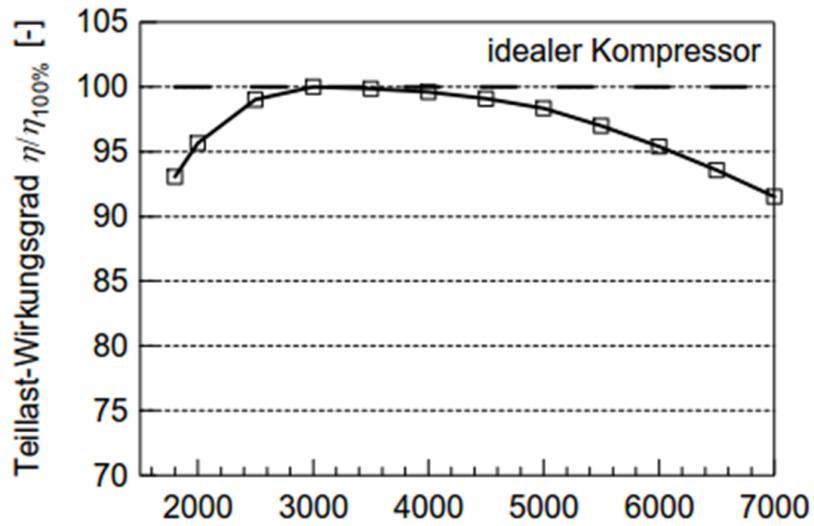


Abb. 3.4: Beispielhafter Verlauf eines Teillastwirkungsgrades.

Dieser Verlauf wurde dem Dokument "Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung" der Hochschule Luzern [4, S.70] entnommen.

### 3.2 Validierung des Teillastverhaltens des Wärmepumpenmodells

Die Validierung des Wärmepumpenmodells erfolgt über den Vergleich von Grafiken, welche von der Hochschule Luzern veröffentlicht wurden und mittels Simulation rekonstruiert werden. Die Vergleichsbasis ist das Abbild der Leistungszahl über der Kompressordrehzahl. Die Hochschule Luzern hat in ihrer Arbeit "Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung" die Grafiken der Abbildung 3.5 einer selbst gebauten, realen Maschine publiziert. Soll das Modell ein ähnliches Verhalten aufweisen, müssen folgende Punkte erfüllt sein:

- Die Leistungszahl steigt mit abnehmender Drehzahl infolge des geringeren Temperaturhubes.
- Der Verlauf der Leistungszahl bei einer höheren Aussentemperatur muss auf einem höheren Niveau liegen als der Verlauf einer tieferen Aussentemperatur.
- Durch den Teillastwirkungsgrad des Kompressors erreicht der Verlauf der Leistungszahl ein Maximum. Dieses Maximum entspricht der optimalen Drehzahl  $n_{opt}$ . Bei der Regelung der Wärmepumpe soll diese optimale Drehzahl nicht unterschritten werden. Liegt der erforderliche Wärmebedarf unterhalb dieser optimalen Drehzahl, so wird die Wärmepumpe (mit der optimalen Drehzahl) gezykelt.

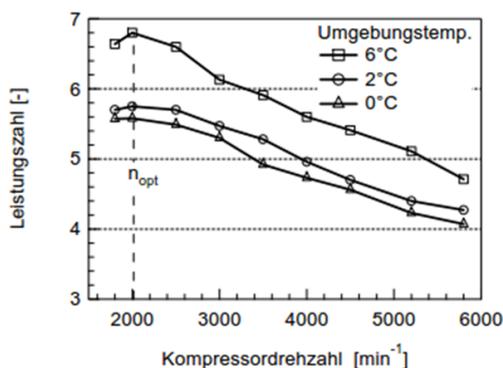


Abb. 7-8: Leistungszahl ohne Berücksichtigung der Ventilatorleistung in Funktion der Kompressordrehzahl des Inverter-Scroll Kompressors ohne Dampfeinspritzung aus Messungen für 0°C, 2°C und 6°C Umgebungstemperatur, 85% relative Feuchtigkeit, 3360 m<sup>3</sup>/h Luftvolumenstrom, Heizkurve Minergie (25°C Rücklauftemperatur, 30°C Vorlauftemperatur bei -10°C Umgebungstemperatur)

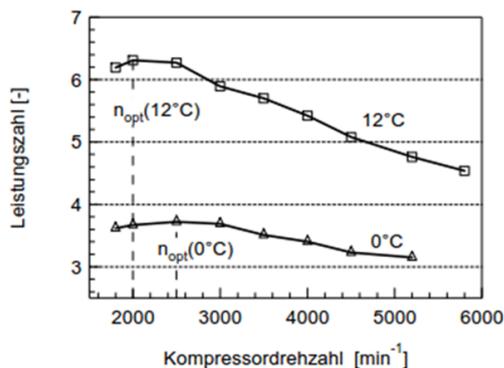


Abb. 7-10: Leistungszahl ohne Berücksichtigung der Ventilatorleistung in Funktion der Kompressordrehzahl des Inverter-Scroll Kompressors ohne Dampfeinspritzung aus Messungen für 0°C und 12°C Umgebungstemperatur, 85% relative Feuchtigkeit, 3360 m<sup>3</sup>/h Luftvolumenstrom, Heizkurve sanierter Altbau (38°C Rücklauftemperatur, 46°C Vorlauftemperatur bei -10°C Umgebungstemperatur)

Abb. 3.5: Beispielhafter Verlauf des COP in Abhängigkeit der Drehzahl.

Diese Grafiken wurden dem Dokument "Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung" der Hochschule Luzern [4, S.74/75] entnommen.

Der Modellverlauf aus Abbildung 3.6 genügt den auf Seite 8 erwähnten Kriterien. Vergleicht man den Verlauf der Leistungszahl in Abhängigkeit der Drehzahl (Abbildung 3.6) und den Verlauf des Carnot-Wirkungsgrades in Abhängigkeit der Kondensationstemperatur (Abbildung 3.7), sind Ähnlichkeiten im Anstieg zu erkennen. Dieses Phänomen ist ein weiteres Indiz für die Gültigkeit des Wärmepumpenmodells, da der Carnot-Wirkungsgrad ein Naturgesetz darstellt. Die Effizienz der Leistungsregelung basiert auf dem kleineren Temperaturhub bei tiefen Drehzahlen (Leistungsanpassung) und der damit besseren Leistungszahl.

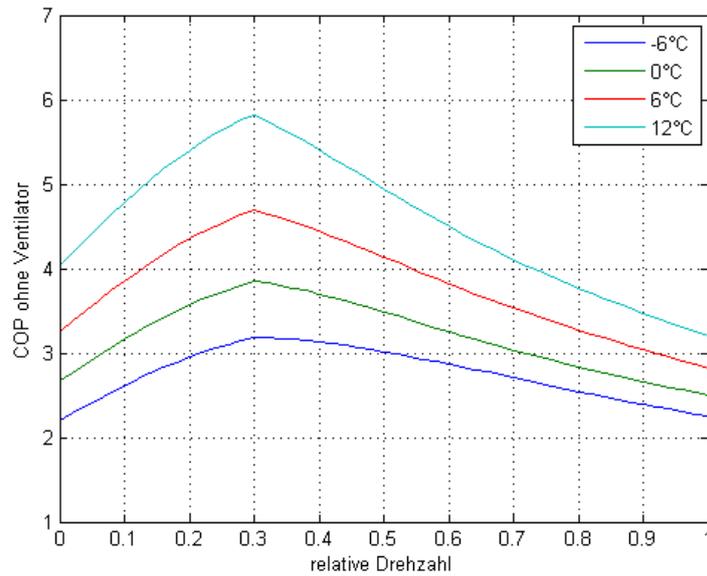


Abb. 3.6: Verlauf der Leistungszahl in Abhängigkeit der Drehzahl für das Wärmepumpenmodell

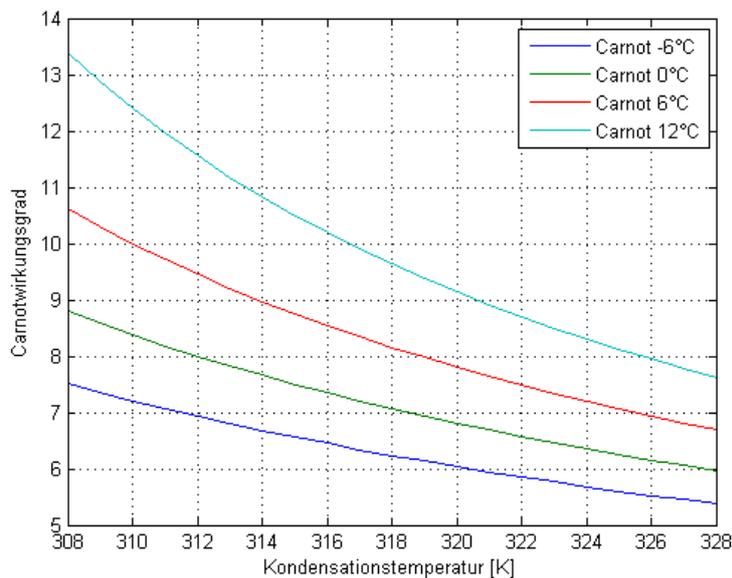


Abb. 3.7: Verlauf der des Carnot-Wirkungsgrades für Wärmepumpen in Abhängigkeit der Kondensationstemperatur

In Abbildung 3.8 wurden die Heizleistung und die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors unter Berücksichtigung des Teillastverhaltens in Abhängigkeit der Drehzahl dargestellt. Die Heizleistung wird linear zur Kompressordrehzahl verringert. Die elektrische Leistungsaufnahme weist jedoch einen nicht linearen Zusammenhang auf. Dieses Verhalten deckt sich relativ gut mit den Messungen der Hochschule Luzern in Abbildung 3.9. Die Graphen 3.8 und 3.9 zeugen von einem realitätsnahen Verhalten des Wärmepumpenmodells.

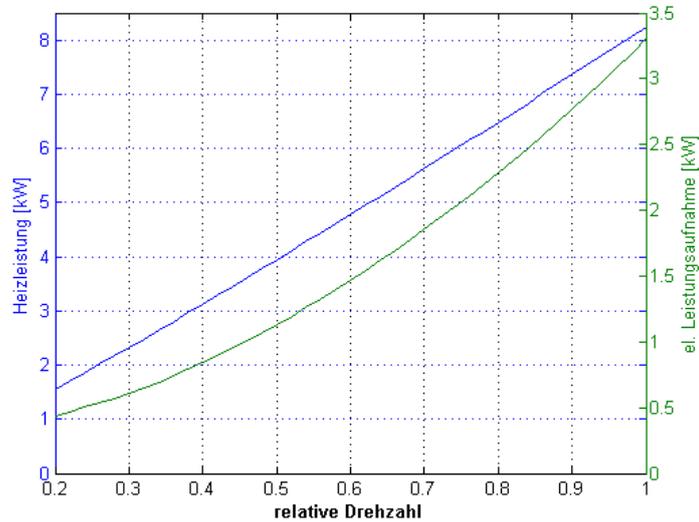


Abb. 3.8: Verlauf der Heizleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme für 0°C Aussentemperatur.

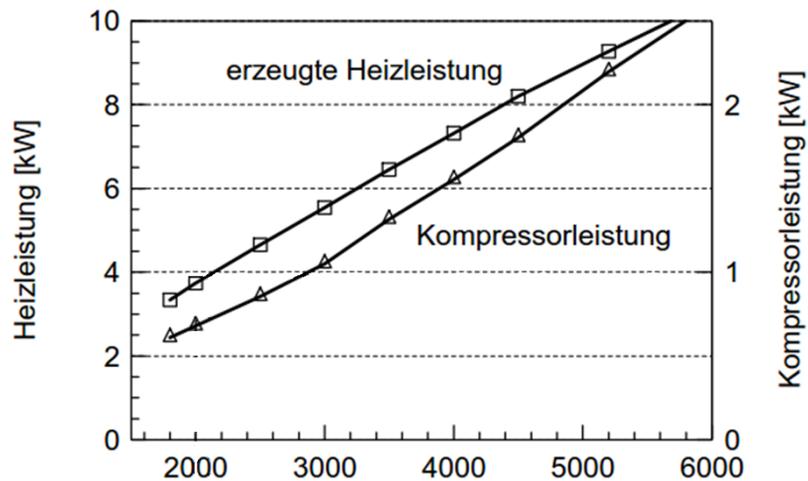


Abb. 3.9: Verlauf der Heizleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme für 0°C Aussentemperatur.

Diese Grafik wurden dem Dokument "Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung" der Hochschule Luzern [4, S.70] entnommen.

## 4 Annahmen und Vereinfachungen

Die Simulationen und Untersuchungen in dieser Projektarbeit unterstehen gewissen Annahmen und Vereinfachungen. Um diese Annahmen und Vereinfachungen zu erläutern, ist ein Blick in die Regelung leistungsgeregelter Wärmepumpen unumgänglich. Die leistungsgeregelte Wärmepumpe wird nach zwei Kriterien geregelt;

- Die geforderte Heizleistung muss gedeckt werden.
- Der Betrieb der Wärmepumpe soll nach der maximal möglichen Effizienz ablaufen.

Der zweite Punkt - die Regelung nach der maximal möglichen Effizienz - erlaubt es nicht, den ganzen regelbaren Drehzahlbereich eines Kompressors auszunutzen. Reduzieren wir die Drehzahl einer Wärmepumpe, so steigt die Arbeitszahl und damit die Effizienz der Wärmepumpe und zwar bis zu einem Punkt, der "optimale Drehzahl"  $n_{opt}$  genannt wird. Die optimale Drehzahl wird von mehreren Parametern beeinflusst. Dies sind Teillastwirkungsgrad, Luftfeuchtigkeit, Umgebungstemperatur und Luftvolumenstrom. Der dominierende Faktor ist der Teillastwirkungsgrad. In dieser Simulation werden die anderen drei Faktoren Luftfeuchtigkeit, Umgebungstemperatur und Luftvolumenstrom vernachlässigt. Der Kompressor wird also immer bis zu einer optimalen Drehzahl von 30% gefahren. Unterhalb von 30% wird die Wärmepumpe mit einer relativen Drehzahl von 30% getaktet. Diese Annahmen vereinfachen die Simulation und stützen sich auf die Untersuchungen der Hochschule Luzern. [4, S. 78]

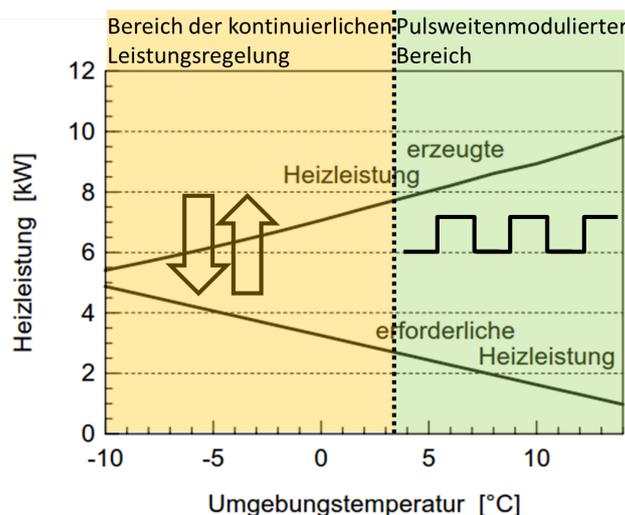


Abb. 4.1: Betriebsweise des Leistungsreglers.

In Orange ist der kontinuierlich leistungsgeregelte Bereich zu sehen und in Grün der pulswitengemittelte Bereich.

Die Luftfeuchtigkeit wird noch in einem weiteren Punkt vernachlässigt, nämlich der Abtauung. In der Simulation sind keine Abtauungsprozesse hinterlegt. Der Theorie nach müsste die leistungsgeregelte Wärmepumpe weniger Abtauungszyklen aufweisen als eine Wärmepumpe mit Zweipunktregler im gleichen Einsatzgebiet [4]. Gemäss Praktiker Tobias Oswald ist dies unter Laborbedingungen wirklich der Fall. Eine generelle Aussage über den Unterschied in der Häufigkeit von Abtauzyklen zwischen leistungsgeregelten Wärmepumpen und konventionell geregelten Wärmepumpen kann er aus seiner Erfahrung nicht machen. Denn der Ort der Aufstellung sei viel entscheidender als die Art der Regelung. Steht eine Wärmepumpe in einem Seetal, habe sie automatisch viel mehr Abtauzyklen als eine Wärmepumpe in weniger nebelbehafteten Gebieten. Die Vernachlässigung der Abtauungsprozesse vereinfacht das Projekt. Alleine über die Art der Abtauungsprozesse (z.B. Prozessumkehr, Ventilatornachlauf, Heissgaseinspritzung etc.) und deren Auswirkungen könnte eine Projektarbeit darstellen.

## 5 Optimale Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen

### 5.1 Leistungsregler

Der Leistungsregler regelt und steuert die Wärmepumpe. Im Ansatz entspricht der Regler einer gewöhnlichen Heizkurvenregelung - also einer Störgrössenaufschaltung.

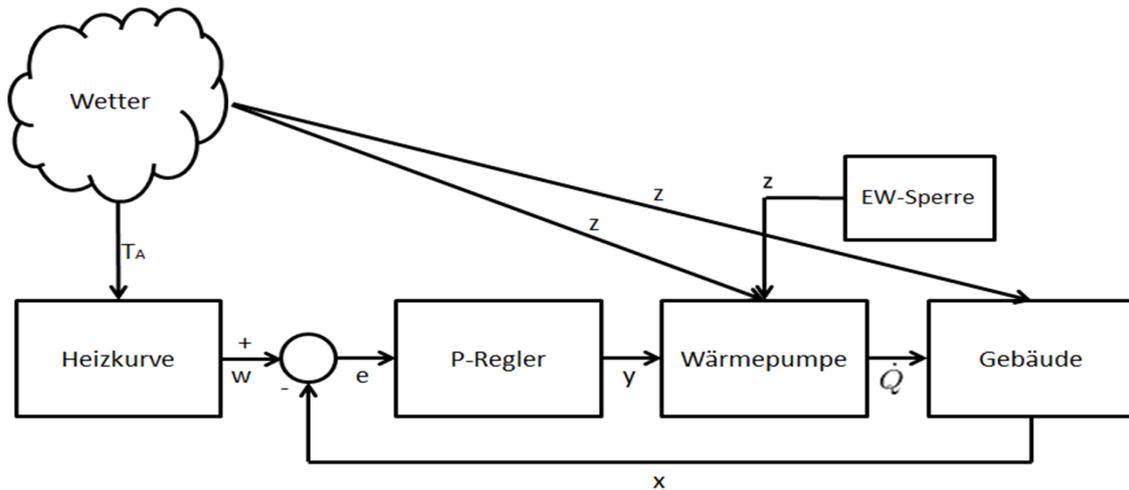


Abb. 5.1: Grundschemata des Leistungsreglers / Heizkurvenregler.

$T_A$  = Aussentemperatur,  $w$  = Sollwert Rücklauf,  $x$  = Istwert Rücklauf,  $e$  = Regelabweichung,  $y$  = Stellgrösse,  $\dot{Q}$  = Wärmestrom,  $z$  = Störgrössen

Durch die Bildung eines laufenden Mittelwertes der Aussentemperatur weist die Solltemperatur des Rücklaufs keine grossen Schwankungen auf und der Regler arbeitet stabiler. Idealerweise würde dem konventionellen Heizkurvenregler eine Raumtemperaturaufschaltung integriert. Die Raumtemperaturaufschaltung schiebt die Heizkurve nach unten oder oben bis zu einem einstellbaren Maximal- bzw. Minimalwert. Diese Regelung entspricht einer Kaskaden-Struktur mit überlagertem Raumtemperatur-Regler und unterlagertem Vorlauftemperatur-Regler (vgl. Abbildung 5.2). Wichtig ist, dass der PI-Regler des überlagerten Raumtemperatur-Reglers beim Überschreiten der Heizgrenze zurückgesetzt wird. Ist dies nicht der Fall, schiebt der I-Anteil beim Einsetzen der Heizperiode die Heizkurve nach unten, um den Temperaturüberschuss des Sommers zu kompensieren (vgl. Abbildung 5.3). Der Raumtemperatureinfluss bietet den Vorteil, dass die Heizkurve nicht mehr ganz genau eingestellt werden muss. Auch wenn die Heizkurve ein wenig zu hoch oder zu tief platziert ist, wird die Ungenauigkeit vom Raumtemperaturregler angepasst. Der Raumeinfluss ist kommunikativ im Vorteil im Vergleich zu Ventilen an den Heizkörpern, welche keine kommunikative Verbindung zur Heizungssteuerung aufweisen.

Der Kompressor kann nicht stufenlos von null bis hundert Prozent gefahren werden. In dieser Simulation erreicht die Wärmepumpe das Maximum der Leistungszahl bei einer relativen Drehzahl von 30% (vgl. Abbildung 3.6 auf Seite 9). Unterhalb von 30% wird das Signal des P-Reglers mittels Pulsweitenmodulation moduliert und die Wärmepumpe mit 30% der Drehzahl getaktet. Dabei sind zwei Punkte zu beachten:

- Die Pulse auf die Wärmepumpe dürfen nicht zu kurz sein. Auch eine minimale Ausschaltdauer muss garantiert sein, damit der Kompressor beim Start keinen zu hohen Gegendruck verspürt.
- Die Umschaltung vom kontinuierlichen Signal zum pulsweitenmodulierten Signal benötigt eine Hysterese. Ohne die Hysterese ist ein ständiges Umschalten der Regler möglich. Dieser Vorgang verursacht unzulässig kurze Einschaltpulse auf die Wärmepumpe.

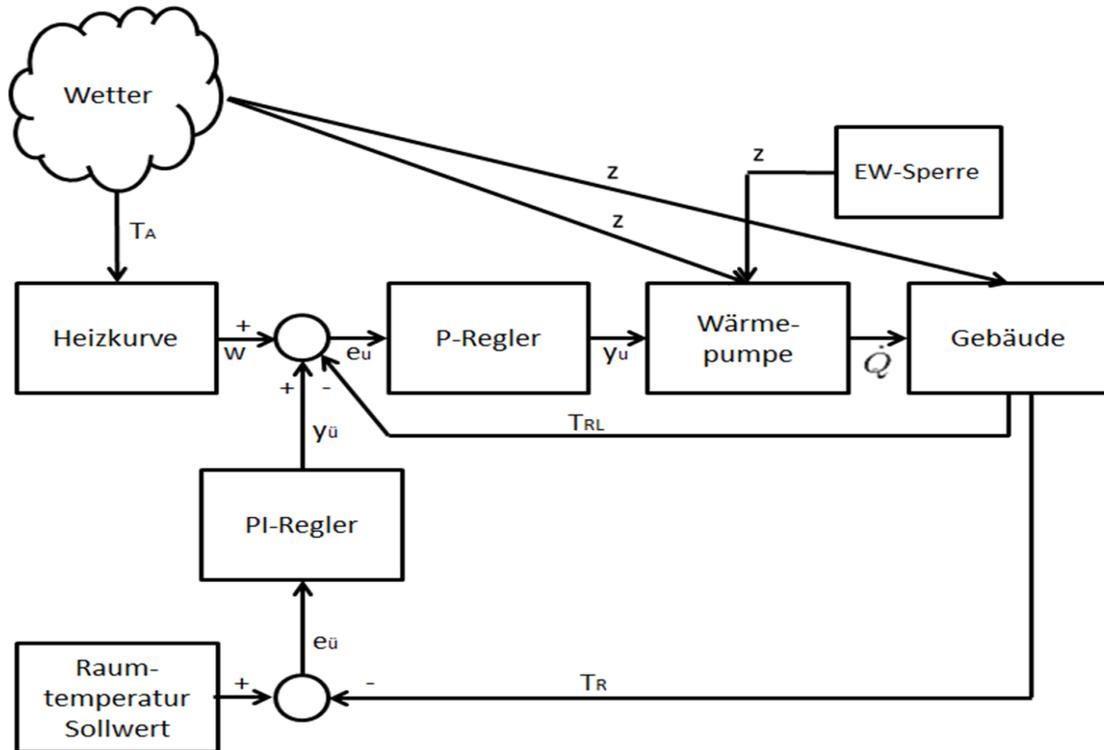


Abb. 5.2: Kaskadenregelung mit überlagertem Raumtemperatur-Regler und unterlagertem Rücklauf-Regler.

$T_A$  = Aussentemperatur,  $w$  = Sollwert Rücklauf,  $T_{RL}$  = Istwert Rücklauf,  $e_u$  = Regelabweichung unterlagertem Regelkreis,  $y_u$  = Stellgrösse unterlagertem Regelkreis,  $T_R$  = Raumtemperatur,  $e_{\bar{u}}$  = Regelabweichung überlagertem Regelkreis,  $y_{\bar{u}}$  = Stellgrösse überlagertem Regelkreis,  $\dot{Q}$  = Wärmestrom,  $z$ =Störgrössen



Abb. 5.3: Fehlerhafte Jahressimulation.

Der I-Anteil des PI-Reglers hat die Heizkurve im Herbst nach unten korrigiert, weil der I-Anteil nicht zurückgesetzt wurde mit der Heizgrenze.

Die Brauchwarmwasser-Aufbereitung erweitert die Regelung. In diesem Projekt wird das Brauchwarmwasser einfach über einen Zweipunktregler aufbereitet.

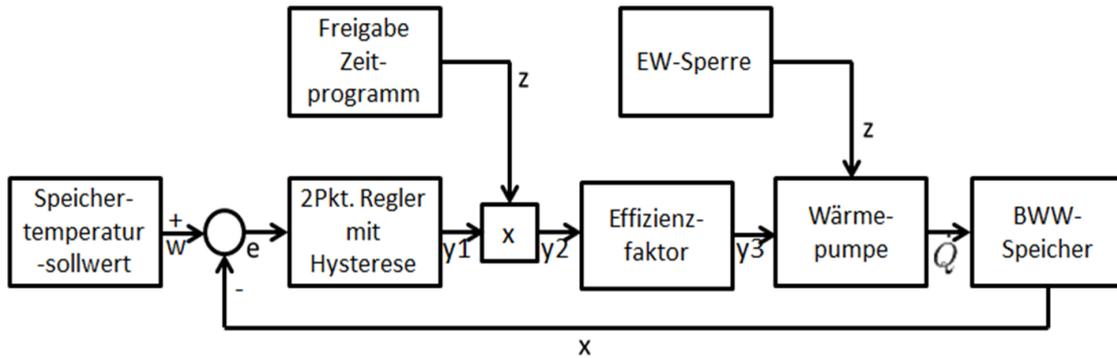


Abb. 5.4: Schema der Brauchwarmwasseraufbereitung.

$w$  = Brauchwarmwasserspeichertemperatur Sollwert,  $e$  = Regelabweichung,  $y1$  = Stellgrösse des Reglers,  $y2$  = Stellgrösse nach Zeitprogramm und EW-Sperre,  $y3$  = Stellgrösse nach Effizienzfaktor,  $\dot{Q}$  = Wärmestrom

Die Brauchwarmwasser-Aufbereitung hat Priorität. Das heisst, falls Brauchwarmwasser und die Heizung Wärme benötigen, wird zuerst das Brauchwarmwasser aufbereitet. Das Signal  $y2$  aus Abbildung 5.4 hat den binären Charakter ein/aus. Der Effizienzfaktor bestimmt die Drehzahl des Kompressors und Ventilators. Die Überlegung dahinter basiert auf dem Verlauf des Teillastwirkungsgrades. Mit zunehmender Drehzahl sinkt die Effizienz der Wärmepumpe. Falls es die äusseren Umstände wie Wärmebedarf der Heizung, Freigabezeit der Brauchwarmwasseraufbereitung oder dergleichen zulassen, wird das Brauchwarmwasser mit reduzierter Drehzahl aufbereitet.

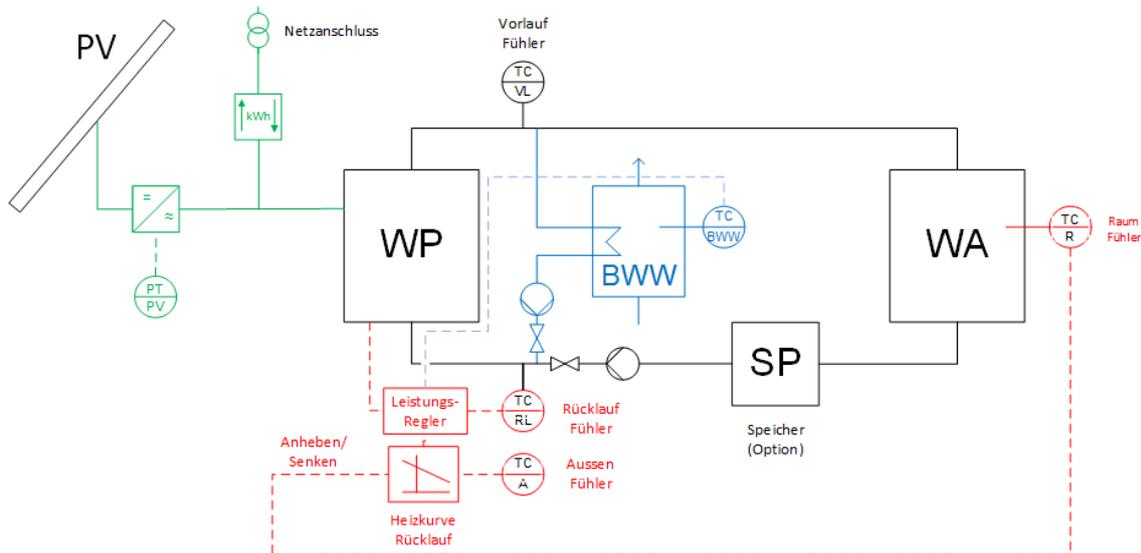


Abb. 5.5: Hydraulikschema mit den Messstellen und der logischen Verknüpfung

## 5.2 Theorie zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen

Die Theorie zur optimalen Leistungsregelung von Kompressor und Ventilator finden wir im Dokument der Hochschule Luzern "Effizienz Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung" [4] im Kapitel 7.4 auf Seite 82. Demnach zeigen theoretische und experimentelle Untersuchungen, dass zur Erreichung bestmöglicher Effizienz zwingend Ventilator und Kompressor drehzahlvariabel betrieben werden müssen. Der springende Punkt ist die relativ hohe elektrische Leistungsaufnahme des Ventilators. Vor allem im Teillastbetrieb des Kompressors fällt die Ventilatorleistung speziell ins Gewicht. Mit der Reduktion der Drehzahl bzw. des Volumenstroms lässt sich wegen dem Affinitätsgesetz  $P_{el} \propto \dot{V}^3$  viel Energie sparen. Würde der Ventilator mit konstant voller Drehzahl betrieben, würde die Ventilatorleistung mit der Reduktion der Kompressorleistung immer mehr ins Gewicht fallen.

Andererseits darf die Ventilator Drehzahl auf keinen Fall zu stark reduziert werden. Bei einer zu starken Reduktion der Ventilator Drehzahl sinkt die erreichbare Arbeitszahl aufgrund des höheren inneren Temperaturhubes (Im Verdampfer kann der Umgebung nicht genügend Wärme entzogen werden, um das Kältemittel zu verdampfen. So reduziert das Expansionsventil den Verdampfungsdruck, um das Kältemittel auf einem tieferen Druck zu verdampfen und der innere Temperaturhub steigt). Für diesen Fall wurde das Wärmepumpenmodell gemäss Kapitel 3 - Verbesserung des Wärmepumpenmodells - verbessert.

Dieselben Gedankengänge lassen sich mit der Heizkreispumpe durchführen. Jedoch ist die elektrische Leistungsaufnahme der Heizkreispumpe wesentlich kleiner und eine Reduktion des Wassermassenstromes führt sofort zu einer erhöhten Temperatur der Wärmeabgabe. Dies wirkt sich negativ auf die Arbeitszahl der Wärmepumpe aus. Interessant ist die Untersuchung der Umwälzpumpe wegen der sehr langen Betriebszeiten, welche dieses Bauteil energetisch wichtig macht. Moderne Umwälzpumpen können bis auf eine minimale Leistung von 4W reduziert werden (Grundfos Alpha 2). Aufgrund der Affinitätsbeziehung entspricht dies etwa einem Drehzahlbereich von 50-100%.

Auf der Basis dieser Überlegungen werden folgende Simulationen durchgeführt:

1.	Zweipunktregler On/Off	Simulation nach Heizkurve und Raumtemperatureinfluss mit den selben Stützpunkten wie die leistungsgeregelte Wärmepumpe ohne Teillastwirkungsgrad und ohne Brauchwarmwasseraufbereitung
2.	Alleinige Drehzahlregelung des Kompressors (30-100%)	Simulation nach Heizkurve und Raumtemperatureinfluss mit Teillastwirkungsgrad ohne Brauchwarmwasseraufbereitung. Der Ventilator wird On/Off geschaltet. Die Umwälzpumpe läuft durch.
3.	Drehzahlregelung des Kompressors (30-100%) und des Ventilators (30-100%)	Simulation nach Heizkurve und Raumtemperatureinfluss mit Teillastwirkungsgrad ohne Brauchwarmwasseraufbereitung. Der Kompressor und der Ventilator werden simultan linear nach der erforderlichen Heizleistung geregelt. Die Umwälzpumpe läuft durch.
4.	Drehzahlregelung von Kompressor (30-100%), Ventilator (30-100%) und Umwälzpumpe (50-100%)	Simulation nach Heizkurve und Raumtemperatureinfluss mit Teillastwirkungsgrad ohne Brauchwarmwasseraufbereitung. Alle Komponenten werden simultan linear nach der erforderlichen Heizleistung geregelt.

Tab. 5.1: Übersicht über die Simulationen zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen ohne Brauchwarmwasser.

Die Simulationen 1-4 werden jeweils für jeden Gebäudetyp (SFH15, SFH45 und SFH100) durchgeführt. Die Si-

mulationen mit Brauchwarmwasser werden nur für die beste Lösung aus den Simulationen 1-4 durchgeführt.

### 5.3 Systematische Untersuchung der erreichbaren JAZ ohne Brauchwarmwasser

Vor der Untersuchung der erreichbaren Jahresarbeitszahl mittels Simulation muss geklärt werden, welche Faktoren einen Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpe haben. Es wird unterschieden zwischen der Jahresarbeitszahl nur über dem Wärmepumpenblock der Simulation und der Jahresarbeitszahl inklusive den Hilfsaggregaten.

<b>Einflussfaktor JAZ nur WP</b>	<b>Begründung</b>
Quelleneintrittstemperatur	Die Quelleneintrittstemperatur bietet die Grundlage zur Berechnung des Temperaturhubes und kann nicht beeinflusst werden.
Abkühlung der Luft im Verdampfer	Die Abkühlung der Luft wird vom Luftmassenstrom durch den Verdampfer und die entzogene Quellenleistung beeinflusst. Mit zunehmender Abkühlung der Luft muss der Druck im Verdampfer reduziert werden um das Kältemittel zu verdampfen. Dieser Vorgang erhöht den inneren Temperaturhub und wirkt sich negativ auf die Effizienz der Wärmepumpe aus.
Senkenaustrittstemperatur	Je höher die Senkenaustrittstemperatur, desto höher ist der Temperaturhub der Wärmepumpe und desto tiefer fällt die Leistungszahl der Wärmepumpe aus.
Teillastwirkungsgrad	Der Teillastwirkungsgrad ist von der Konstruktion des Kompressors abhängig und beeinflusst die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors und damit auch das Verhältnis der Wärmeleistung zur elektrischen Leistungsaufnahme (=Leistungszahl).

<b>Einflussfaktor JAZ inklusive Hilfsaggregate</b>	<b>Begründung</b>
Leistungsaufnahme des Kompressors	Die Leistungsaufnahme des Kompressors ist in der Simulation gegeben durch das Wärmepumpenmodell und wurde in den Punkten "JAZ nur WP" erläutert.
Leistungsaufnahme des Ventilators	Durch eine geschickte Regelung des Ventilators kann die elektrische Leistungsaufnahme reduziert werden, ohne dass eine Effizienzeinbusse durch die (zu starke) Abkühlung der Luft im Verdampfer stattfindet.
Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe	Die elektrische Leistungsaufnahme soll durch die Steuerung und Regelung gesenkt werden, ohne dass sich aufgrund des reduzierten Massestromes die Senktemperatur zu stark erhöht.

Tab. 5.2: Einflussfaktoren auf die Effizienz des Wärmepumpenmodells.

### 5.3.1 Diskussion der Resultate zur optimalen Einbindung ohne Brauchwarmwasser

**Als optimale Regelstrategie hat sich die Leistungsregelung des Kompressors, des Ventilators und der Umwälzpumpe erwiesen. Dieses Resultat konnte mit allen Gebäudemodellen beobachtet werden.**

Die Simulationen haben gezeigt, dass sich die Leistungsregelung der Wärmepumpe energetisch lohnt. Die Leistungsregelung hat folgende Effekte:

- Der Temperaturhub sinkt durch die Leistungsregelung der Wärmepumpe im Vergleich zur Zweipunktregelung der Wärmepumpe (vgl. Abbildung 5.6).
- Die Hilfsaggregate Ventilator und Umwälzpumpe benötigen deutlich weniger Energie (vgl. Abbildung 5.7).
- Die Steigerung der JAZ mit Hilfsaggregaten ist in energetisch guten Gebäuden (SFH 15) höher als in energetisch schlechten (SFH 100). Grund dafür ist, dass der elektrische Energieverbrauch bei Energetisch guten Gebäuden stärker ins Gewicht fällt als bei energetisch schlechteren Gebäuden. Dies zeigt sich in Abbildung 5.8.
- Im Vergleich der Kosten zwischen Zweipunktregelung und Leistungsregelung aller Komponenten werden zwischen CHF 52.45 (SFH 15), CHF 82.25 (SFH 45) und CHF 107.80 (SFH 100) eingespart. Auf eine Lebensdauer von 20 Jahren sind dies zwischen CHF 1000 und CHF 2200. Nach Angaben von Stiebel-Eltron ist die leistungsgeregelte Wärmepumpe sogar günstiger als ein vergleichbares Modell mit konventioneller Regelung.

**Leistungsregelung aller Komponenten**

	<b>SFH 15</b>	<b>SFH 45</b>	<b>SFH 100</b>
<b>JAZ nur WP</b>	3.03	3.6	3.76
<b>JAZ mit HA</b>	2.89	3.43	3.58
<b>Jahreskosten für die Heizung [CHF]</b>	205.55	471.65	929.40
<b>Mittlere Temperaturdifferenz VL-RL [K]</b>	1.92	1.97	2.06
<b>Mittlere Temperaturdifferenz Quelle ein-aus [K]</b>	2.04	3.25	5.08
<b>Mittlere Temperaturdifferenz Quelle Eintritt- Senke Austritt [K]</b>	23.69	24.27	27.07
<b>Prozentualer Anteil des elektrischen Bedarfs der Hilfsapparate [%]</b>	7.76	6.11	1.49

Tab. 5.3: Hintergrunddaten der Simulation 4 - Leistungsregelung des Kompressors, Ventilators und Umwälzpumpe

**Zweipunktregler**

	<b>SFH 15</b>	<b>SFH 45</b>	<b>SFH 100</b>
<b>JAZ nur WP</b>	3.08	3.7	3.84
<b>JAZ mit HA</b>	2.33	2.93	3.21
<b>Jahreskosten für die Heizung [CHF]</b>	258.00	553.90	1037.20
<b>Mittlere Temperaturdifferenz VL-RL [K]</b>	2.44	1.93	1.63
<b>Mittlere Temperaturdifferenz Quelle ein-aus [K]</b>	2.21	3.36	5.1
<b>Mittlere Temperaturdifferenz Quelle Eintritt- Senke Austritt [K]</b>	25.44	25.93	29.7
<b>Prozentualer Anteil des elektrischen Bedarfs der Hilfsapparate [%]</b>	27.3	21.9	17.04

Tab. 5.4: Hintergrunddaten der Simulation 1 - Zweipunktregler

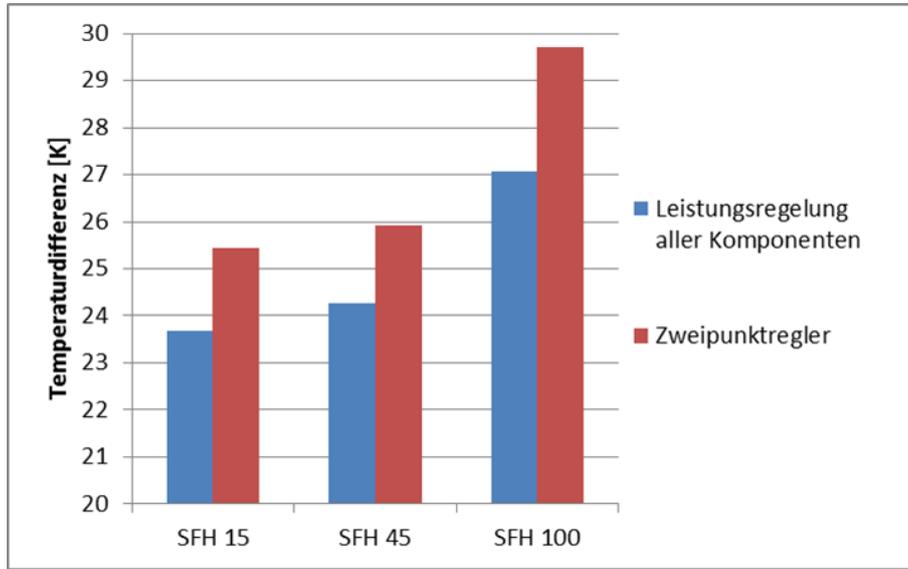


Abb. 5.6: Mittlerer Temperaturhub vom Quelleneintritt zum Senkenaustritt.

Der mittlere Temperaturhub ist bei der leistungsgeregelten Wärmepumpe in allen Gebäudetypen tiefer.

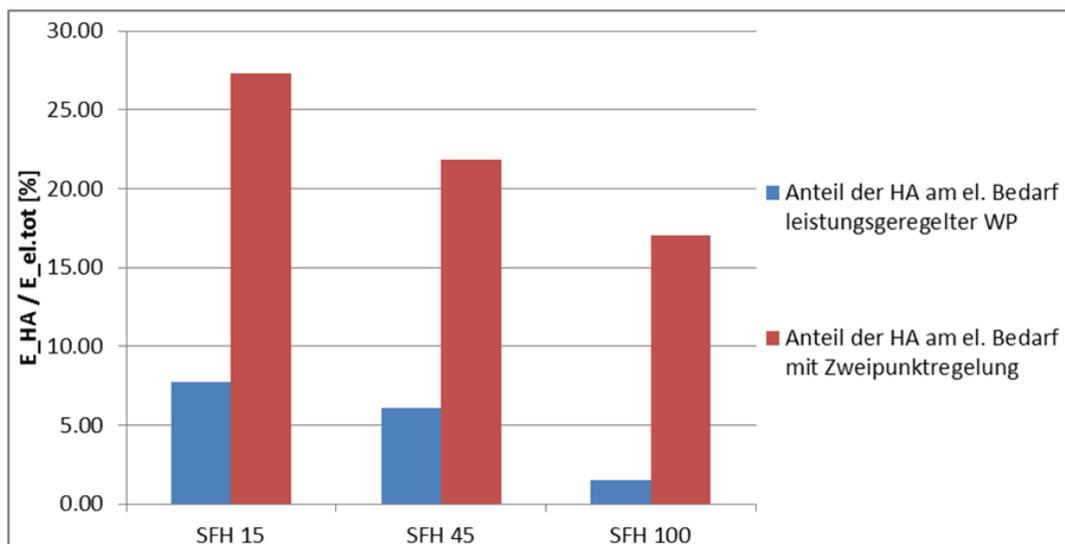


Abb. 5.7: Prozentualer Anteil des elektrischen Bedarfs der Hilfsapparate am gesamten elektrischen Bedarf.

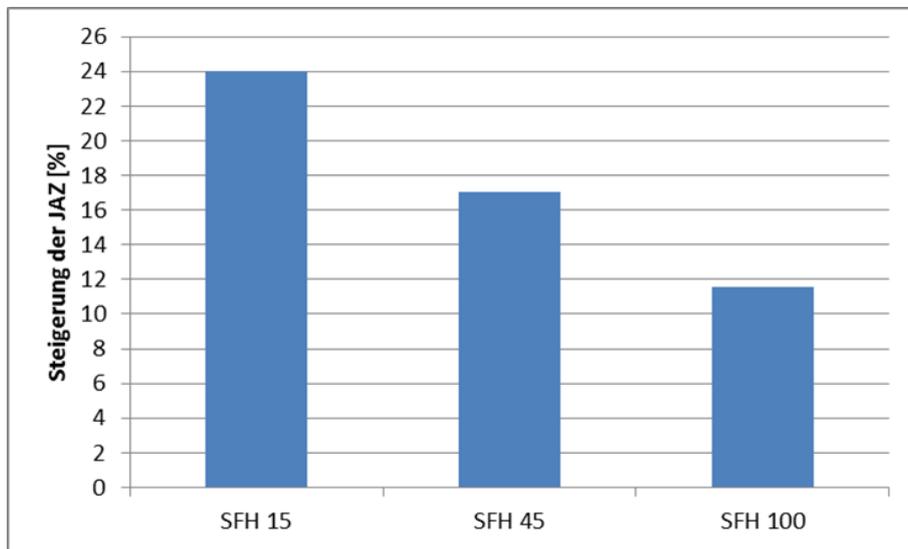


Abb. 5.8: Prozentuale Steigerung der Jahresarbeitszahl mit Hilfsaggregaten von der Regelstrategie "Leistungsregelung Kompressor, Ventilator und Umwälzpumpe" zur Regelstrategie "Zweipunktregler"

SFH 15, ohne BWW, mit Sperrzeiten (11:25-12:25, 17:00-19:00, 21:30-22:30), ohne Nachtabsenkung, mit Raumtemperatureinfluss, Preismodell 2014

Nr.	Regler	JAZ nur WP [1]	JAZ inkl. HA [1]	Kosten [CHF]	Q tot [kWh]	$\bar{T}_{Room}$ [°C]	$T_{std,Room}$ [°C]	$T_{pro, Einschaltung}$ [min/1]
1	Zweipunktregler On/Off	3.08	2.33	258.00	2693.2	20.84	1.23	316
2	Drehzahlregelung Kompressor (30-100%)	3.02	2.09	283.85	2681.4	20.78	1.23	217
3	Drehzahlregelung Kompressor (30-100%) und Ventilator(30-100%)	3.02	2.44	243.20	2681.4	20.78	1.23	217
4	Drehzahlregelung Kompressor (30-100%), Ventilator(30-100%) und Umwälzpumpe(50-100%)	3.02	2.89	205.55	2683.6	20.78	1.23	219

Tab. 5.5: Übersicht der Resultate SFH15 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen ohne Brauchwarmwasser.

Die Kosten entsprechen den totalen Heizkosten, da die Photovoltaikleistung für diese Simulationen auf null gesetzt wurde. Dank dem Raumtemperatureinfluss sind alle Simulationen aus den Tabellen 5.5, 5.6 und 5.7 in den Komfortparameter ähnlich und vergleichbar.

Das Optimum finden wir in Simulation 4. Die Jahresarbeitszahl mit Hilfsaggregaten erreicht ein Maximum von 2.89. Die Jahresarbeitszahl nur über dem Wärmepumpenblock des Simulationsmodells ist in den leistungsgeregelten Varianten 2-4 tiefer als die Jahresarbeitszahl der Zweipunktregelung. Die Erklärung liegt in dem Teillastwirkungsgrad, welcher in der Simulation 1 nicht vorhanden ist. Dem gegenüber steigt die Jahresarbeitszahl inklusive Hilfsaggregate von Simulation 2 bis 4 stetig. Grund dafür ist der geringere Energiebedarf der Hilfsaggregate mit der Zunahme der leistungsgeregelten Komponenten.

SFH 45, ohne BWW, mit Sperrzeiten (11:25-12:25, 17:00-19:00, 21:30-22:30), ohne Nachtabsenkung, mit Raumtemperatureinfluss, Preismodell 2014

Nr.	Regler	JAZ nur WP [1]	JAZ inkl. HA [1]	Kosten [CHF]	Q tot [kWh]	$\bar{T}_{Room}$ [°C]	$T_{std,Room}$ [°C]	$T_{pro, Einschaltung}$ [min/1]
1	Zweipunktregler On/Off	3.7	2.93	553.90	7623.7	20.38	0.83	164
2	Drehzahlregelung Kompressor (30-100%)	3.61	2.69	601.35	7574.5	20.34	0.80	202
3	Drehzahlregelung Kompressor (30-100%) und Ventilator(30-100%)	3.61	2.99	540.30	7574.6	20.34	0.80	201
4	Drehzahlregelung Kompressor (30-100%), Ventilator(30-100%) und Umwälzpumpe(50-100%)	3.60	3.43	471.65	7581.9	20.34	0.8	203

Tab. 5.6: Übersicht der Resultate SFH45 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen ohne Brauchwarmwasser.

Die beste Lösung finden wir in Simulation 4. Die JAZ nur über der Wärmepumpe (ohne Hilfsaggregate) findet in Simulation 1 - Zweipunktregler das Optimum. Dies lässt sich damit erklären, dass die Simulation mit Zweipunktregler keinem Teillastwirkungsgrad unterliegt. Simulation 2 unterliegt einem Teillastwirkungsgrad, daher sinkt die JAZ nur über die Wärmepumpe. Die JAZ inklusive Hilfsaggregate ist minimal, da die Hilfsaggregate nicht leistungsgeregelt sondern On/Off betrieben werden. Von Simulation 3 zu 4 liegt der Unterschied in der geregelten Umwälzpumpe. Die Jahresarbeitszahl nur über die Wärmepumpe sinkt aufgrund des höheren Temperaturhubes mit reduziertem Massenstrom der Umwälzpumpe. Jedoch führt die Leistungsregelung der Umwälzpumpe zu einem spürbaren tieferen elektrischen Leistungsbedarf. Im Vergleich zum Ventilator (max. = 150W) hat die Umwälzpumpe (max. = 65W) eine geringe Leistung. Die Umwälzpumpe hat deutlich mehr Betriebsstunden über das Jahr. Durch die Reduktion des Massenstromes der Umwälzpumpe kann die Leistung deutlich reduziert werden und die Regelung hat trotzdem noch Informationen über System durch den Rücklauf des Heizsystems.

SFH 100, ohne BWW, mit Sperrzeiten (11:25-12:25, 17:00-19:00, 21:30-22:30), ohne Nachtabsenkung, mit Raumtemperatureinfluss, Preismodell 2014

Nr.	Regler	JAZ nur WP [1]	JAZ inkl. HA [1]	Kosten [CHF]	Q tot [kWh]	$\bar{T}_{Room}$ [°C]	$T_{std,Room}$ [°C]	$T_{pro, Einschaltung}$ [min/1]
1	Zweipunktregler On/Off	3.84	3.21	1037.20	15822.5	20.18	0.97	140
2	Drehzahlregelung Kompressor (30-100%)	3.77	3.04	1090.65	15728	20.13	0.91	199
3	Drehzahlregelung Kompressor (30-100%) und Ventilator(30-100%)	3.77	3.23	1026.10	15727.2	20.13	0.91	199
4	Drehzahlregelung Kompressor (30-100%), Ventilator(30-100%) und Umwälzpumpe(50-100%)	3.76	3.58	929.40	15746.9	20.13	0.91	200

Tab. 5.7: Übersicht der Resultate SFH100 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen ohne Brauchwarmwasser.

Wiederum ist die Variante 4 mit der Leistungsregelung aller Komponenten die beste Systemlösung mit einer Jahresarbeitszahl inklusive Hilfsapparate von 3.58. Das Verhalten des Systems ist analog zu den Simulationen mit dem SFH 15 und SFH45 in den Tabellen 5.5 und 5.6.

## 5.4 Systematische Untersuchung der erreichbaren JAZ mit Brauchwarmwasseraufbereitung

Die Simulationen dieses Kapitels werden nur mit dem besten Regler aus den Untersuchungen im Kapitel 5.3.1 durchgeführt (Leistungsregelung der Komponenten Kompressor, Ventilator und Umwälzpumpe). Zur Untersuchung der erreichbaren Jahresarbeitszahl mit Brauchwarmwasseraufbereitung werden folgende Simulationen durchgeführt:

1.	konstanter Effizienzfaktor 1.0 (volle Leistung)	Das Brauchwarmwasser wird das ganze Jahr mit einem Effizienzfaktor von 1 aufbereitet.
2.	konstanter Effizienzfaktor 0.8	Das Brauchwarmwasser wird das ganze Jahr mit einem Effizienzfaktor von 0.8 aufbereitet.
3.	konstanter Effizienzfaktor 0.5	Das Brauchwarmwasser wird das ganze Jahr mit einem Effizienzfaktor von 0.5 aufbereitet.
4.	variabler Effizienzfaktor	Oberhalb der Heizgrenze arbeitet die Wärmepumpe mit einem Effizienzfaktor von 0.3 (optimale Drehzahl der Wärmepumpe). Vom Auslegungspunkt bei $-10\text{ °C}$ bis zur Heizgrenze bei $14\text{ °C}$ wird der Effizienzfaktor linear interpoliert (vgl. Abbildung 5.9). Das Ziel ist es, das Brauchwarmwasser möglichst effizient zu produzieren: Dies heisst mit geringer Stellgrösse auf die Wärmepumpe. Die geringe Stellgrösse hat jedoch auch eine geringere Leistung und damit einen erhöhten Zeitaufwand zur Brauchwarmwasser-Aufbereitung zur Folge. Dabei soll der Heizbetrieb möglichst nicht beeinflusst werden.

Tab. 5.8: Übersicht über die Simulationen zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit Brauchwarmwasser.

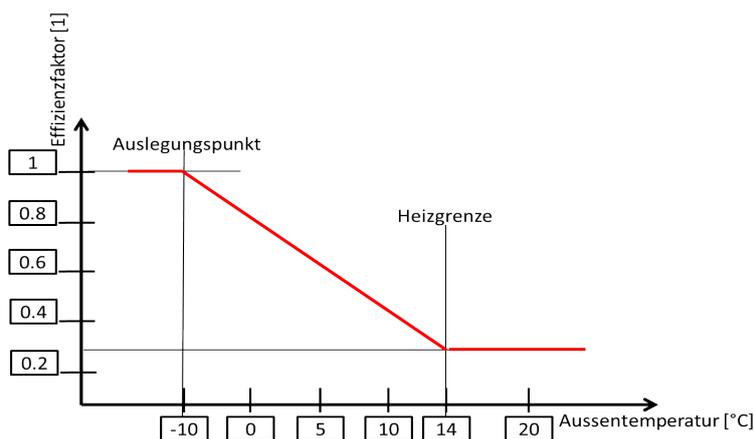


Abb. 5.9: Funktionsprinzip des variablen Effizienzfaktors.

Lineare Interpolation zwischen dem Auslegungspunkt bei  $-10\text{ °C}$  und der Heizgrenze bei  $14\text{ °C}$ . Der rote Verlauf entspricht der Funktion des Effizienzfaktors.

### 5.4.1 Diskussion der Resultate zur optimalen Einbindung mit Brauchwarmwasser

**Die beste Regelstrategie zur Brauchwarmwasser-Einbindung ist Regelung mit variablem Effizienzfaktor. Die Regelung mit variablem Effizienzfaktor überzeugt in der Jahresarbeitszahl, den Kosten, dem mittleren Temperaturhub der Brauchwarmwasseraufbereitung und der mittleren Einschaltzeit.**

Parameter	SFH 15		SFH 45		SFH 100	
	EF 1	VEF	EF 1	VEF	EF 1	VEF
JAZ mit HA	2.56	2.68	3.04	3.12	3.29	3.35
Steigerung der JAZ mit HA [%]	4.69		2.63		1.82	
JAZ BWW	2.73	2.86	2.77	2.97	2.72	2.99
Steigerung der JAZ BWW [%]	4.76		7.22		9.93	
Kostensparnis [CHF]	21.1		26.75		33	
mittlerer Temperaturhub während der BWW Aufbereitung [K]	45.37	39.26	47.24	39.80	51.58	41.8
mittlere Einschaltzeit pro Einschaltung [min/1]	175	251	173	209	169	192

Tab. 5.9: Übersicht der Resultate zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit Brauchwarmwasser.

Folgende Beobachtungen werden gemacht (vgl. Abbildungen 5.10, 5.11 und 5.12):

- In allen Simulationen wurde das Heizsystem durch die Brauchwarmwasseraufbereitung nicht beeinflusst.
- Die Arbeitszahl lässt sich durch die Reduktion der Stellgrösse zur Brauchwarmwasser-Aufbereitung erhöhen. Erwartungsgemäss ist der Einfluss auf die Jahresarbeitszahl umso geringer, je schlechter das Gebäude isoliert ist. Denn mit zunehmender energetischer Qualität der Gebäudehülle gewinnt der Anteil des Brauchwarmwassers an Bedeutung.
- Durch die Reduktion der Stellgrösse wird der mittlere Temperaturhub während der Brauchwarmwasseraufbereitung kleiner. Dies ist ein Indix für den effizienten Betrieb der Wärmepumpe.
- Durch die Reduktion der Stellgrösse wird der Zeitbedarf für die Brauchwarmwasser-Aufbereitung höher. Durch den variablen Effizienzfaktor passt sich die Stellgrösse der Aussentemperatur und damit auch der Heizleistung an.
- Die mittlere Einschaltdauer kann mit dem variablem Effizienzfaktor bis zu 30% gesteigert werden. Wieder ist der Einfluss auf die mittlere Einschaltdauer um so grösser, je besser das Gebäude isoliert ist. Denn mit zunehmender energetischer Qualität der Gebäudehülle gewinnt der Anteil des Brauchwarmwassers an Bedeutung.
- Die Kosteneinsparnisse sind mit CHF 21.10 (SFH 15), CHF 26.75 (SFH 45) und CHF 33.00 eher bescheiden. Jedoch kann die Regelstrategie ohne zusätzlichen materiellen Aufwand realisiert werden. Also lässt sich auf die Lebensdauer von 20 Jahren bis zu CHF 660 sparen.

Es gäbe natürlich noch eine Vielzahl verschiedener Regelstrategien. Zum Beispiel könnte man mit fixen Effizienzfaktoren für die verschiedenen Jahreszeiten arbeiten. In Zukunft könnte man sich auch vorstellen, das Brauchwarmwasser am Tage (über Mittag) zu produzieren, da dann die Aussentemperatur etwas höher ist. Momentan wird dies wegen den Hoch-Niedertarif-Preisstruktur nicht realisiert.

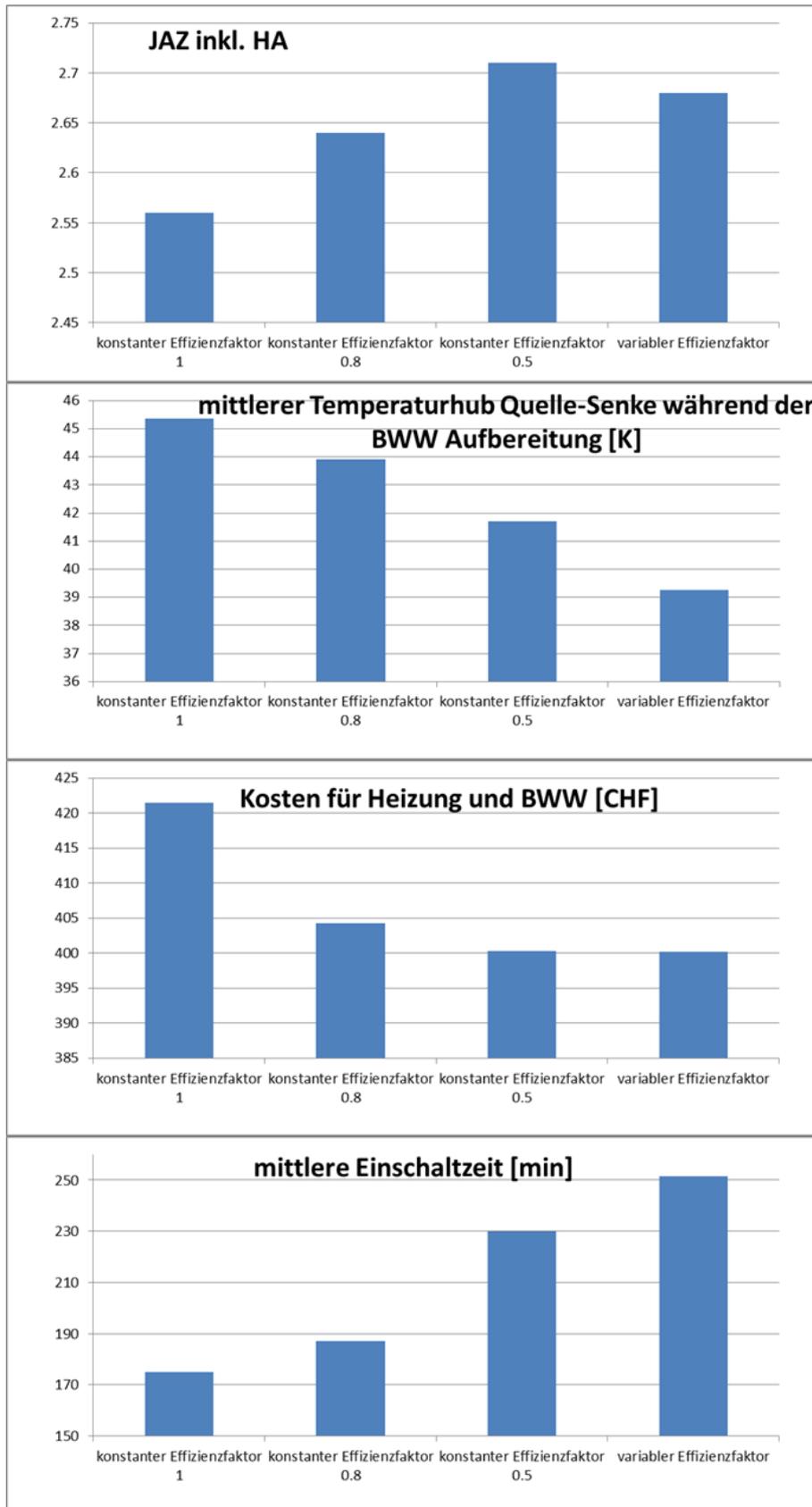


Abb. 5.10: Resultate der Brauchwarmwasseraufbereitung mit dem SFH 15

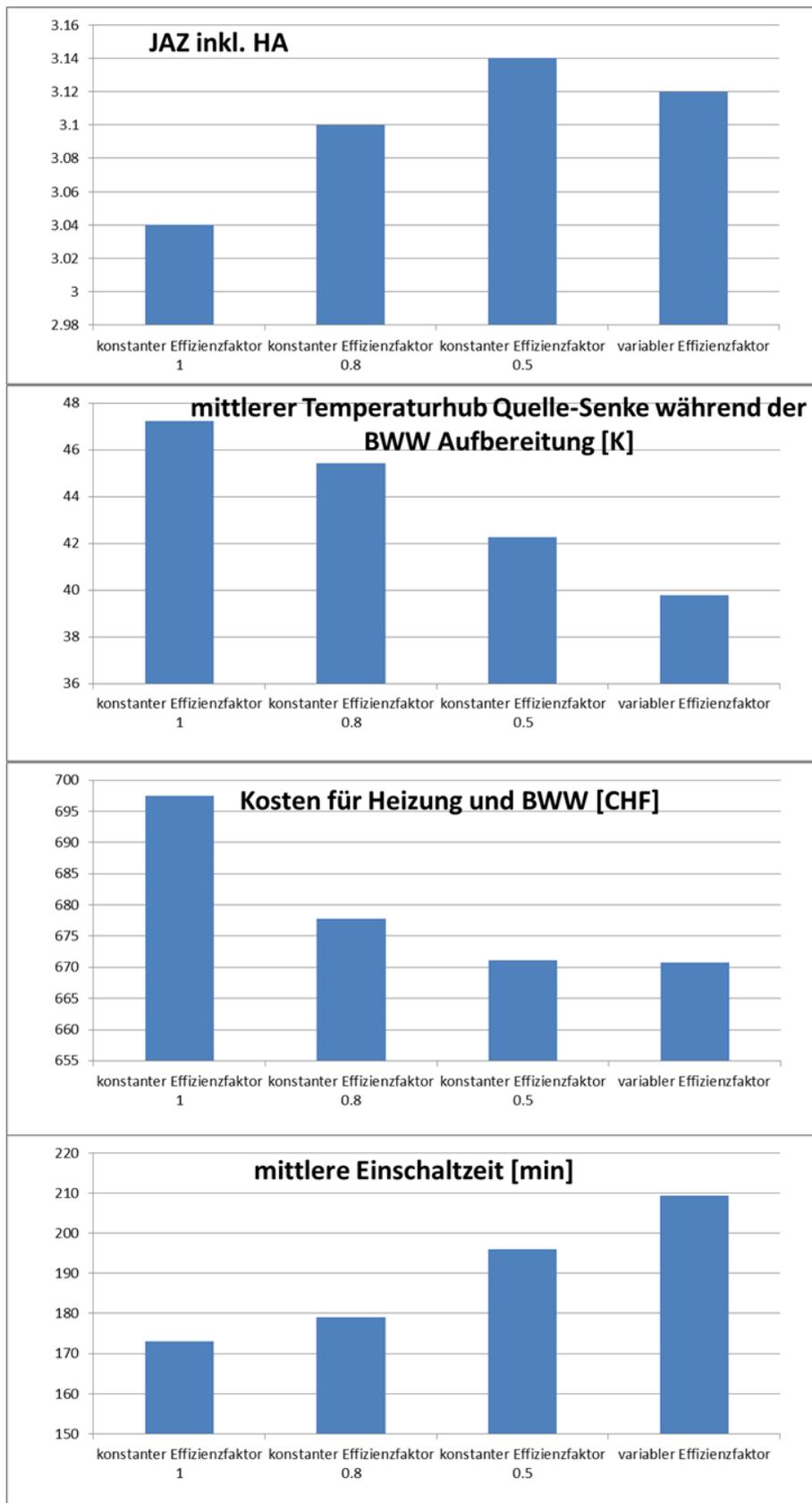


Abb. 5.11: Resultate der Brauchwarmwasseraufbereitung mit dem SFH 45

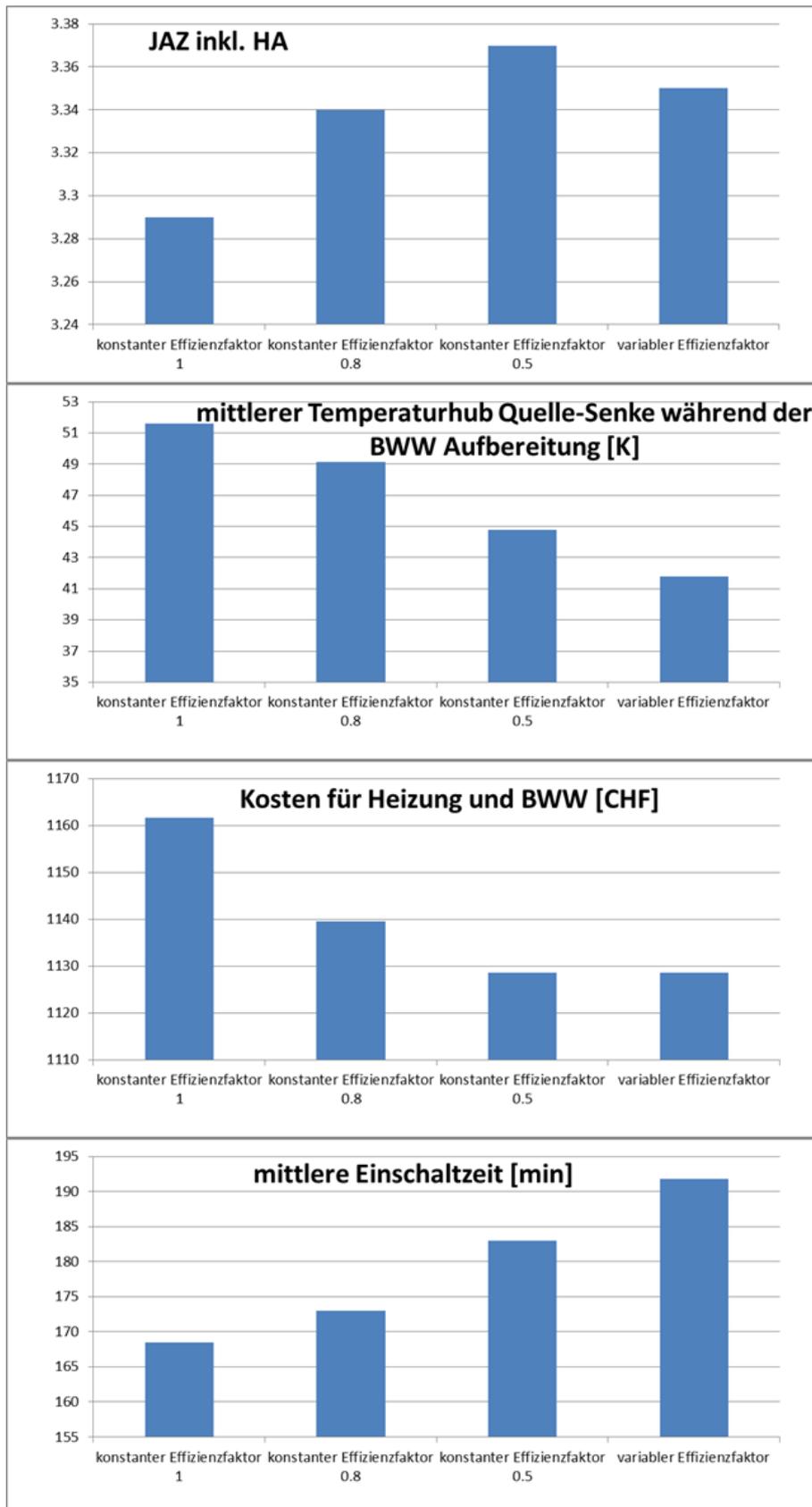


Abb. 5.12: Resultate der Brauchwarmwasseraufbereitung mit dem SFH 100

SFH 15, mit BWW, mit Sperrzeiten (11:25-12:25, 17:00-19:00, 21:30-22:30), ohne Nachtabenkung, mit Raumtemperatureinfluss, Preismodell 2014

Nr.	Regler	JAZ inkl. HA [1]	JAZ BWW [1]	Kosten [CHF]	$\bar{t}_{Einschalt}$ [min/1]	$\bar{T}_{snk_{out}-src_{in}}$ [°C]
1	konstanter Effizienzfaktor 1	2.56	2.73	421.50	175	45.37
2	konstanter Effizienzfaktor 0.8	2.64	2.84	404.30	187	43.90
3	konstanter Effizienzfaktor 0.5	2.71	2.92	400.30	230	41.70
4	variabler Effizienzfaktor	2.68	2.86	400.20	251	39.26

Tab. 5.10: Übersicht der Resultate SFH 15 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit Brauchwarmwasser.

SFH 45, mit BWW, mit Sperrzeiten (11:25-12:25, 17:00-19:00, 21:30-22:30), ohne Nachtabenkung, mit Raumtemperatureinfluss, Preismodell 2014

Nr.	Regler	JAZ inkl. HA [1]	JAZ BWW [1]	Kosten [CHF]	$\bar{t}_{Einschalt}$ [min/1]	$\bar{T}_{snk_{out}-src_{in}}$ [°C]
1	konstanter Effizienzfaktor 1	3.04	2.77	697.50	173	47.24
2	konstanter Effizienzfaktor 0.8	3.1	2.89	677.75	179	45.44
3	konstanter Effizienzfaktor 0.5	3.14	3.04	671.15	196	42.26
4	variabler Effizienzfaktor	3.12	2.97	670.75	209.4	39.8

Tab. 5.11: Übersicht der Resultate SFH 45 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit Brauchwarmwasser.

SFH 100, mit BWW, mit Sperrzeiten (11:25-12:25, 17:00-19:00, 21:30-22:30), ohne Nachtabenkung, mit Raumtemperatureinfluss, Preismodell 2014

Nr.	Regler	JAZ inkl. HA [1]	JAZ BWW [1]	Kosten [CHF]	$\bar{t}_{Einschalt}$ [min/1]	$\bar{T}_{snk_{out}-src_{in}}$ [°C]
1	konstanter Effizienzfaktor 1	3.29	2.72	1161.75	169	51.58
2	konstanter Effizienzfaktor 0.8	3.34	2.87	1139.50	173	49.14
3	konstanter Effizienzfaktor 0.5	3.37	3.05	1128.65	183	44.80
4	variabler Effizienzfaktor	3.33	2.94	1128.25	200	43.00

Tab. 5.12: Übersicht der Resultate SFH 100 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit Brauchwarmwasser.

## 6 kritische Würdigung/Prüfung der Ergebnisse zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen

Schon während des Aufbaus des Simulationsmodells und während der Auswertung der Simulationen wurden verschiedene Plausibilitätschecks durchgeführt. Diese Checks sowie Schwachstellen und Stärken des Systems werden hier erläutert.

### 6.1 Gebäudemodelle

Die Gebäudemodelle benötigen gemäss ihren Namen 15, 45 oder 100 kWh/m<sup>2</sup>/a Wärme am Standort Strasburg für die Heizung. Ein erster Check bietet die Kontrolle, ob der Wärmebedarf gemäss der Definition auf die Simulationen passt.

	SFH 15	SFH 45	SFH 100
Energiebedarf gemäss Definition für Strasburg [kWh/m <sup>2</sup> /a]	15	45	100
Energiebedarf nach der Simulation ohne BWW für Kloten [kWh/m <sup>2</sup> /a]	ca. 19	ca. 54	ca. 112
Mehrverbrauch im Verlgleich Definition und Simulation [%]	ca. 25	ca. 20	ca. 12

Tab. 6.1: Prüfung der Ergebnisse im Bereich der Gebäudemodelle

Der Vergleich zeigt, dass in den Simulationen zwischen 12% und 25% mehr Energie benötigt wurde als dies die Definition vorgibt. Zu erklären ist dies teilweise mit der höheren durchschnittlichen Raumtemperatur. Vor allem in den Simulationen zum SFH 15 ist die durchschnittliche Raumtemperatur mit 20.8 °C deutlich über dem Sollwert von 20°C. Allein diese Tatsache dürfte bis ca. 5% an Energie ausmachen (Gemäss Faustformeln entspricht 1 °C Raumtemperaturänderung etwa 6% an Energieänderung). Da alle Gebäude über dem definierten Wert liegen, sind weitere mögliche Gründe für den erhöhten Energiebedarf die Wetterdaten oder der Regler. Der Vergleich mit R. Wasers Untersuchung zeigt, dass sich seine Werte im gleichen Bereich bewegen.

### 6.2 JAZ

Die Jahresarbeitszahl entpuppte sich als Knacknuss. Das Problem liegt im Vergleich der verschiedenen Gebäudemodelle. Der Theorie nach müsste die Arbeitszahl vom SFH 15 zum SFH 100 sinken, weil der Temperaturhub im SFH 100 höher ist als im SFH 15 (bei den gleichen Quellenbedingungen). Die Simulationen zeigen jedoch gerade ein umgekehrtes Bild.

	SFH 15	SFH 45	SFH 100
Jahresarbeitszahl nur WP mit Zweipunktregler ohne BWW	3.08	3.7	3.84
Jahresarbeitszahl nur WP mit der Leistungsregelung aller Komponenten ohne BWW	3.02	3.60	3.76

Tab. 6.2: Vergleich der Jahresarbeitszahlen mit verschiedenen Gebäudemodellen

Dieses Phänomen blieb im Verlauf der Projektarbeit lange unerkannt, da die Reglertests nur mit einem Gebäudemodell durchgeführt wurden. Die Ungereimtheit konnte nicht abschliessend geklärt werden. Jedoch wurde der Fehler bis auf das Wärmepumpenmodell eingegrezt. Die Kennlinien wurden mehrfach überprüft. Die Abbildungen 3.2 und 3.3 auf Seite 6 zeigen plausible Verläufe. Je kleiner der Temperaturhub, desto grösser ist der COP.

Und vergleichbar mit dem Anstieg der Carnot-Leistungszahl in Abbildung 3.7 auf Seite 9 verläuft der Anstieg der Leistungszahl bei höheren Quellentemperaturen steiler als bei tiefen Quelltemperaturen. Diese qualitativen Checks erfüllen die Kennlinien der Wärmepumpe. Allgemein überzeugte die Validierung des Wärmepumpenmodells auf Seite 8 mit sehr guten Resultaten.

Als Referenz-Massnahme wurden einzelne Simulationen mit dem Wärmepumpeblock der originalen Carnot-Toolbox durchgeführt. Das Resultat war jedoch nicht zielführend. Nur durch den Ersatz des Wärmepumpenblocks wurden bereits deutlich unterschiedliche Resultate erzielt. Grund dafür ist die verschiedene Funktionsweise der Wärmepumpenmodelle. Während das verbesserte Wärmepumpenmodell von David Zogg mit allen Stützpunkten arbeitet, übernimmt das originale Wärmepumpenmodell der Carnot-Toolbox nur die äussersten zwei Stützpunkte und rechnet mit einer Linearkombination nach Schwamberger 1991.

Die Simulationen wurden also trotz des unerklärlichen Verhaltens mit dem verbesserten Wärmepumpenmodell von David Zogg durchgeführt. Die Verbesserung der Effizienz und damit der Jahresarbeitszahl durch die leistungsgeregelten Regelstrategien ist trotzdem gegeben. Die Simulationen mit demselben Gebäudemodell sind untereinander durchaus vergleichbar. Gebäudemodellübergreifend können vor allem relative Aussagen getätigt werden. Eine Möglichkeit für den Vergleich absoluter Werte bietet der mittlere Temperaturhub während des Heizungsbetriebs oder der Brauchwarmwasseraufbereitung. Denn der niedrigere Temperaturhub ist für die Steigerung der Effizienz leistungsgeregelter Wärmepumpen verantwortlich (vgl. Tabelle 6.3).

	SFH 15	SFH 45	SFH 100
Mittlere Temperaturdifferenz, Quelle Eintritt- Senke Austritt während des Heizbetriebs, Zweipunktregler [K]	25.44	25.93	29.7
Mittlere Temperaturdifferenz, Quelle Eintritt- Senke Austritt während des Heizbetriebs, Leistungsgeregelt [K]	23.69	24.27	27.07
Differenz im Heizbetrieb [K]	1.75	1.66	2.63
Mittlere Temperaturdifferenz, Quell Eintritt- Senke Austritt während der BWW Aufbereitung mit voller Leistung	45.37	47.24	51.58
Mittlere Temperaturdifferenz, Quell Eintritt- Senke Austritt während der BWW Aufbereitung mit variablem Effizienzfaktor	39.26	39.80	41.8
Differenz während der BWW Aufbereitung [K]	6.11	7.44	9.78

Tab. 6.3: Vergleich des mittleren Temperaturhubes über die verschiedenen Gebäudemodelle und Regelstrategien.

Abbildung 6.1 zeigt den monatlichen Verlauf der verschiedenen Arbeitszahlen für das SFH 100 mit Brauchwarmwasseraufbereitung. Der Verlauf der Arbeitszahl für den Heizbetrieb (braune Kurve) zeigt eine steigende Tendenz im Frühling. Im Sommer sind wegen der Überschreitung der Heizgrenze keine Werte vorhanden. Im Herbst ist der Verlauf dann wieder sinkend. Die Arbeitszahl folgt der Aussentemperatur, welche zugleich die Quellentemperatur darstellt. Diese Kurve ist plausibel.

Die Arbeitszahl der Brauchwarmwasseraufbereitung (gelbe Kurve) zeigt dieselben Tendenzen und erreicht im Sommer sein Maximum. Dieses Verhalten ist ebenfalls durch die Quellentemperatur geprägt und plausibel.

Die Arbeitszahl über dem Wärmepumpenblock (blau) und die Arbeitszahl mit den Hilfsaggregaten und Speicherverlusten (türkis) sind Kombinationen der oben beschriebenen Arbeitszahlen. Beide weisen im Frühling steigende Tendenzen auf. Im Mai gewinnt der Brauchwarmwasser-Anteil an Bedeutung und die Arbeitszahlen beginnen wegen des höheren Temperaturhubes der Brauchwarmwasser-Aufbereitung zu sinken. Oberhalb der Heizgrenze sind die Arbeitszahlen des Wärmepumpenblocks und der Brauchwarmwasser-Aufbereitung identisch, da keine Heizenergie produziert wird. Im Oktober gewinnt die Heizung wieder an Bedeutung und die Arbeitszahlen steigen, bevor sie auf den Winter hin wieder sinken.

Die Verläufe der Simulationen mit den anderen Gebäuden weisen einen ähnlichen Verlauf auf.

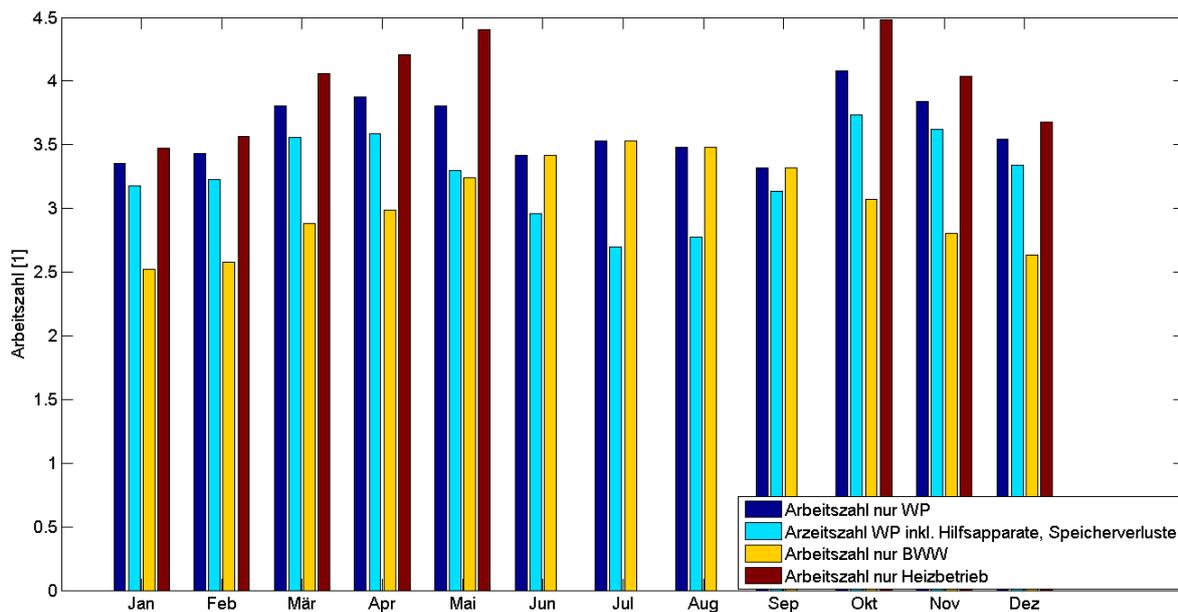


Abb. 6.1: Monatliche Arbeitszahlen für das SFH 100 in der Simulation mit Brauchwarmwasseraufbereitung.

### 6.3 Realitätsbezug

Dass leistungsgeregelte Wärmepumpen realisierbar sind haben bereits einige Hersteller wie zum Beispiel Stiebel-Eltron oder die Hochschule Luzern mit ihrem Prototyp bewiesen. Im Bereich der Grossanlagen ist die Leistungsregelung (oder Stufenschaltung) für Wärmepumpen und Kälteanlagen schon länger etabliert. (Neu sind sogar drehzahlvariable Kühlschränke für den Heimbereich erhältlich). In diesem Abschnitt wird ein Blick auf den Markt geworfen. Ziel ist die Kontrolle, ob die durchgeführten Simulationen einigermaßen der Realität entsprechen.

#### Regelbare Kompressoren

Die Drehzahlregelung der Kompressoren ist ein sehr komplexes Gebiet und beschäftigt Fachleute schon seit einiger Zeit (Prof. Dr. Thomas Afjei hat bereits im Zeitraum von 1986 bis 1992 an der ETHZ seine Dissertation über die Drehzahlvariation von Scrollverdichtern geschrieben). Heute ist die Industrie schon sehr weit. Emerson [5] bietet speziell für Wärmepumpenanwendungen Scrollverdichter an, welche eine Drehzahlvariation von 1800U/min bis 7000U/min zulassen. Dies entspricht einem Frequenzband von 30-117Hz. Emerson bietet neben dem Verdichter gerade noch den passenden Inverter an. Beim genaueren Blick in das Datenblatt kann festgestellt werden, dass in der Realität die Drehzahl abhängig von den Umgebungsbedingungen Kondensationstemperatur und Verdampfungstemperatur ist. In der Simulation besteht diese Beschränkung nicht. Abbildung 6.2 zeigt den Bereich, der mit 2400U/min und dem Kältemittel R410A gefahren werden kann. Diese Abbildung bietet nur ein Beispiel und verdeutlicht, dass reale Regelstrategien für leistungsgeregelte Wärmepumpen solche bauteilspezifischen Grenzen beinhalten müssen und daher einiges komplexer sind.

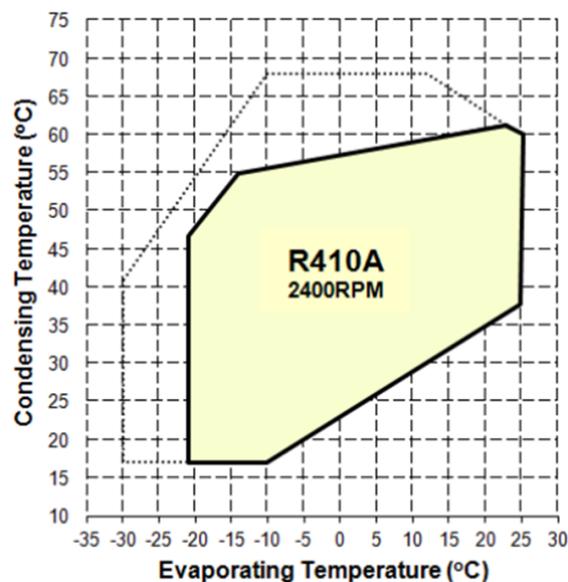


Abb. 6.2: Ausschnitt aus dem Datenblatt von Emerson [5].

Die Drehzahl von 2400U/min kann nur im gelben Bereich gefahren werden. Die gestrichelte Linie entspricht dem ganzen abdeckbaren Bereich.

## Regelbare Ventilatoren

Im Bereich der Ventilatoren sind einige Methoden vorhanden, um die Leistungsaufnahme und den Volumenstrom zu reduzieren. Ältere Methoden sind zum Beispiel die Drallverstellung oder die Drosselverstellung. Heute findet vor allem die Drehzahlverstellung ihre Anwendung. Die Drehzahlverstellung bietet die besten Lösungen im Bereich der Energie und des Schalldruckpegels. Die Drehzahlvariation kann wiederum über verschiedene Prinzipien realisiert werden. Diese sind Frequenzumformer, EC-Motoren und Phasenanschnittsteuerungen. EC-Motoren (Electronically Commutated Motor) sind im Trend für Lüftungsanlagen. Dieses Prinzip basiert auf einem permanenten und elektronischen kommutierten Gleichstrommotor. Der EC-Motor besticht durch seinen hohen Teillastwirkungsgrad, der Reduktion der Drehzahl bis auf 10-15%, den guten Schalleigenschaften und der langen Lebensdauer. Gemäss der europäischen Energieeffizienz-Richtlinie wird die EC-Technik als "beste verfügbare Technik" bezeichnet [6].

Auf dem Datenblatt von Stiebel-Eltron [3] ist zu erkennen, dass die Ventilatorzahl in ihrer Lösung per Phasenanschnittsteuerung variiert wird. Die Phasenanschnittsteuerung schneidet am Anfang jeder Sinushalbwellen einen Teil ab. Dieses Funktionsprinzip stellt eine Form der Pulsweitenmodulation dar. Die Phasenanschnittsteuerung weist einige Nachteile im Vergleich zur EC-Technologie auf, wie zum Beispiel die erhöhte Beanspruchung der Motorwicklungen im Teillastbetrieb (durch die Stromspitzen des Phasenanschnitts), was sich nachteilig auf die Lebensdauer auswirkt. Deshalb werden die preiswerten Phasenanschnittsteuerungen meist nur im oberen Drehzahlbereich eingesetzt.

In der Simulation wird der Ventilator mit einer Drehzahl von 30-100% gefahren. Dies entspricht einer simultanen Drehzahlregelung zum Verdichter. Dies ist mit der EC-Technologie sicher möglich. In welchem Drehzahlbereich der Ventilator von Stiebel-Eltron variiert wird, konnte nicht ermittelt werden.

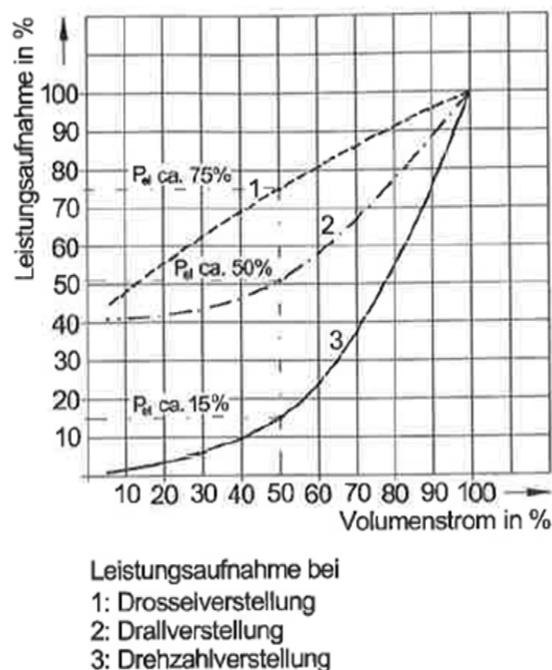


Abb. 6.3: Leistungsaufnahme des Lüfters mit verschiedenen Drosselmethoden [6]



## 7 Optimierung des Eigenverbrauchs mit leistungsgeregelter Wärmepumpe

Die Untersuchung zur Optimierung des Eigenverbrauchs mit leistungsgeregelter Wärmepumpe gehören zum zweiten Teil dieser Projektarbeit. Die Grundlagen und Basisuntersuchungen wurden von Remo Waser getätigt und sind in seiner Arbeit festgehalten. Das Ziel war es, den Preisregler von R. Waser auf ein kontinuierliches Stellgrössensignal auf die Wärmepumpe umzubauen und die selben Simulationen wie R. Waser zu tätigen. Interessant wären die Abweichungen und Unterschiede im direkten Vergleich. Die Simulation stellt ein komplexes Gebilde dar, aus welchem wir versuchen bestimmte Zusammenhänge zu erkennen. R. Waser hat festgestellt, dass durch kleinste Veränderungen, zum Beispiel an einer Hysterese, bereits komplett andere Ergebnisse beobachtet werden können. Das System ist also sehr sensitiv. Auf Grund dieser Tatsache ist es weniger sinnvoll, den Preis-Regler von R. Waser umzubauen und Vergleiche anzustellen.

Im Rahmen dieser Projektarbeit hat man sich entschieden einen eigenen Regler zu entwickeln. Dieser Regler ist auf den lokalen Eigenverbrauch optimiert. Das Ziel ist die Untersuchung, ob mit der leistungsgeregelten Wärmepumpe die Produktion der Photovoltaikanlage einigermaßen präzise nachgefahren werden kann unter Einhaltung der Komfortparameter. Die Untersuchung soll also vor allem qualitative Ergebnisse liefern. Mit Hilfe einer leistungsgeregelten Wärmepumpe erhofft man sich einen massiv höheren lokalen Eigenverbrauch, da der elektrische Bedarf der Wärmepumpe der Photovoltaikproduktion angepasst werden kann.

### 7.1 Eigenverbrauchsregler mit kontinuierlicher Stellgrösse auf die Wärmepumpe

Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde einen Regler entwickelt, der auf den lokalen Eigenverbrauch optimiert ist. Auf einen kostenoptimierten Regler wurde verzichtet. Denn der lokale Eigenverbrauch hat das Ziel, die Stromnetze von den fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen zu entlasten. Ist die Zeit gekommen, in der die Entlastung wirklich nötig ist, werden die finanziellen Anreizstrukturen dafür vorhanden sein (Dies ist natürlich eine Annahme, denn niemand weiss wie es sein wird). Zu diesem Zeitpunkt wird also gelten: kostenoptimiert ist gleich autarkieoptimiert. R. Waser zeigt bereits in seiner Projektarbeit, dass die momentanen Preisstrukturen den lokalen Eigenverbrauch nicht fördern. (Falls die Preisstrukturen dies bereits täten, wären solche Anlagen bereits realisiert).

Im Unterschied zum Heizkurvenregler mit Raumtemperaturaufschaltung weist dieser Regler zwei voneinander unabhängige Eingangsgrössen auf: Die Photovoltaikproduktion und die Raumtemperatur. Die Stellgrösse auf die Wärmepumpe soll also eine Funktion von der Raumtemperatur und der Photovoltaikproduktion sein. Dabei fungiert das Haus als Wärmespeicher.

Folgende Überlegungen wurden getätigt:

1. Wenn die Raumtemperatur sich nahe am eingestellten Minimum befindet, muss die Stellgrösse auf die Wärmepumpe tendenziell eher hoch sein. Im Bereich des Maximum muss das Verhalten umgekehrt sein.
2. Wenn die Photovoltaikleistung sich nahe am Minimum befindet muss die Stellgrösse auf die Wärmepumpe tendenziell eher tief sein. Im Bereich hoher Photovoltaikleistung muss das Verhalten umgekehrt sein.
3. Wenn die Photovoltaikleistung sehr klein ist und die Raumtemperatur sich nahe am Minimum befindet, muss der Heizkurvenregler eingeschaltet werden.

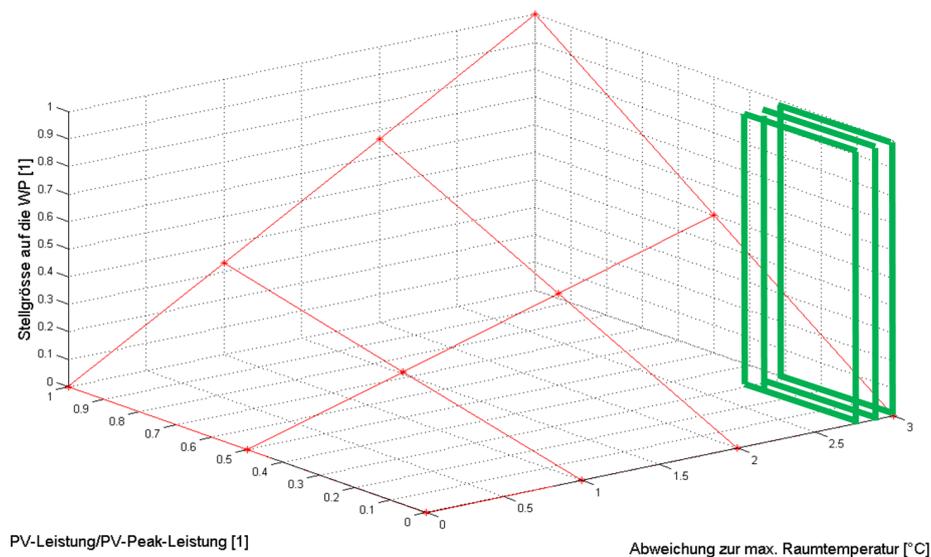


Abb. 7.1: Funktionsprinzip des Reglers zur Eigenbedarfsdeckung.

In Abbildung 7.1 ist die Funktionsweise des Reglers zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs dargestellt. Im roten Bereich arbeitet der Regler gemäss der Grafik. Gelangt die Raumtemperatur und Photovoltaikleistung in den grünen Bereich (Raumtemperatur  $< 20.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  und normierte PV-Leistung  $< 0.3$ ), so wird der Heizkurvenregler aktiv. Der grüne Bereich verhindert die Unterkühlung des Gebäudes.

Damit das "natürliche" Eigenverbrauchsverhältnis und die "natürliche" Autarkie entstehen, wird der Simulation ein elektrisches Lastprofil hinzugefügt (vgl. Abbildung 7.2). Dieses Profil lehnt sich an die Untersuchung der groupe-e [7] für eine 4-Zimmerwohnung mit elektrischem Kochherd und entspricht 2500 kWh pro Jahr.

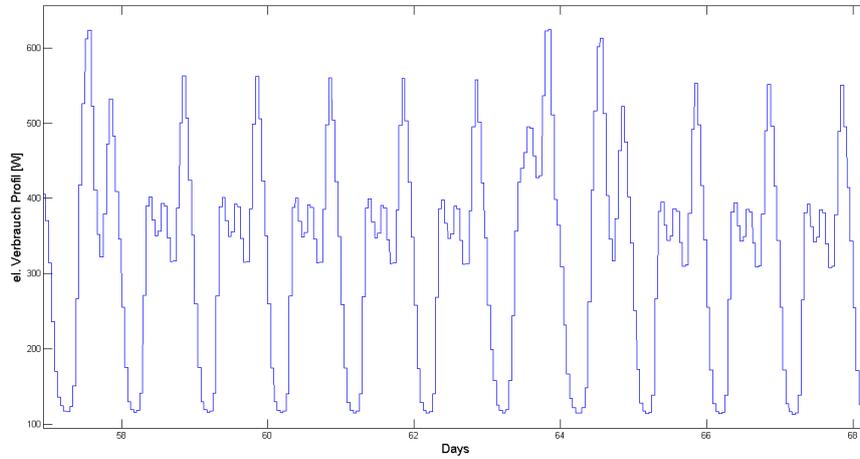


Abb. 7.2: Ausschnitt aus dem elektrischen Verbrauchsprofil zur Erreichung des natürlichen Eigenverbrauchs.

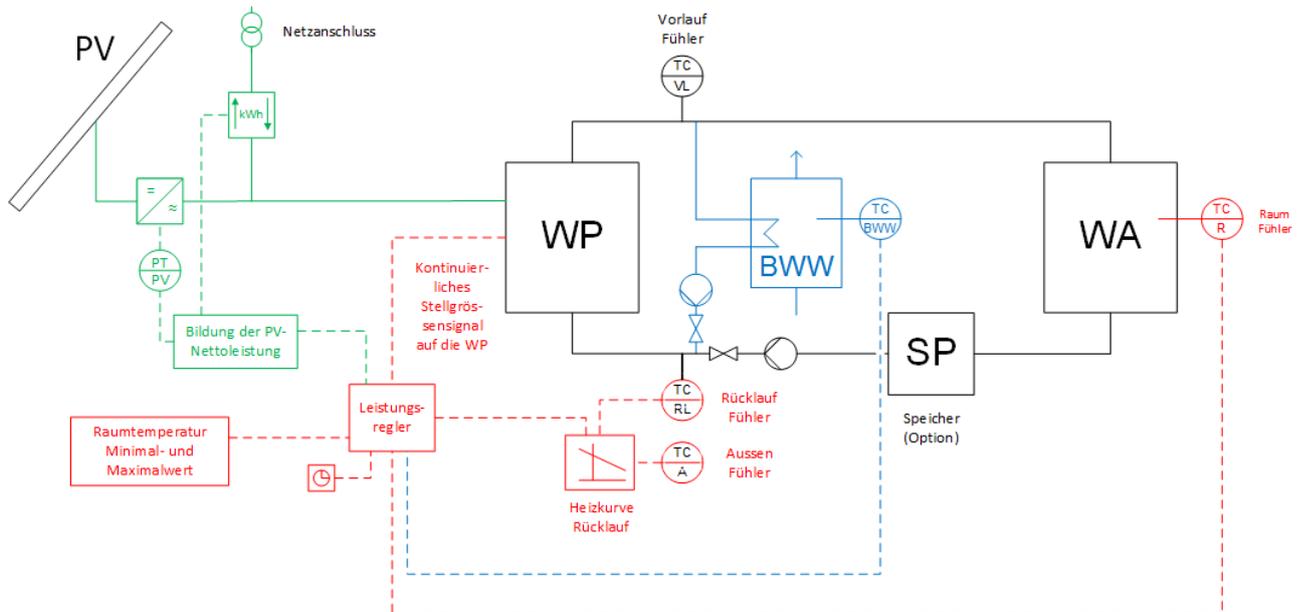


Abb. 7.3: Schema zur Optimierung des Eigenverbrauchs.



## 7.2 Erreichbarer Eigenverbrauch

**Der Regler ist in der Lage, der Photovoltaikproduktion relativ exakt nachzufahren. Jedoch muss das Verhältnis der Photovoltaikleistung zur elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe passen.**

Die Tabelle 7.2 bietet eine Übersicht aller Simulationsresultate dieses Kapitels. Die detaillierte Auswertung erfolgt in den Kapiteln 7.2.1 und 7.2.2. Der entwickelte Regler zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs kann ohne und auch mit Brauchwarmwasser-Ladung positive Resultate vorweisen. In beiden Fällen (mit und ohne Brauchwarmwasser-Ladung) und in Verbindung mit allen Gebäudemodellen bietet der eigenverbrauchsoptimierte Regler das Optimum in untersuchten Varianten an Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis.

Ohne dass den Komfortparametern grosse Aufmerksamkeit geschenkt wurde, konnten diese in allen Simulationen zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs eingehalten werden. Stellvertretend für alle Simulationen, sind die Raumtemperaturdaten in Abbildung 7.5 für die Simulation des eigenverbrauchsoptimierten Reglers mit Brauchwarmwasser-Einbindung SFH 100 zu sehen. Minimale und maximale Raumtemperatur des Regelbereiches sind einstellbar. So sollte dieser Regler den meisten Anforderungen von Anspruchsgruppen im Einfamilienhausbereich genügen.

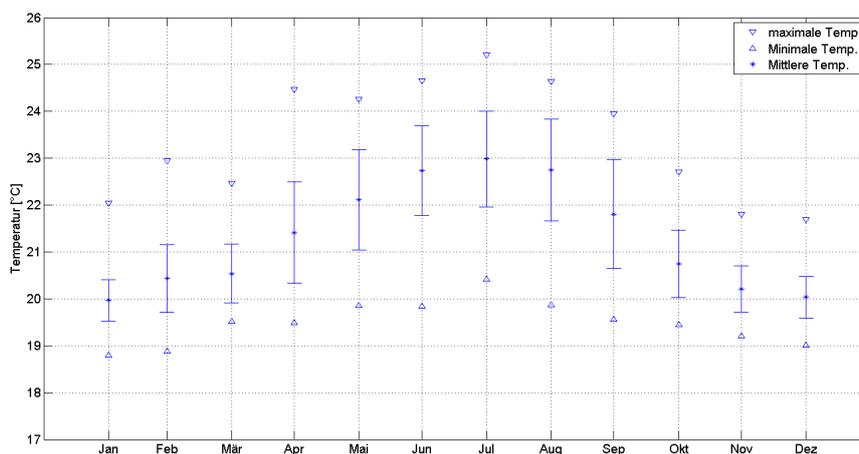


Abb. 7.5: Auswertung der Raumtemperaturen während der Simulation zum lokalen Eigenverbrauch mit dem optimierten Eigenverbrauchsregler.

Simulation mit EW-Sperre (11:25-12:25, 17:00-19:00, 21:30-22:30), ohne Nachtabsenkung,  
Preismodell 2014

		SFH 15		SFH 45		SFH 100	
		EV	AK	EV	AK	EV	AK
0	Natürlicher Eigenverbrauch gemäss den Untersuchungen von J. Ragaller[8]	38	27	45	25	50	20
1	”natürlicher” Eigenverbrauch ohne BWW	28	35	30	27	33	21
2	Eigenverbrauchsoptimierung ohne BWW	31	36	36	31	43	26
3	”natürlicher” Eigenverbrauch Heizkurvenregler mit BWW Nachtladung	28	26	30	22	33	18
4	Eigenverbrauch Heizkurvenregler mit BWW variabler Effizienzfaktor Tagladung	39	39	43	32	44	24
5	Eigenverbrauchsoptimierung mit BWW variabler Effizienzfaktor Tagladung	41	40	49	35	54	27
		$\bar{T}_{Room}$ [°C]	$T_{std}$ [°C]	$\bar{T}_{Room}$ [°C]	$T_{std}$ [°C]	$\bar{T}_{Room}$ [°C]	$T_{std}$ [°C]
1	”natürlicher” Eigenverbrauch ohne BWW	20.78	1.23	20.34	0.80	20.13	0.91
2	Eigenverbrauchsoptimierung ohne BWW	21.39	1.1	20.94	0.83	20.61	0.88
3	”natürlicher” Eigenverbrauch Heizkurvenregler mit BWW Nachtladung	20.78	1.29	20.39	0.86	20.16	0.9
4	Eigenverbrauch Heizkurvenregler mit BWW variabler Effizienzfaktor Tagladung	20.81	1.29	20.28	0.86	20.14	0.9
5	Eigenverbrauchsoptimierung mit BWW variabler Effizienzfaktor Tagladung	21.16	1.29	20.59	0.96	20.59	0.85

Tab. 7.2: Resultate der Simulation zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs

### 7.2.1 Auswertung ohne BWW

Ohne die Brauchwarmwasser-Aufbereitung ist der jährliche erreichbare Eigenverbrauch bereits stark begrenzt. Grund dafür ist der relativ hohe Photovoltaikertrag im Sommer und das Fehlen eines regelbaren Verbrauchers (hier die Wärmepumpe). In den verschiedenen Gebäudetypen SFH 15, SFH 45 und SFH 100 sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Die Erklärung dafür ist die gleiche Photovoltaikleistung auf allen Dächern und die unterschiedliche Leistungsaufnahme der Wärmepumpe. Die Autarkie sinkt von Gebäude SFH 15 zum SFH 100 wegen des steigenden gesamten Elektrizitätsverbrauchs vom SFH 15 zum SFH 100. Das Eigenverbrauchsverhältnis hingegen sinkt vom SFH 15 zum SFH 100. Grund dafür ist, dass der Netzbezug relativ zum Elektrizitätsverbrauch stärker ansteigt. Mit dem eigenverbrauchsoptimierten Regler kann nun erreicht werden, dass die Autarkie eine geringere negative Steigung vom SFH 15 zum SFH 100 aufweist und die positive Steigung der Autarkie hingegen vom SFH 15 zum SFH 100 zunimmt (vgl. Abbildung 7.11). Die Folge ist, dass das Niveau der Autarkie und des Eigenverbrauchsverhältnisses vom Heizkurvenregler zum eigenverbrauchsoptimierten Regler steigt.

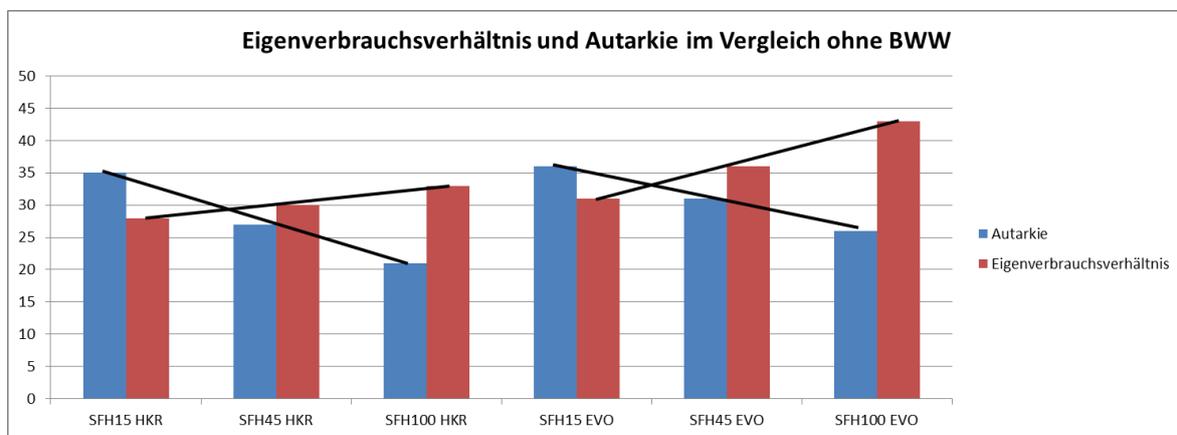


Abb. 7.6: Vergleich von Autarkie und Eigenverbrauch über die verschiedenen Gebäudetypen mit verschiedenen Reglern und ohne Brauchwarmwasser.

(HKR=Heizkurvenregler, EVO=eigenverbrauchsoptimierter Regler)

Grundsätzlich erfüllt der Regler die qualitativen Erwartungen. Abbildung 7.9 zeigt, dass die Leistung der Photovoltaikanlage mit der Wärmepumpenleistung sehr genau abgefahren werden kann. In Abbildung 7.9 ist die totale Photovoltaik-Leistung aufgetragen. Die Leistung, die dem eigenverbrauchsoptimierten Regler zur Verfügung steht, ist jedoch nur die Netto-Photovoltaik-Leistung.

$$PV\text{-Netto-Leistung} = PV\text{-Leistung} - \text{el. Leistung des Verbrauchsprofils} \quad (7.1)$$

Die Lücke zwischen der Photovoltaikleistung und der Leistungsaufnahme der Wärmepumpe lässt sich vielerorts durch das elektrische Lastprofil schliessen. So wird die ganze Photovoltaikproduktion lokal genutzt.

In Abbildung 7.9 ist auch zu sehen, dass die Zusammenarbeit der beiden Regler (Heizkurvenregler und Eigenverbrauchsregler) noch nicht optimal funktioniert. Im Bereich des Heizkurvenreglers schlägt die Stellgrösse auf die Wärmepumpe meistens voll aus. Für die Unterkühlung des Gebäudes ist dies wohl das Beste, nicht aber für die Effizienz der Anlage. Mehr zu diesem Thema gibt es in Kapitel 7.3 "Optimierungsmöglichkeiten des Reglers zur Optimierung des lokalen Eigenbedarfs."

Abbildung 7.10 zeigt, dass Verhältnis der Photovoltaik-Peakleistung zur elektrischen Aufnahmeleistung der Wärmepumpe eine entscheidende Rolle im lokalen Eigenverbrauch spielt. Für das SFH 15 (und auch 45) ist das Verhältnis von der Photovoltaikanlage zur elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe deutlich zu gross. Die regelbare Leistung der Wärmepumpe stellt nur einen kleinen Teil der Photovoltaikleistung dar. Weitere Informationen dazu findet man im Kapitel 7.3 "Optimierungsmöglichkeiten des Reglers zur Optimierung des lokalen Eigenbedarfs."

	SFH 15	SFH 45	SFH 100
Steigerung der Autarkie vom HKR zum EVO [%]	1	4	5
Steigerung des Eigenverbrauchsverhältnis vom HKR zum EVO [%]	3	6	10

Tab. 7.3: Resultate der Simulation zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs ohne BWB  
(HKR=Heizkurvenregler, EVO=eigenverbrauchsoptimierter Regler)

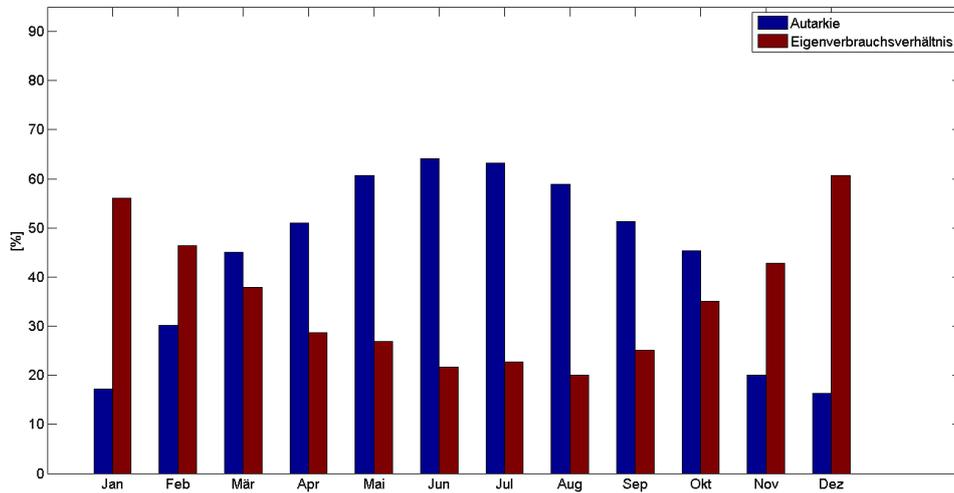


Abb. 7.7: Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis über die Monate mit dem SFH 15 ohne Brauchwarmwasser mit Eigenverbrauchsoptimierung

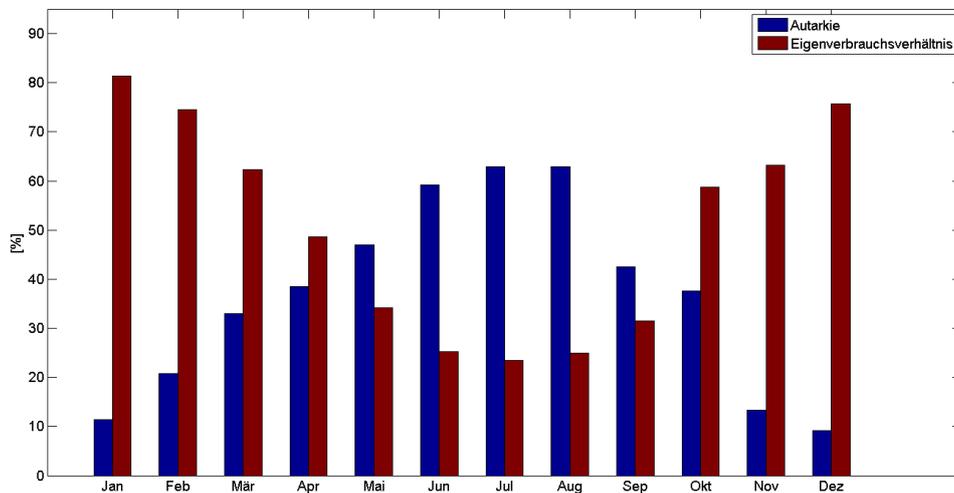


Abb. 7.8: Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis über die Monate mit dem SFH 100 ohne Brauchwarmwasser mit Eigenverbrauchsoptimierung

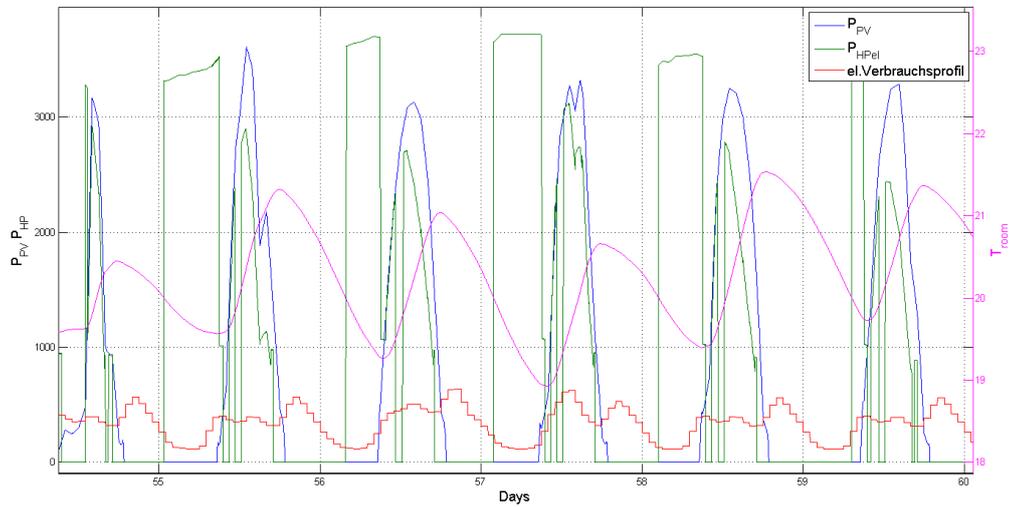


Abb. 7.9: Ausschnitt aus den Leistungen der Wärmepumpe, der PV-Anlage und des elektrischen Verbrauchsprofils sowie Raumtemperatur für das SFH 100.

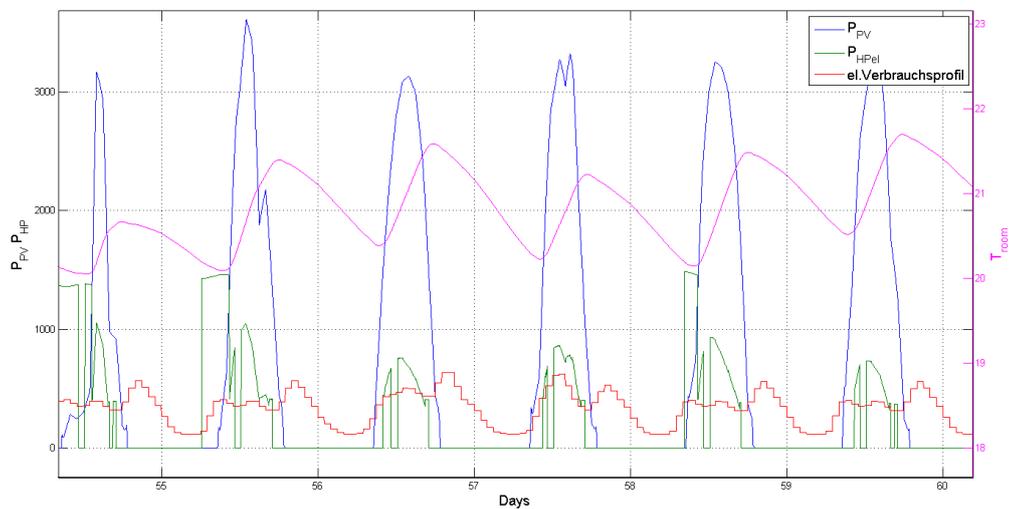


Abb. 7.10: Ausschnitt aus den Leistungen der Wärmepumpe, der PV-Anlage und des elektrischen Verbrauchsprofil sowie Raumtemperatur für das SFH 15.

### 7.2.2 Auswertung mit BWW

Durch die Einbindung der Brauchwarmwasser-Erwärmung bietet sich ein zusätzlicher regelbarer Energiebezüger an mit einer Tageskapazität von ca. 4.9 bis 8.1kWh thermisch = 1.7 bis 3kWh elektrisch. Der Brauchwarmwasserspeicher wird in dieser Untersuchung nicht überhitzt. Denn das Zapfprofil zapft ein konstantes Volumen und keine kostante Energiemenge an. Bei einer Überhitzung des Brauchwarmwasserspeichers würde gleichzeitig der Energieverbrauch steigen. Die Simulationen haben gezeigt, dass die Umstellung der Warmwasserladung von der Nacht (ab 01:00 Uhr) auf den Tag (ab 10:00 Uhr) bereits eine deutliche Erhöhung der Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis zur Folge hat. Durch den eigenverbrauchsoptimierten Regler lassen sich die Kenngrößen des lokalen Eigenverbrauchs noch einmal leicht erhöhen. Abbildung 7.11 zeigt, dass sich wiederum im energetisch schwächsten Gebäude SFH 100 die besten Resultate (Steigerung zum "natürlichen Fall") erzielen lassen. Der Grund dafür ist das Verhältnis der Photovoltaikleistung zur elektrischen Aufnahmeleistung der Wärmepumpe.

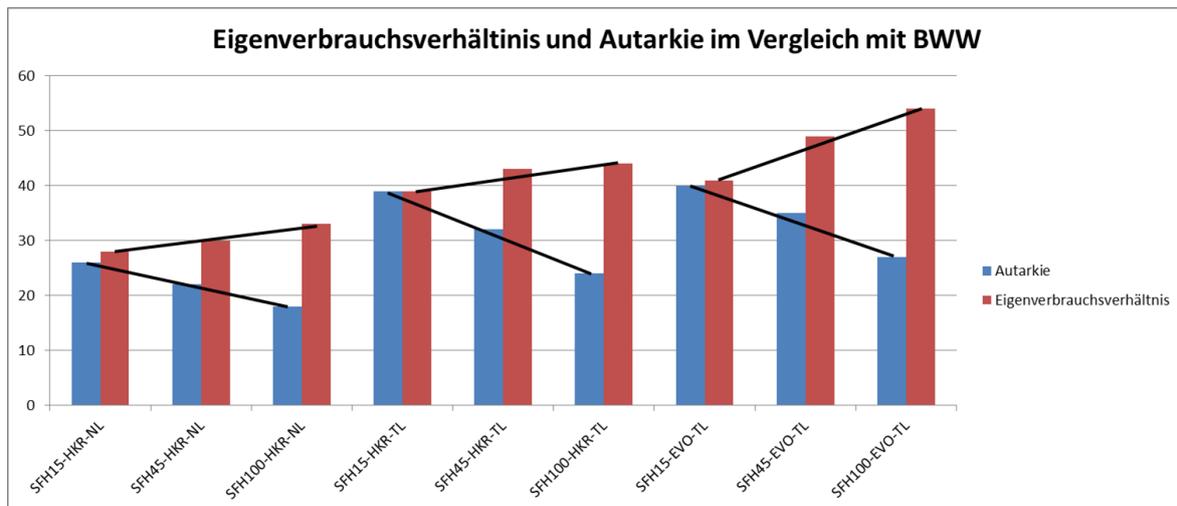


Abb. 7.11: Vergleich von Autarkie und Eigenverbrauch über die verschiedenen Gebäudetypen mit verschiedenen Reglern und mit Brauchwarmwasser.

(HKR=Heizkurvenregler, EVO=eigenverbrauchsoptimierter Regler, NL=Nachtladung BWW, TL=Tagladung BWW)

Auf Seite 47 sind die monatlichen Simulationsresultate der Autarkie und des Eigenverbrauchsverhältnisses für die Simulationen mit Brauchwarmwasser abgebildet. Von Abbildung 7.16 zur Abbildung 7.15 nimmt die Autarkie und das Eigenverbrauchsverhältnis vor allem in den Sommermonaten stark zu. Grund dafür ist die Tagladung der Brauchwarmwasseraufbereitung. Diese "kleine" Umstellung des Zeitprogramms wirkt sich vor allem auf die Sommermonate aus. Der Ertrag der Photovoltaikanlage erreicht im Sommer sein Maximum und die elektrische Aufnahmeenergie der Heizung das Minimum. Diese Kombination lässt eine erhebliche Steigerung des lokalen Eigenverbrauchs zu. Durch den Einsatz des eigenverbrauchsoptimierten Reglers lässt sich dann das allgemeine Niveau der Autarkie und des Eigenverbrauchsverhältnisses im Winter und den Übergangsmonaten steigern (vgl. Abbildungen 7.15 und 7.14). Im Sommer ist keine relevante Abweichung der Eigenverbrauchparameter zu erwarten und festzustellen. Denn in den Sommermonaten arbeitet in beiden Varianten nur das Zeitprogramm zur Brauchwarmwasseraufbereitung.

Wie bereits bei der Auswertung ohne Brauchwarmwasser in Kapitel 7.2.1 festgestellt wurde, funktioniert die Zusammenarbeit des Heizkurvenreglers und des eigenverbrauchsoptimierten Reglers noch nicht optimal. Dies ist in der Abbildung 7.12 zu sehen. Wenn die Raumtemperatur weniger als 20 °C beträgt und die normierte Photovoltaikleistung kleiner als 0.3 ist, gerät die Stellgröße auf die Wärmepumpe an den maximalen Ausschlag. Der hohe

schmale Peak der Wärmepumpenleistung stellt die Brauchwarmwasseraufbereitung dar. In Abbildung 7.12 wird der Leistungspeak der Photovoltaikanlage nicht getroffen. Vergleicht man dieselbe Situation in Abbildung 7.13 vom Sommer, fällt die Brauchwarmwasserladung relativ genau auf die Photovoltaikleistung. Zur Erinnerung: Das Brauchwarmwasser wird mit dem variablen Effizienzfaktor aufbereitet. Das heisst, im Sommer ist der Leistungsverlauf der Brauchwarmwasser-Ladung eher länglich und flach und im Winter eher kurz und spitzig. Damit ist die Chance den Photovoltaikverlauf zu treffen im Winter kleiner. Dadurch sind jedoch keine massiven Auswirkungen auf den lokalen Eigenverbrauch zu erwarten, da im Winter die Photovoltaikleistung mit der elektrischen Leistungsaufnahme der Heizung nachgefahren werden kann. Im Sommer hingegen ist die Reduktion der Leistung zur Brauchwarmwasser-Aufbereitung sehr erwünscht. Dadurch kann die Fläche der Photovoltaikproduktion besser getroffen werden und die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe übersteigt die Produktionskurve weniger.

Massnahmen zur Optimierung des Reglers werden im Kapitel 7.3 besprochen.

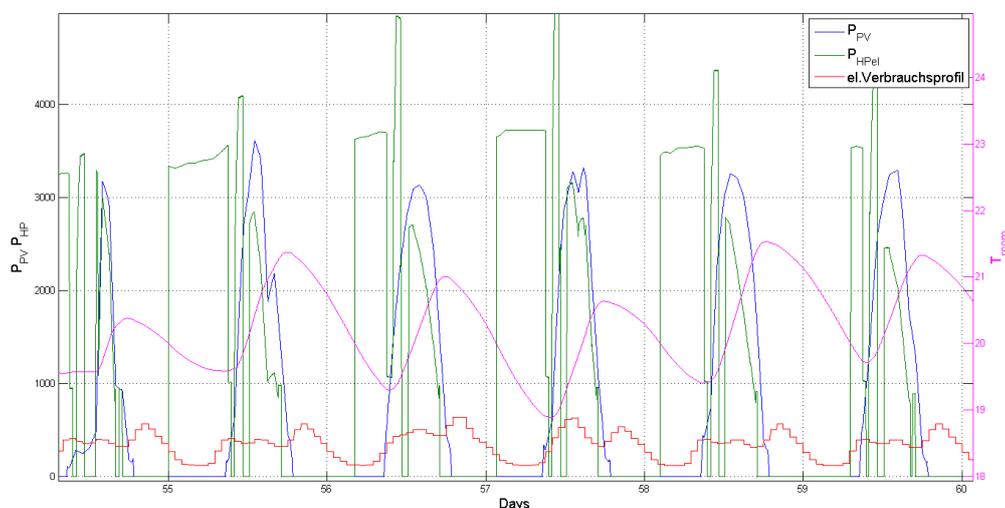


Abb. 7.12: Ausschnitt des eigenverbrauchsoptimierten Regler mit Brauchwarmwasserladung am Tag für das SFH 100.

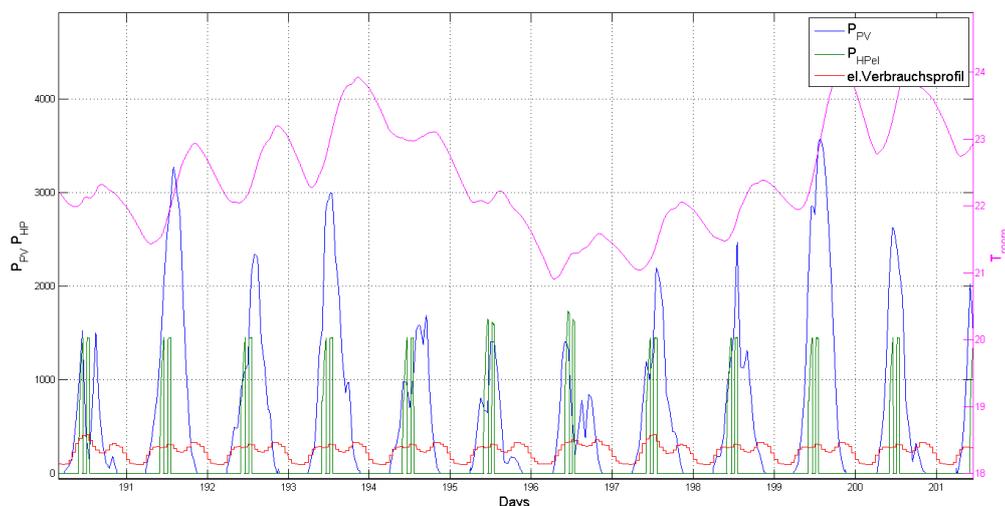


Abb. 7.13: Ausschnitt der Brauchwarmwasser Tagladung im Sommer für das SFH 100.

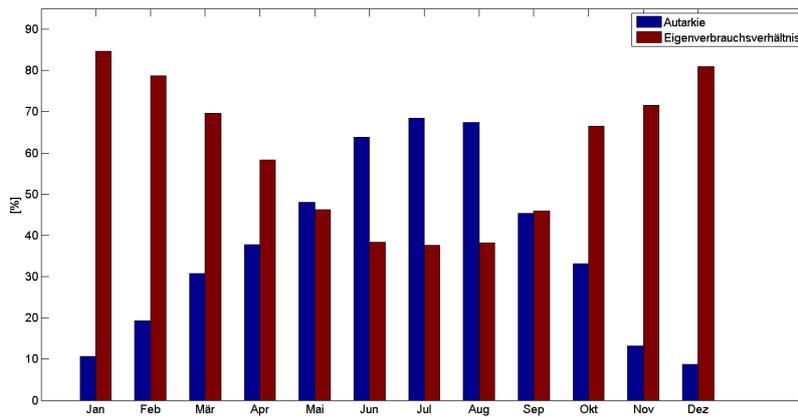


Abb. 7.14: Monatswerte Autarkie und Eigenverbrauch für das SFH 100 mit Brauchwarmwasserladung am Tag ab 10:00 Uhr und eigenverbrauchsoptimierter Regler.

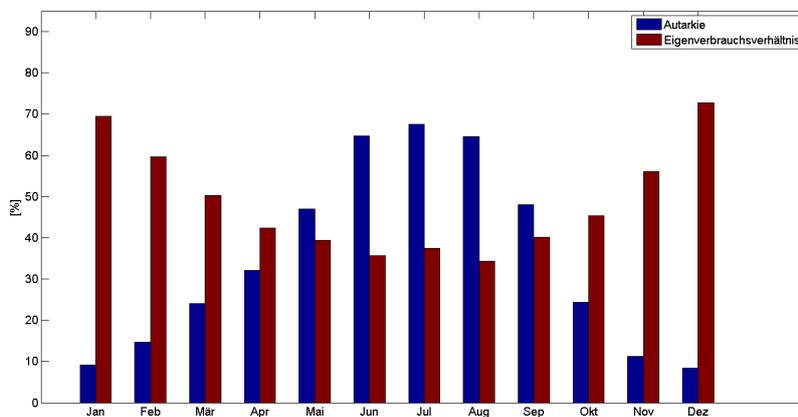


Abb. 7.15: Monatswerte Autarkie und Eigenverbrauch für das SFH 100 mit Brauchwarmwasserladung am Tag ab 10:00 Uhr und Heizkurvenregler.

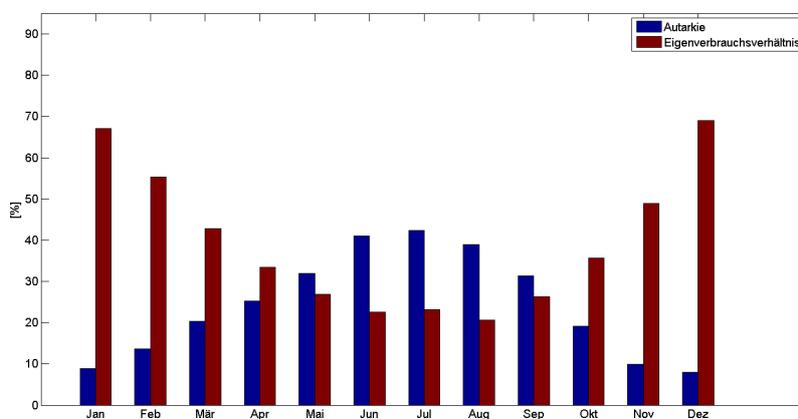


Abb. 7.16: Monatswerte Autarkie und Eigenverbrauch für das SFH 100 mit Brauchwarmwasserladung in der Nacht ab 01:00 Uhr und Heizkurvenregler.

## 7.3 Optimierungsmöglichkeiten des Reglers zur Optimierung des lokalen Eigenbedarfs

### 7.3.1 Anpassung der PV-Leistung an die WP-Leistung

Dieses Kapitel soll den Einfluss des Verhältnisses von der Photovoltaikleistung zur Wärmepumpenleistung zeigen. In diesem Projekt entspricht die Wärmepumpenleistung der regelbaren Grösse. Durch eine geschickte Anpassung der Wärmepumpenregelstrategie sollen die Grössen Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis maximiert werden. Werden diese Grössen weiter heruntergebrochen bedeutet dies:

$$\text{Eigenverbrauchsverhältnis} \uparrow = \frac{\text{Gesamter Stromverbrauch} \uparrow - \text{Netzbezug} \downarrow}{\text{Eigenstromproduktion} \downarrow} \quad (7.2)$$

$$\text{Autarkie} \uparrow = \frac{\text{Selbst genutzte Solarenergie} \uparrow}{\text{Gesamter Stromverbrauch} \downarrow} = 1 - \frac{\text{Netzbezug} \downarrow}{\text{Gesamter Stromverbrauch} \uparrow} \quad (7.3)$$

Die Pfeile in den obigen Gleichungen wurden aus mathematischen Gründen gesetzt und haben nichts mit energetischen Überlegungen zu tun. Auffällige Punkte sind:

- Der Gesamte Stromverbrauch weist unterschiedliche Tendenzen bei der Optimierung der Autarkie und des Eigenverbrauchsverhältnisses auf. Aus energetischer Sicht soll der gesamte Stromverbrauch gesenkt werden. In diesen Untersuchungen haben wir jedoch keine Mittel um den gesamten Stromverbrauch zu senken. (Die Ausnahme bietet die Effizienz der Wärmepumpe und die Reduktion der Raum- und Brauchwassertemperatur. Diese Punkte werden in diesem Teil der Projektarbeit als gegeben betrachtet. Daher beschäftigt uns dieser Punkt nicht weiter.)
- Die Grössen Netzbezug und selbst genutzte Solarenergie sind abhängig voneinander. Der Netzbezug soll gesenkt werden und die selbst genutzte Solarenergie sollen steigen.

$$\text{Selbst genutzte Solarenergie} = \text{Gesamter Stromverbrauch} - \text{Netzbezug} \quad (7.4)$$

- Die Eigenstromproduktion soll gemäss der Definition des Eigenverbrauchsverhältnisses gesenkt werden. Die Eigenstromproduktion ist eine Funktion der Kollektorfläche (und des Anstellwinkels). Die Eigenstromproduktion weist jedoch auch eine Abhängigkeit zum Netzbezug auf. Der Netzbezug wird mit abnehmender Eigenstromproduktion zwangsläufig grösser (bei gleicher Regelstrategie).

Das Fazit daraus ist:

**Die Eigenstromproduktion soll soweit reduziert werden, solange die Reduktion keinen Einfluss auf die selbst genutzte Solarenergie und den Netzbezug hat.**

Die Reduktion der Eigenstromproduktion kann zum Beispiel durch die Reduktion der Kollektorfläche oder durch die Begrenzung der Leistung mittels Leistungselektronik realisiert werden. Daneben ist der Anstellwinkel ebenfalls entscheidend. Die vergangene (und zum Teil auch heutige) Anreizstruktur sieht eine Maximierung des jährlichen Ertrages vor. Dadurch werden die Photovoltaikkollektoren optimal auf ca. 30-35° aufgestellt. Dadurch wird im Sommer, wenn die Sonne hoch steht und viele Sonnenstunden zu erwarten sind, ein Ertragsmaximum erwirtschaftet. In der Zeit des lokalen Eigenverbrauchs sollten die Zellen eher steiler aufgestellt werden. So könnte der Ertrag im Winter bei niedrigem Sonnenstand und erhöhtem elektrischen Bedarf der Wärmepumpe gesteigert werden. Also ist nebst der Kollektorfläche auch der Anstellwinkel entscheidend. Weiter könnte eine zusätzliche Ost- und Westausrichtung der Kollektoren die Kurve der Photovoltaikproduktion entscheidend verlängern, so dass die Solarenergie während längerer Zeit am Tag genutzt werden kann. In der Tabelle 7.4 ist das Verhältnis der Photovoltaikanlage zur elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe zu sehen. Ein optimales Verhältnis der Photovoltaikleistung zur elektrischen Wärmepumpenleistung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht erarbeitet werden. Die Abbildungen 7.17 und 7.18 zeigen die Auswirkungen des Verhältnisses aus Photovoltaikleistung und Wärmepumpenleistung.

	SFH 15	SFH 45	SFH 100
Maximale Leistung der Photovoltaikanlage [W]	3800	3800	3800
Maximale elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe [W]	2090	3220	4990
Verhältnis der PV-Leistung zur WP-Leistung	1.82	1.18	0.76

Tab. 7.4: Verhältnis der maximalen Photovoltaikleistung zur maximalen elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe

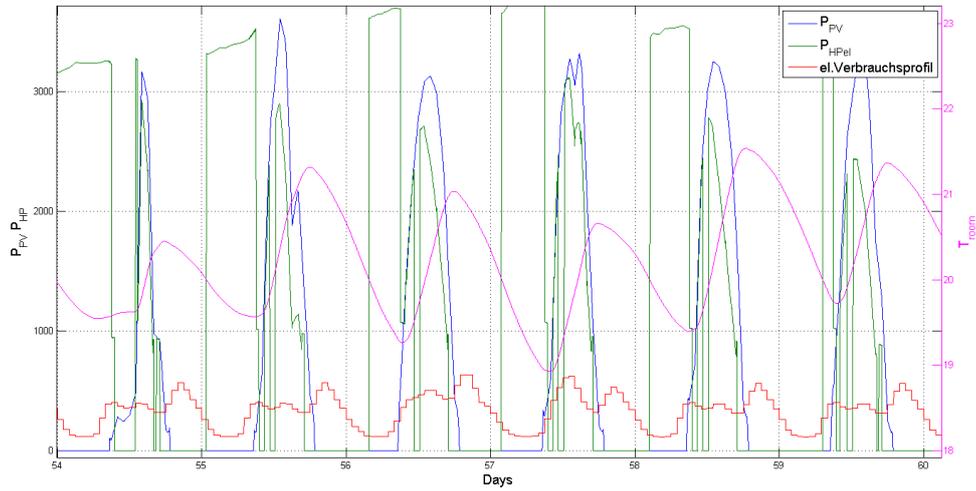


Abb. 7.17: Ausschnitt des eigenverbrauchsoptimierten Reglers für das SFH 100. Die Leistung der Wärmepumpe passt ungefähr auf die Photovoltaikleistung.

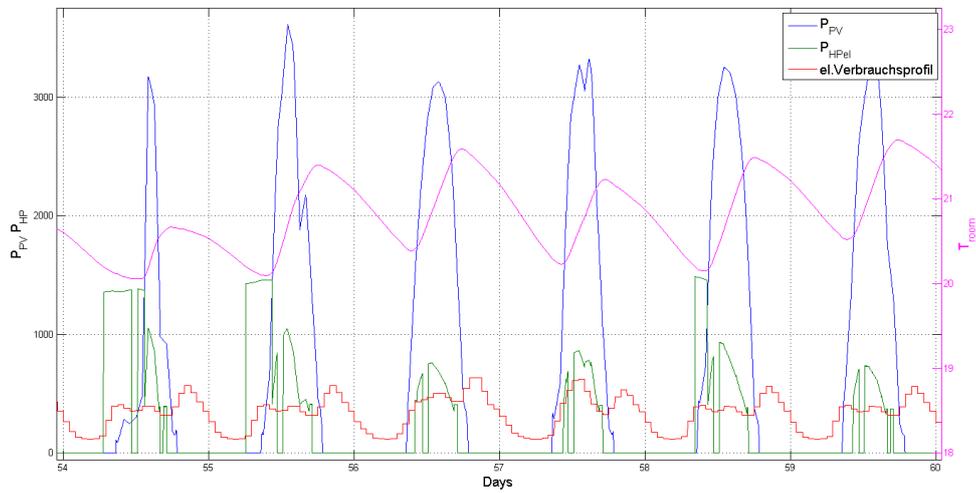


Abb. 7.18: Ausschnitt des eigenverbrauchsoptimierten Reglers für das SFH 15. Die Leistung der Wärmepumpe ist zu gering um die Photovoltaikleistung aufzufangen.

### 7.3.2 Optimierungspotential des Reglers

Der eigenverbrauchsoptimierte Regler auf Seite 36, Abbildung 7.1 hat noch Verbesserungspotential. Die Stützpunkte entsprechen einfachen Überlegungen, wurden als linear angenommen und nie variiert. Für detaillierte Untersuchungen war die Zeit zu knapp. Weitere Untersuchungen mit der Variation der Stützpunkte, dem Minimalwert der Raumtemperatur, dem Maximalwert der Raumtemperatur und einem optimalen Verhältnis der Photovoltaikleistung zur elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe würden das ganze Potential des Reglers aufzeigen.

Falls das Verhältnis der Photovoltaikleistung zur Wärmepumpenleistung nicht stimmt, lässt sich die Produktionskurve der Photovoltaikanlage nicht nachfahren. Abbildung 7.18 mit dem SFH 15 zeigt, dass die Produktionskurve der Photovoltaikanlage durch die Wärmepumpenleistung längst nicht gedeckt werden kann. In diesem Fall ist der Vorteil zu einem eigenverbrauchsoptimierten Regler mittels Ein/Aus-Schaltung (Zweipunktregler) nicht vorhanden. Die Abbildung 7.19 stammt von Remo Waser mit seinem eigenverbrauchsoptimierten Regler. Darauf ist zu erkennen, dass die Produktionskurve der Photovoltaikanlage mit der Wärmepumpe getroffen wird, aber auch hier ist die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe zu gering. Diese Situation verhält sich wie die Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs mit der leistungsgeregelten Wärmepumpe.

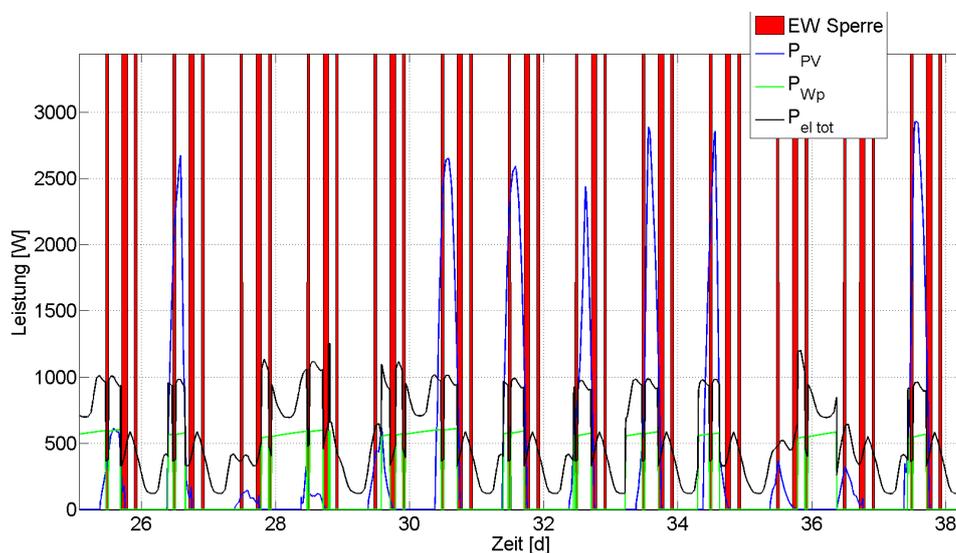


Abb. 7.19: Ausschnitt des eigenverbrauchsoptimierten Reglers von R.Waser für das SFH 15.

Eventuell könnte auch die Brauchwarmwasseraufbereitung nicht nur über ein einfaches Zeitprogramm nach dem lokalen Eigenverbrauch optimiert werden. Dafür müsste ein Regler entwickelt werden, dessen Stellgrössensignal auf die Wärmepumpe von der Photovoltaikleistung und der Speichertemperatur abhängig ist. In diesem Fall müsste wahrscheinlich auf den variablen Effizienzfaktor zur Brauchwarmwasseraufbereitung verzichtet werden, welcher auch gute Eigenschaften zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs hat (vgl. Kapitel 7.2.2).

Eine weitere Optimierung des Reglers ist im Bereich der geringen Photovoltaikleistung und tiefen Raumtemperatur (Raumtemperatur  $< 20.2\text{ °C}$  und normierte PV-Leistung  $< 0.3$ ) unbedingt nötig (vgl. grüner Bereich in Abbildung 7.1 auf Seite 36). Bei der Umschaltung vom optimierten Eigenverbrauchsregler zum Heizkurvenregler springt die Stellgrösse zur Wärmepumpe immer gleich auf den Maximalwert 1. Diese Tatsache ist zum Beispiel in Abbildung 7.17 zu sehen. Erreicht die Raumtemperatur den eingestellten Minimalwert (und die normierte PV-Leistung ist kleiner 0.3) läuft die Wärmepumpe sofort auf der vollen Leistung. Eine Verbesserung des Reglers soll die Wärmepumpe im Bereich der kontinuierlichen Leistungsregelung halten. Ansonsten ist der Effizienzvorteil der leistungsgeregelten Wärmepumpe nicht mehr vorhanden. Dies könnte mit "weicheren" Grenzen zwischen

den Reglern erreicht werden. Zum Beispiel könnte der Heizkurvenregler mit abnehmender Raumtemperatur an Priorität gewinnen und nicht nur ein- und ausgeschaltet werden.

### 7.3.3 Weglassen der EW-Sperre

Die letzte Optimierungsmöglichkeit des lokalen Eigenverbrauchs hat nicht viel mit Regelungstechnik zu tun. Regelungstechnisch gesehen ist dies eher eine Ausblendung einer Störgrösse. Ziemlich offensichtlich ist die EW-Sperre (11:25 Uhr-12:25 Uhr, 17:00 Uhr-19:00 Uhr, 21:30 Uhr-22:30 Uhr) über den Mittag von 11:25 Uhr bis 12:25 Uhr sehr störend für die Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs, da zu dieser Zeit viel Solarstrom produziert wird. In der Zukunft, wenn die Entlastung der elektrischen Netze nötig ist und die Anreize zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs vorhanden sind, wird die EW-Sperre keinen Sinn mehr machen. Die EW-Sperre wird dann nicht mehr anzutreffen sein. (Wer weiss, vielleicht ist es dann das Smart Grid, welches der Wärmepumpe einen Betriebszustand aufzwingt). Die Auswirkungen der EW-Sperre werden hier nur mit zwei Simulationen gezeigt, der Simulation mit dem eigenverbrauchsoptimierten Regler ohne Brauchwarmwasser und mit Brauchwarmwasser für das SFH 100.

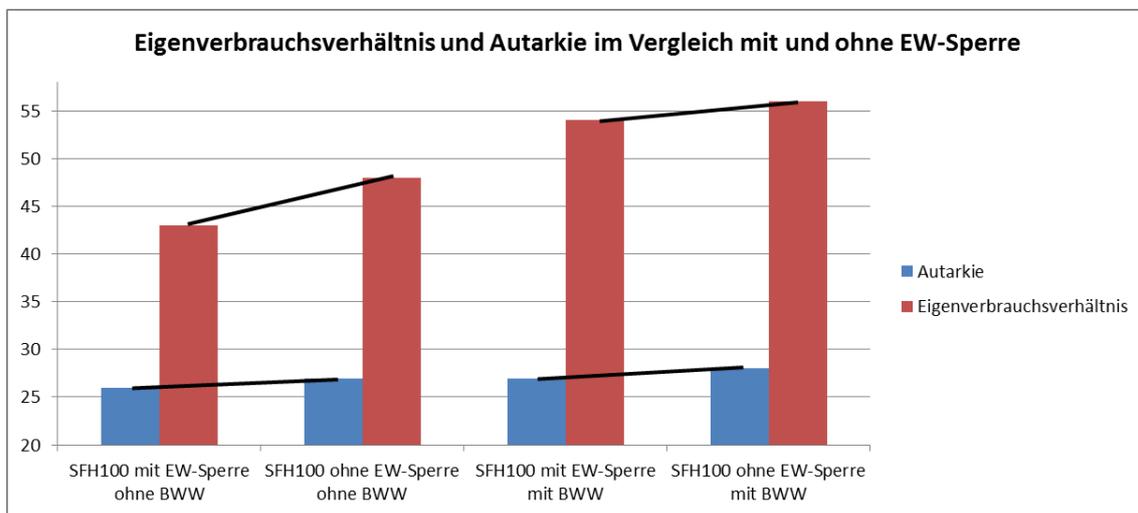


Abb. 7.20: Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis mit und ohne EW-Sperre und mit und ohne Brauchwarmwasserladung.

	Autarkie	Eigenverbrauchsverhältnis
Steigerung ohne BWW SFH 100 [%]	1	5
Steigerung mit BWW SFH 100 [%]	1	2

Tab. 7.5: Steigerung der Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis von der Simulation mit EW-Sperre zur Simulation ohne EW-Sperre.

Damit wurde gezeigt, dass die offensichtlich störende EW-Sperre einen spürbaren Einfluss auf den lokalen Eigenverbrauch haben kann. Abbildung 7.21 zeigt die Monatsdaten der Autarkie und des Eigenverbrauchsverhältnisses mit dem eigenverbrauchsoptimierten Regler ohne EW-Sperre mit Brauchwarmwasserladung am Tag. Dies sind die höchsten je erzielten Werte dieser Projektarbeit.

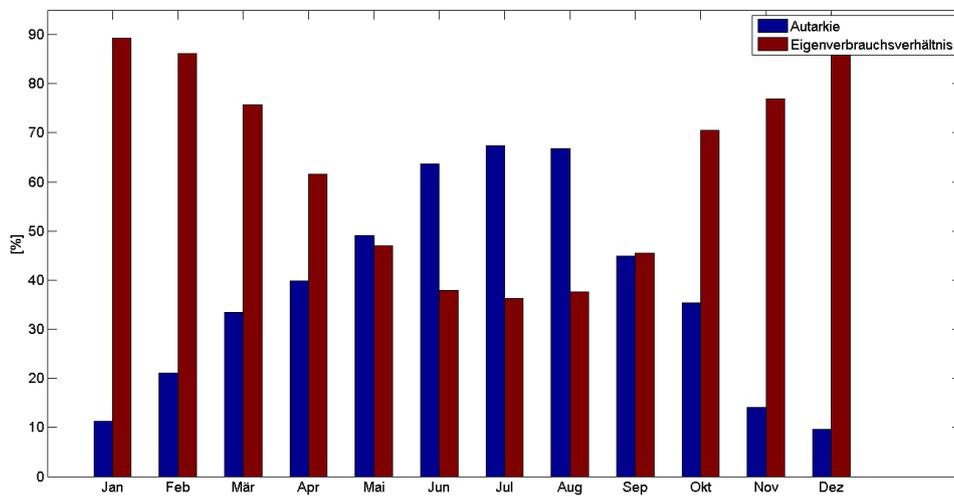


Abb. 7.21: Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis ohne EW-Sperre mit Brauchwarmwasser Tagladung mit eigenverbrauchsoptimiertem Regler für das SFH 100.

## 8 Schlussfolgerungen

Die kontinuierlich leistungsgeregelte Wärmepumpe hat einige interessante Aspekte und Merkmale. Durch die Reduktion der Wärmeleistung entstehen längere Betriebszeiten. Diese verlängerten Betriebszeiten wirken sich auf den Ventilator und Umwälzpumpe aus. In der Folge fällt die elektrische Energieaufnahme der Hilfsapparate stärker ins Gewicht. Der effiziente Einsatz des Ventilators und der Umwälzpumpe ist essentiell. Die kontinuierliche Leistungsregelung sollte also im Zusammenhang einer energieeffizienten Systemlösung zum Einsatz kommen. Auf diese Weise kann der tiefere Temperaturhub der leistungsgeregelten Wärmepumpe im Vergleich zur Zweipunktregelung ausgenutzt werden.

Gemäss der Energiestrategie 2050 werden die neuen erneuerbaren Energiequellen stark ausgebaut. Die fluktuierende Energieproduktion ist eine Herausforderung in der Bewirtschaftung der elektrischen Netze. Die leistungsgeregelte Wärmepumpe kann dieser Problematik entgegenwirken. Durch eine geschickte Kombination der Photovoltaikanlage und der Wärmepumpe kann der lokale Eigenverbrauch massiv erhöht werden. Die Voraussetzung ist ein passendes Verhältnis der Photovoltaikleistung zur Wärmepumpenleistung. Dazu gehört zum Beispiel auch der entsprechende Anstellwinkel der Kollektoren und die Variation der Ausrichtung (Ost-West). Also ist auch hier der Systemgedanke unabdingbar. Niedrigenergiehäuser mit einer grossen Photovoltaikanlage können gleich viel oder mehr Energie über das Jahr produzieren als sie selbst benötigen, jedoch führt diese Kombination nicht zu einer Entlastung der elektrischen Neze. Die Zeitkonstante der Beurteilung ist zu gross gewählt. Das Ziel muss eine der regelbaren Last entsprechende Photovoltaikleistung sein, um den Netzbezug zu minimieren bei einer möglichst geringen Eigenstromproduktion.

Innerhalb der Systemgrenze Einfamilienhaus bietet die Kombination der leistungsgeregelten Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage ein hervorragende Systemlösung. Wird die Systemgrenze etwas weiter gefasst, zum Beispiel um ein ganzes Quartier, gewinnt der Austausch unter den verschiedenen Produzenten und Verbrauchern an Bedeutung. Dabei taucht das Stichwort "Smart-Grid" sofort auf. Welche Rolle die leistungsgeregelte Wärmepumpe im Bereich des Smart-Grids spielt, wurde hier nicht untersucht. Jedoch kann vermutet werden, dass ein optimales System Wärmepumpe und Photovoltaikanlage auch für eine erweiterte Systemgrenze von Interesse ist. Ein allfälliges Smart-Grid könnte durch den hohen lokalen Eigenverbrauch im Einfamilienhausbereich entlastet werden.

## 9 Reflexion

Die Projektarbeit wurde durch den Aufbau des Simulationsmodells geprägt. Von Anfang an gab uns Herr Dähler sehr gute Inputs. Herr Dähler arbeitet in der ABB und führt täglich Simulationen mit Matlab/Simulink durch. Die Verbesserungsvorschläge wurden vor allem durch den Masterstudent und wissenschaftlichen Mitarbeiter James Trayler bearbeitet. So entstand ein professioneller Simulationsaufbau mit Parameter File und Plot File, einem GUI (graphical user interface) zur Steuerung der Simulation und einem GUI, welches die Resultate darstellt. Das Arbeiten mit GUI's und Parameter File musste geübt sein. Mit der Zeit entstanden neue, verbesserte Versionen von Simulationsmodellen mit Inputs aller projektbeteiligten Personen, die es stets zu verfolgen galt. Für einen Anfänger im Bereich Matlab/Simulink war bereits dies eine Herausforderung.

Daneben versuchte ich meinem Kerngeschäft, den leistungsgeregelten Wärmepumpen, nachzugehen. Erfolgreich konnten mehr Stützstellen zur Simulation aus dem Datenblatt von Stiebel-Eltron erzeugt werden. Beim Gespräch mit dem Praktiker Tobias Oswald wurde jedoch klar, dass ein reales Abbild der leistungsregulierten Wärmepumpe in seinem Detaillierungsgrad sehr schwer bis nicht zu realisieren ist. Der Praktiker aus der kleinen Firma elsat ec ag in Unterkulm ([www.waermepumpen-steuerung.ch](http://www.waermepumpen-steuerung.ch)) bewegt sich auf einer ganz anderen Ebene. Für ihn ist der störungsfreie Betrieb der Wärmepumpen von viel grösserem Interesse. Daraus resultiert seine optimale Einbindung leistungsregelter Wärmepumpen und die Effizienz liegt an zweiter Stelle. Reale Regelstrategien berücksichtigen noch einige weitere Einflussgrößen wie zum Beispiel die Schmierung des Kompressors, Abtauvorgänge, die Steuerung von Ventilen etc.. Diese Einflüsse können mit der Carnot-Toolbox auf keinen Fall berücksichtigt werden. So kam es, dass ich mich in dieser Projektarbeit auf die Hinweise der Hochschule Luzern zur optimalen Einbindung und eigene Ideen konzentrierte.

Als Drittes musste während der Projektarbeit immer ein Auge auf die Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs und damit die Arbeit von R.Waser (Projekt 5 und Thesis) und J.Ragaller (Projekt 5) geworfen werden. Den Grundgedanken des lokalen Verbrauchs wurde schnell verstanden. Um einen Regler zu entwerfen, der auf das Eigenverbrauchsverhältnis und die Autarkie (und eventuell sogar noch kostenoptimiert) optimiert ist, musste das Grundverständnis ausgebaut werden. Nun sind wir bereits bei drei Teilgebieten dieser Projektarbeit: Dem Aufbau der Simulation, den Recherchen zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen und der Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs. Während der Schulzeit konnte diese Mehrfachbelastung oft nicht bewältigt werden. Die Folge war eine konstante Vernachlässigung mindestens eines Teilgebietes. Dank der Intensivzeit am Ende dieser Projektarbeit (ohne die Schule) wurden trotzdem alle Teilgebiete erfolgreich abgedeckt und bearbeitet.

Extrem lobenswert war die Zusammenarbeit im Team. David Zogg und James Trayler legten die Grundlage für die Projektarbeit. Dank fundierten Untersuchungen und Recherchen unterstützten sie Remo Waser und mich im Aufbau des Simulationsmodells, der Definition verschiedener Kennzahlen (JAZ etc.) und Inputs wie zum Beispiel der EW-Sperre oder den Energiepreisen. Schwierigkeiten in der Simulation oder der Methodik der Projektarbeit konnten immer offen diskutiert werden. Vielen Dank!

## Literatur

- [1] Solar-Institut Juelich. *CARNOT Blockset (Conventional And Renewable eNergy systems OpTimization block-set)*, 1999.
- [2] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, Bruce R. Munson, and David P. Dewitt. *Thermal Systems Engineering*. WILEY, 2003.
- [3] *Datenblatt Siebel-Eltron WPL 15-25*.
- [4] Lukas Gasser, Ivan Wyssen, Maik Albert, Marc Häusermann, Mirko Kleingries, and Beat Wellig. *Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung*. Technical report, Hochschule Luzern, 2011.
- [5] *Copeland Scroll - Variable Speed Solutions For Heat Pump Applications*, 2011.
- [6] Dieter Korn. *Effizienter Betrieb von Kälteanlagen*, volume 201. VDE Verlag GmbH, 2011.
- [7] grroupe-e <http://www.groupe-e.ch/de/wieviel-strom-verbraucht-ein-durchschnittlicher-haushalt>, August 2014.
- [8] Jürgen Ragaller. *Simulation und Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs von Photovoltaik-Wärmepumpenanlagen mit Polysun*. Technical report, FHNW, 2014.
- [9] Ralf Dott, Michel Y. Haller, Jörn Ruschenburg, Fabian Ochs, and Jacques Bony. *The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38*. Technical report, IEBau - Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Solartechnik - Hochschule Rapperswil, Division Thermal Systems and Buildings - Fraunhofer-Institut, Bauphysik - Universität Innsbruck, LESBAT - Yverdon-les-Bains, 2012.
- [10] H. R. Gabathuler, H. Mayer, and Dr. Th. Afjei. *Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen*.
- [11] Peter Kunz, Prof. Dr. Thomas Afjei, Prof. Werner Betschart, Peter Hubacher, Rolf Löhner, Andreas Müller, and Vladimier Prochaska. *Handbuch Wärmepumpen: Planung/Optimierung/Betrieb/Wartung*. Bundesamt für Energie, Januar 2008.
- [12] M. Rothert. Sma. In *Next Energy*, 2013.

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Bild der Carnot Toolbox (Conventional And Renewable eNergy systems OpTimization blockset) .	2
2.1	Systemabgrenzung - rot gepunktet ist die Systemgrenze ersichtlich. . . . .	3
3.1	TS-Diagramm des Wärmepumpenprozesses. Quelle: [2] ergänzt mit eigenen Pfeilen und Kom- mentaren. . . . .	4
3.2	Stützpunkte von Stiebel-Eltron. . . . .	6
3.3	Stützpunkte der Leistungszahl von Stiebel-Eltron. . . . .	6
3.4	Beispielhafter Verlauf eines Teillastwirkungsgrades. . . . .	7
3.5	Beispielhafter Verlauf des COP in Abhängigkeit der Drehzahl. . . . .	8
3.6	Verlauf der Leistungszahl in Abhängigkeit der Drehzahl für das Wärmepumpenmodell . . . . .	9
3.7	Verlauf der des Carnot-Wirkungsgrades für Wärmepumpen in Abhängigkeit der Kondensation- stemperatur . . . . .	9
3.8	Verlauf der Heizleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme für 0°C Aussentemperatur. . . .	10
3.9	Verlauf der Heizleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme für 0°C Aussentemperatur. . . .	10
4.1	Betriebsweise des Leistungsreglers. . . . .	11
5.1	Grundschemata des Leistungsreglers / Heizkurvenregler. . . . .	12
5.2	Kaskadenregelung mit überlagertem Raumtemperatur-Regler und unterlagertem Rücklauftemperatur- Regler. . . . .	13
5.3	Fehlerhafte Jahressimulation. . . . .	13
5.4	Schema der Brauchwarmwasseraufbereitung. . . . .	14
5.5	Hydraulikschema mit den Messstellen und der logischen Verknüpfung . . . . .	14
5.6	Mittlerer Temperaturhub vom Quelleneintritt zum Senkenaustritt. . . . .	18
5.7	Prozentualer Anteil des elektrischen Bedarfs der Hilfsapparate am gesamten elektrischen Bedarf. .	18
5.8	Prozentuale Steigerung der Jahresarbeitszahl mit Hilfsaggregaten von der Regelstrategie "Leis- tungsregelung Kompressor, Ventilator und Umwälzpumpe" zur Regelstrategie "Zweipunktregler"	19
5.9	Funktionsprinzip des variablen Effizienzfaktors. . . . .	23
5.10	Resultate der Brauchwarmwasseraufbereitung mit dem SFH 15 . . . . .	25
5.11	Resultate der Brauchwarmwasseraufbereitung mit dem SFH 45 . . . . .	26
5.12	Resultate der Brauchwarmwasseraufbereitung mit dem SFH 100 . . . . .	27
6.1	Monatliche Arbeitszahlen für das SFH 100 in der Simulation mit Brauchwarmwasseraufbereitung. .	31
6.2	Ausschnitt aus dem Datenblatt von Emerson [5]. . . . .	32
6.3	Leistungsaufnahme des Lüfters mit verschiedenen Drosselmethode[n] [6] . . . . .	33
6.4	Ausschnitt aus dem Datenblatt von Stiebel-Eltron[3] - Ansteuerung der Umwälzpumpe . . . . .	34
7.1	Funktionsprinzip des Reglers zur Eigenbedarfsdeckung. . . . .	36
7.2	Ausschnitt aus dem elektrischen Verbrauchsprofil zur Erreichung des natürlichen Eigenverbrauchs. .	37
7.3	Schema zur Optimierung des Eigenverbrauchs. . . . .	37
7.4	Schema zur Optimierung des Eigenverbrauchs. . . . .	38
7.5	Auswertung der Raumtemperaturen während der Simulation zum lokalen Eigenverbrauch mit dem optimierten Eigenverbrauchsregler. . . . .	39
7.6	Vergleich von Autarkie und Eigenverbrauch über die verschiedenen Gebäudetypen mit verschie- denen Reglern und ohne Brauchwarmwasser. . . . .	41
7.7	Autarkie und Eigenverbrauchsverhältniss über die Monate mit dem SFH 15 ohne Brauchwarmwas- ser mit Eigenverbrauchsoptimierung . . . . .	43
7.8	Autarkie und Eigenverbrauchsverhältniss über die Monate mit dem SFH 100 ohne Brauchwarm- wasser mit Eigenverbrauchsoptimierung . . . . .	43

7.9	Ausschnitt aus den Leistungen der Wärmepumpe, der PV-Anlage und des elektrischen Verbrauchsprofils sowie Raumtemperatur für das SFH 100. . . . .	44
7.10	Ausschnitt aus den Leistungen der Wärmepumpe, der PV-Anlage und des elektrischen Verbrauchsprofil sowie Raumtemperatur für das SFH 15. . . . .	44
7.11	Vergleich von Autarkie und Eigenverbrauch über die verschiedenen Gebäudetypen mit verschiedenen Reglern und mit Brauchwarmwasser. . . . .	45
7.12	Ausschnitt des eigenverbrauchsoptimierten Regler mit Brauchwarmwasserladung am Tag für das SFH 100. . . . .	46
7.13	Ausschnitt der Brauchwarmwasser Tagladung im Sommer für das SFH 100. . . . .	46
7.14	Monatswerte Autarkie und Eigenverbrauch für das SFH 100 mit Brauchwarmwasserladung am Tag ab 10:00 Uhr und eigenverbrauchsoptimierter Regler. . . . .	47
7.15	Monatswerte Autarkie und Eigenverbrauch für das SFH 100 mit Brauchwarmwasserladung am Tag ab 10:00 Uhr und Heizkurvenregler. . . . .	47
7.16	Monatswerte Autarkie und Eigenverbrauch für das SFH 100 mit Brauchwarmwasserladung in der Nacht ab 01:00 Uhr und Heizkurvenregler. . . . .	47
7.17	Ausschnitt des eigenverbrauchsoptimierten Reglers für das SFH 100. Die Leistung der Wärmepumpe passt ungefähr auf die Photovoltaikleistung. . . . .	50
7.18	Ausschnitt des eigenverbrauchsoptimierten Reglers für das SFH 15. Die Leistung der Wärmepumpe ist zu gering um die Photovoltaikleistung aufzufangen. . . . .	50
7.19	Ausschnitt des eigenverbrauchsoptimierten Reglers von R.Waser für das SFH 15. . . . .	51
7.20	Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis mit und ohne EW-Sperre und mit und ohne Brauchwarmwasserladung. . . . .	52
7.21	Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis ohne EW-Sperre mit Brauchwarmwasser Tagladung mit eigenverbrauchsoptimiertem Regler für das SFH 100. . . . .	53
A.1	Übersicht des Simulinkmodells. . . . .	66
A.2	Elektrische Gewinne nach IEA Task 44 [9, S. 11]. . . . .	68
A.3	Anzahl Personen im Gebäude nach IEA Task 44 [9, S. 10]. . . . .	68
A.4	Die in dieser Simulation verwendeten Meteodaten von Zürich Kloten nach SIA. . . . .	69
A.5	Eine grobe Übersicht der zwei verwendeten Preisstrukturen, die vom Projektteam definiert wurden. . . . .	70
A.6	Ausschnitt der Energiepreise . . . . .	70
A.7	Sperrzeiten der Wärmepumpe. . . . .	71
A.8	Brauchwarmwasser-Zapfprofil . . . . .	71
A.9	Visualisierung der Autarkie von J.Ragaller[8] . . . . .	74
A.1	Verlauf der Stellgröße und der Sperrzeiten während der Auslegungssimulation für das SFH 15. . . . .	78
A.2	Verlauf der Raum-, Vorlauf-, Rücklauf- und Aussentemperatur während der Auslegungssimulation für das SFH 15. . . . .	78
A.1	Originalschema der STASCH4 - mit Seriespeicher und Brauchwarmwasser Erwärmung [10] . . . . .	80

## Tabellenverzeichnis

3.1	Stützpunkte des Wärmepumpenmodelles. . . . .	5
5.1	Übersicht über die Simulationen zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen ohne Brauchwarmwasser. . . . .	15
5.2	Einflussfaktoren auf die Effizienz des Wärmepumpenmodells. . . . .	16
5.3	Hintergrunddaten der Simulation 4 - Leistungsregelung des Kompressors, Ventilators und Umwälzpumpe . . . . .	17
5.4	Hintergrunddaten der Simulation 1 - Zweipunktregler . . . . .	17
5.5	Übersicht der Resultate SFH15 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen ohne Brauchwarmwasser. . . . .	20
5.6	Übersicht der Resultate SFH45 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen ohne Brauchwarmwasser. . . . .	21
5.7	Übersicht der Resultate SFH100 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen ohne Brauchwarmwasser. . . . .	22
5.8	Übersicht über die Simulationen zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit Brauchwarmwasser. . . . .	23
5.9	Übersicht der Resultate zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit Brauchwarmwasser. . . . .	24
5.10	Übersicht der Resultate SFH 15 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit Brauchwarmwasser. . . . .	28
5.11	Übersicht der Resultate SFH 45 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit Brauchwarmwasser. . . . .	28
5.12	Übersicht der Resultate SFH 100 zur optimalen Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen mit Brauchwarmwasser. . . . .	28
6.1	Prüfung der Ergebnisse im Bereich der Gebäudemodelle . . . . .	29
6.2	Vergleich der Jahresarbeitszahlen mit verschiedenen Gebäudemodellen . . . . .	29
6.3	Vergleich des mittleren Temperaturhubes über die verschiedenen Gebäudemodelle und Regelstrategien. . . . .	30
7.1	Übersicht über die Simulationen zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs mit leistungsgeregelten Wärmepumpen. . . . .	38
7.2	Resultate der Simulation zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs . . . . .	40
7.3	Resultate der Simulation zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs ohne BWW . . . . .	42
7.4	Verhältnis der maximalen Photovolatikleistung zur maximalen elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe . . . . .	49
7.5	Steigerung der Autarkie und Eigenverbrauchsverhältnis von der Simulation mit EW-Sperre zur Simulation ohne EW-Sperre. . . . .	52
A.1	Simulationsnummern der Simulation zur optimalen Einbindung ohne Brauchwarmwasser. . . . .	63
A.2	Simulationsnummern der Simulation zur optimalen Einbindung mit Brauchwarmwasser. . . . .	64
A.3	Simulationsnummern der Simulation zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs. . . . .	65
A.1	Gebäudeparameter nach IEA Task 44 [9] . . . . .	67
A.2	Eckdaten der Photovoltaikanlage . . . . .	68
A.1	Auslegung der Wärmepumpe nach STASCH[10] und den Daten der IEA Task 44[9] . . . . .	76
A.2	Skalierungsfaktoren der Wärmepumpen für verschiedene Gebäude. . . . .	77
A.3	Eckdaten der Speicher durch die Auslegung nach STASCH . . . . .	77
A.4	Daten zur Berechnung des Luftvolumenstromes . . . . .	79

---

A.5 Auslegung des Ventilators . . . . . 79

## 10 Ehrlichkeitserklärung

Mit der nachfolgenden Unterschrift bestätigt Lukas Voramwald, dass er die vorliegende Arbeit selbständig erarbeitet und geschrieben hat. Quellen, Zitate und paraphrasierte Stellen aus anderen Werken sind unter Angaben der Quellen kenntlich gemacht.

Lukas Voramwald, Student in Energie- und Umwelttechnik

---

Ort / Datum / Unterschrift

## Anhang

- A Archivierung der Simulationsnummern
- B Aufbau der Simulation
- C Auslegung der Wärmepumpe
- D STASCH
- E Projektskizze
- F Projektauftrag
- G Daten-CD

## A Archivierung der Simulationsnummern

### A.1 Simulationsnummern der optimalen Einbindung ohne BWW

Nr.	SFH 15 - Simulationsnummer	SFH 45 - Simulationsnummer	SFH 100 - Simulationsnummer
1	Workspace_SFH15-04-Aug-2014-08-11-49.mat	Workspace_SFH45-04-Aug-2014-08-20-33.mat	Workspace_SFH100-04-Aug-2014-08-28-21.mat
2	Workspace_SFH15-04-Aug-2014-08-45-29.mat	Workspace_SFH45-04-Aug-2014-09-01-56.mat	Workspace_SFH100-04-Aug-2014-09-18-19.mat
3	Workspace_SFH15-04-Aug-2014-09-32-29.mat	Workspace_SFH45-04-Aug-2014-09-51-47.mat	Workspace_SFH100-04-Aug-2014-10-07-47.mat
4	Workspace_SFH15-04-Aug-2014-10-49-59.mat	Workspace_SFH45-04-Aug-2014-11-07-34.mat	Workspace_SFH100-04-Aug-2014-11-30-13.mat

Tab. A.1: Simulationsnummern der Simulation zur optimalen Einbindung ohne Brauchwarmwasser.

1. Zweipunktregelung
2. Alleinige Drehzahlregelung von Kompressoren (30-100%)
3. Drehzahlregelung Kompressor (30-100%), Ventilator (30-100%)
4. Drehzahlregelung Kompressor (30-100%), Ventilator (30-100%) und Umwälzpumpe (50-100%)

## A.2 Simulationsnummern der optimalen Einbindung mit BWB

Nr.	SFH 15	SFH 45	SFH 100
1.	Workspace_SF15-04-Aug-2014-12-09-06.mat	Workspace_SF45-04-Aug-2014-12-25-10.mat	Workspace_SF100-04-Aug-2014-12-41-24.mat
2.	Workspace_SF15-04-Aug-2014-13-28-15.mat	Workspace_SF45-04-Aug-2014-13-46-19.mat	Workspace_SF100-04-Aug-2014-14-04-27.mat
3.	Workspace_SF15-04-Aug-2014-14-21-24.mat	Workspace_SF45-04-Aug-2014-14-42-18.mat	Workspace_SF100-04-Aug-2014-15-00-28.mat
4.	Workspace_SF15-04-Aug-2014-15-20-20.mat	Workspace_SF45-04-Aug-2014-15-40-08.mat	Workspace_SF100-04-Aug-2014-16-02-14.mat

Tab. A.2: Simulationsnummern der Simulation zur optimalen Einbindung mit Brauchwarmwasser.

1. Konstanter Effizienzfaktor 1 (volle Leistung)
2. Konstanter Effizienzfaktor 0.8
3. Konstanter Effizienzfaktor 0.5
4. Variabler Effizienzfaktor

### A.3 Simulationsnummern zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs

Nr.	SFH 15	SFH 45	SFH 100
1.	Workspace_SF15-05-Aug-2014-13-31-49.mat	Workspace_SF45-05-Aug-2014-14-11-15.mat	Workspace_SF100-05-Aug-2014-14-27-29.mat
2.	Workspace_SF15-05-Aug-2014-14-36-48.mat	Workspace_SF45-05-Aug-2014-14-45-59.mat	Workspace_SF100-06-Aug-2014-08-58-31.mat
3.	Workspace_SF15-06-Aug-2014-09-30-42.mat	Workspace_SF45-06-Aug-2014-09-52-50.mat	Workspace_SF100-06-Aug-2014-10-11-13.mat
4.	Workspace_SF15-06-Aug-2014-10-37-50.mat	Workspace_SF45-06-Aug-2014-11-00-17.mat	Workspace_SF100-06-Aug-2014-11-18-14.mat
5.	Workspace_SF15-06-Aug-2014-15-11-18.mat	Workspace_SF45-06-Aug-2014-14-57-21.mat	Workspace_SF100-06-Aug-2014-14-35-15.mat

Tab. A.3: Simulationsnummern der Simulation zur Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs.

1. Leistungsgeregelt nach Heizkurve ohne BWW ("natürlicher" Eigenverbrauch)
2. Eigenverbrauchsoptimierter Regler ohne BWW
3. Leistungsgeregelt nach Heizkurve mit BWW Nachtladung ("natürlicher" Eigenverbrauch)
4. Leistungsgeregelt nach Heizkurve mit BWW Tagladung
5. Eigenverbrauchsoptimiert mit BWW Tagladung

## B Aufbau der Simulation

Die Simulation besteht aus vier Teilen - dem System, dem Controller, den externen Einflüssen und den Berechnungen.

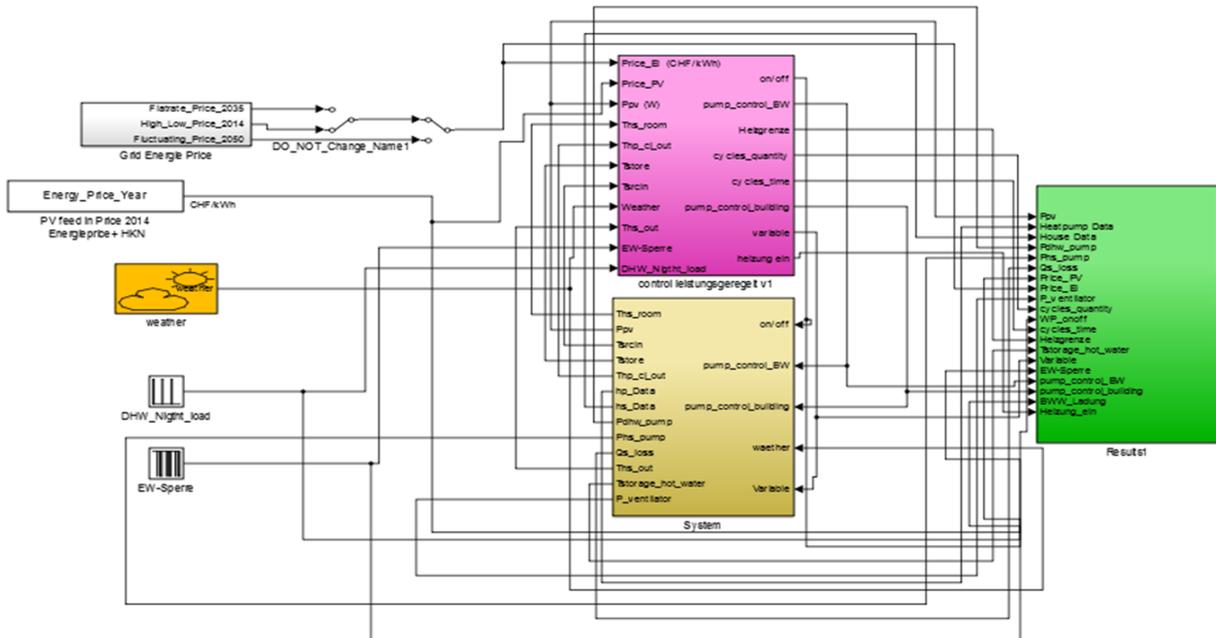


Abb. A.1: Übersicht des Simulinkmodells.

In Pink der Controller, in Gelb das System, in Grün die Berechnungen und links die äusseren Einflüsse.

### B.1 System

Das System beschreibt den hydraulischen Aufbau mit den dazugehörigen Energieströmen. Die Komponenten stammen aus dem Blockset der Carnot Toolbox [1]. Das System besteht aus dem Haus, der Photovoltaikanlage, dem Heizungs- und Brauchwarmwasserspeicher, der Wärmepumpe mit Ventilator und den Umwälzpumpen. Dieses System wurde innerhalb des Projektteams definiert und festgelegt.

### B.1.1 Gebäudemodelle

Die in diesem Projekt verwendeten Gebäudemodelle wurden vom Institut Energie am Bau an der Fachhochschule Nordwestschweiz entwickelt. Die dazugehörige Arbeit trägt den Namen "The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38"[9]. Dabei stehen die folgenden drei Gebäude zur Verfügung:

- SFH 15 (SFH=Single-Family House) ist ein neues Gebäude in hoher energetischer Qualität. In der Schweiz ist es vergleichbar mit Minergie-P oder dem deutschen Passivhaus. Die Nummer 15 bezieht sich auf den spezifischen Energiebedarf pro Fläche ( $15kWh/m^2$ ) am Standort Strasbourg.
- SFH 45 ist ein Gebäude nach dem heutigen energetischen Standard oder ein renoviertes Gebäude mit sehr guter thermischer Qualität ( $45kWh/m^2$  in Strasbourg).
- SFH 100 stellt ein nicht renoviertes, bestehendes Gebäude dar ( $100kWh/m^2$  in Strassbourg).

Parameter	Gebäudemodell		
	SFH15	SFH45	SFH100
Beheizte Wohnfläche [ $m^2$ ]	140	140	140
Raumhöhe [m]	2.6	2.6	2.6
Anzahl Stockwerke	2	2	2
Thermische Kapazität [ $MJ/m^2/K$ ]	0.5	0.5	0.5
Wärmeübergang Heizung/Gebäude [W/K]	440	440	440
U-Wert Fenster [ $W/m^2/K$ ]	1	1.5	3
U-Wert Aussenwand [ $W/m^2/K$ ]	0.182	0.286	0.667
U-Wert Dach [ $W/m^2/K$ ]	0.162	0.197	0.575
U-Wert Boden [ $W/m^2/K$ ]	0.135	0.173	0.278

Tab. A.1: Gebäudeparameter nach IEA Task 44 [9]

Weitere Informationen sind im Dokument des IEA Task 44 [9] zu finden.

### B.1.2 Innere Gewinne

Gemäss dem IEA Tast 44 [9] werden innere Gewinne von Personen (Abbildung A.3) und elektrischer Abwärme (Abbildung A.2) verzeichnet. Jede Person hat einen konvektiven Wärmeverlust (=innerer Gewinn) von 20W und einen Strahlungsverlust von 40W. Auf das Jahr macht dies insgesamt  $9 kWh/m^2/a$  aus ( $3 kWh/m^2/a$  konvektiv und  $6 kWh/m^2/a$  infolge Strahlung). Die elektrische Abwärme summiert sich über dass Jahr auf  $13.4 kWh/m^3/a$ .

### B.1.3 Photovoltaikanlage

Die Photovoltaikanlage kommt erst bei der Untersuchung zur Optimierung des Eigenverbrauchs ins Spiel. Für die Untersuchung der optimalen Einbindung wird die Photovoltaikanlage ausgeblendet (vgl. Tabelle A.2).

## B.2 Controller

Mit dem Controller lässt sich die Wärmepumpe steuern und regeln. Die verwendeten Regelalgorithmen beinhalten P-, PI- und Zweipunktregler. Detaillierte Informationen zu den Controllern finden Sie im Kapitel 5.1.

Parameter	Gebäudemodell		
	SFH15	SFH45	SFH100
Kollektorfläche [ $m^2$ ]	25.2	25.2	25.2
Optischer Wirkungsgrad	0.8	0.8	0.8
elektrischer Wirkungsgrad	0.2	0.2	0.2
Wechselrichter Wirkungsgrad	0.942	0.942	0.942

Tab. A.2: Eckdaten der Photovoltaikanlage

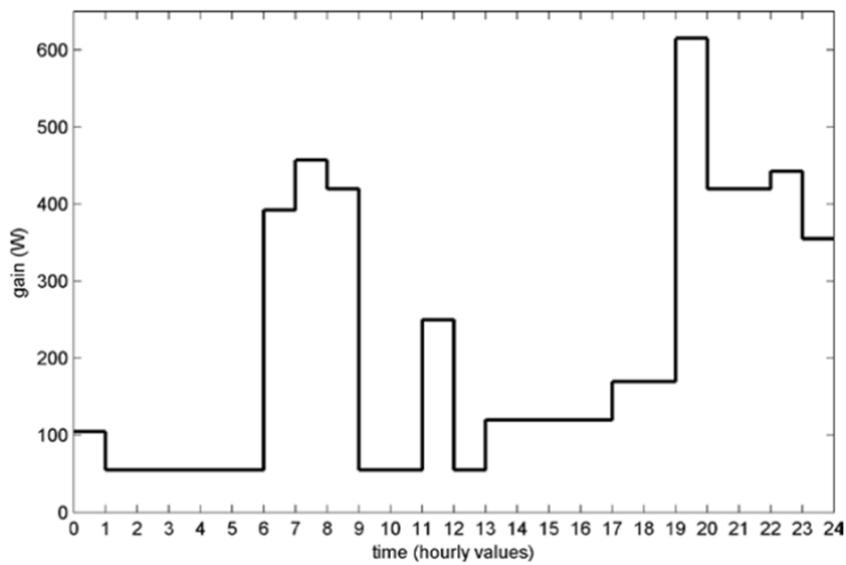


Abb. A.2: Elektrische Gewinne nach IEA Task 44 [9, S. 11].

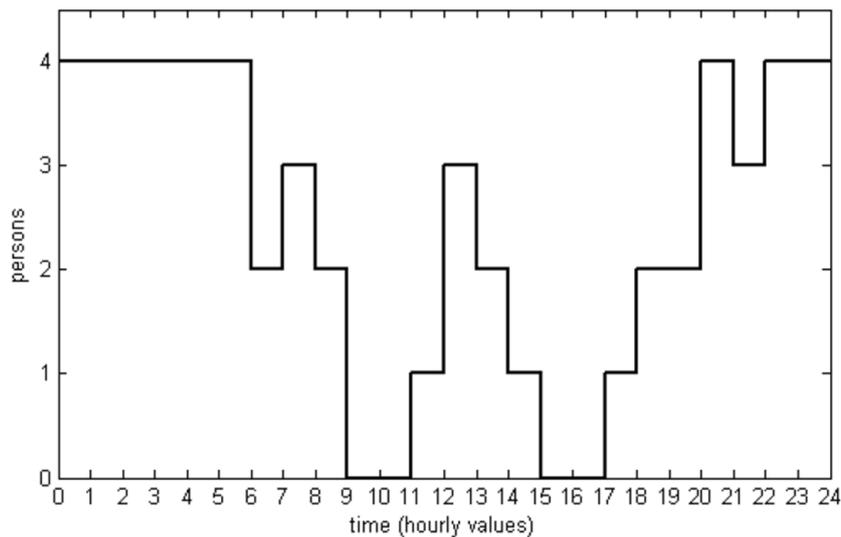


Abb. A.3: Anzahl Personen im Gebäude nach IEA Task 44 [9, S. 10].

## B.3 Externe Einflüsse

### B.3.1 Meteodaten

Dem Projektteam stehen diverse Meteodaten nach SIA zur Verfügung. Hier hat man sich für die Wetterdaten von Zürich Kloten entschieden. Die Visualisierung dieser Daten ist in Abbildung A.4 zu sehen.

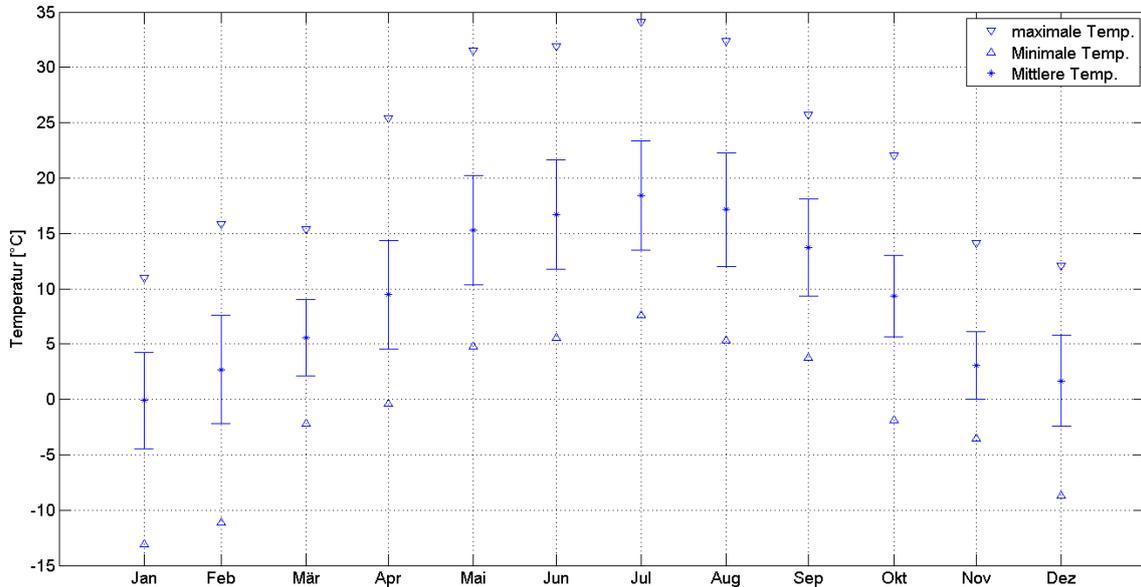


Abb. A.4: Die in dieser Simulation verwendeten Meteodaten von Zürich Kloten nach SIA.

### B.3.2 Energiepreise

Die Preisstrukturen sind im Bereich der Eigenbedarfsdeckung essentiell wichtig. Ohne eine Simulation zu tätigen, wissen wir, dass die finanziellen Anreizstrukturen zur Eigenbedarfsdeckung nicht vorhanden sind. (Die Eigenbedarfsdeckung ist praktisch noch in keinem Haushalt realisiert). Die Anlagen werden auf die Kosten optimiert. Ein einfaches Beispiel ist das Brauchwarmwasser, welches in der Nacht aufbereitet wird. Dazu wird günstige Energie aus dem Stromnetz bezogen. James Trayler und David Zogg haben für das Projektteam diverse Preisstrukturen definiert (siehe Abbildungen A.5, A.6). In dieser Projektarbeit wird nur von der Preisstruktur 2014 Hoch-Niedertarif (Untersiggenthal) Gebrauch gemacht.

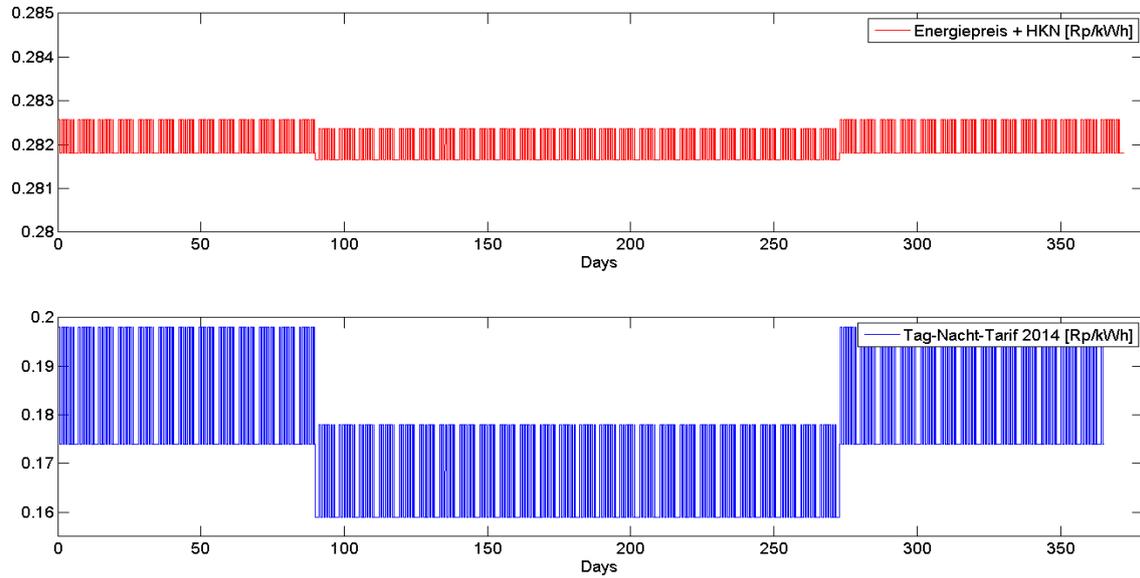


Abb. A.5: Eine grobe Übersicht der zwei verwendeten Preisstrukturen, die vom Projektteam definiert wurden.

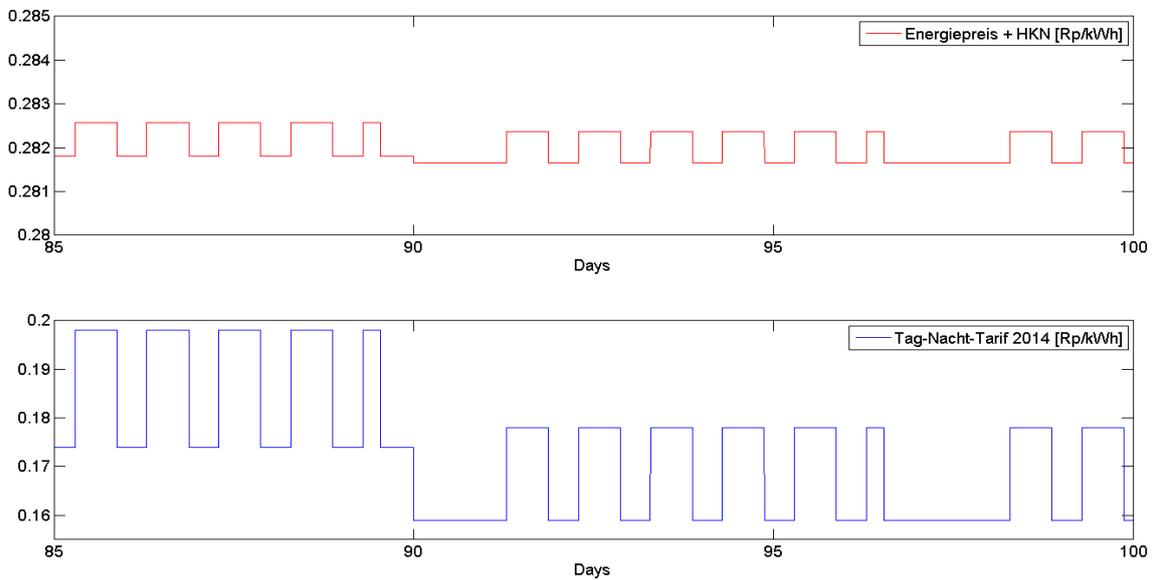


Abb. A.6: Ausschnitt der Energiepreise

### B.3.3 Sperrzeiten

Sperrzeiten werden vom örtlichen Elektrizitätswerk vorgegeben. In Zeiten, in denen das elektrische Netz bereits stark belastet ist, soll die Sperrung von Verbrauchern das Netz entlasten. Die Sperrzeiten der Wärmepumpe sind 11:25 Uhr bis 12:25 Uhr, 17:00 Uhr bis 19:00 Uhr und 21:30 Uhr bis 22:30 Uhr (Untersiggenthal) (vgl. Abbildung A.7).

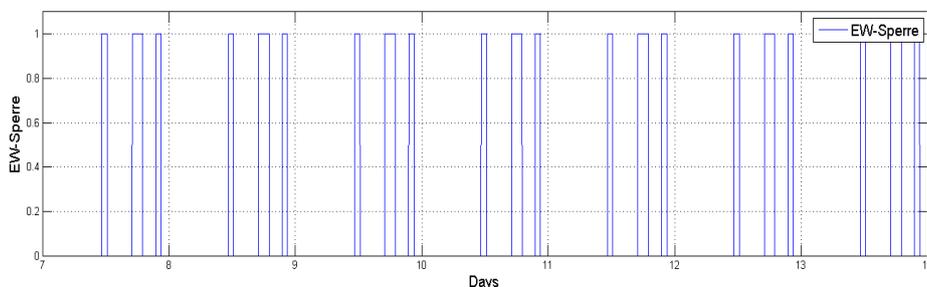


Abb. A.7: Sperrzeiten der Wärmepumpe.

1=Wärmepumpe ist gesperrt. Sperrzeiten: 11:25 Uhr bis 12:25 Uhr, 17:00 Uhr bis 19:00 Uhr und 21:30 Uhr bis 22:30 Uhr

### B.3.4 Brauchwarmwasserbezug - Zapfprofil

Mit dem Funktionsblock "water tab" kann der Brauchwarmwasserbezug simuliert werden. Das verwendete Brauchwarmwasserprofil ist sehr einfach und entspricht dem Bezug von 140l Frischwasser pro Tag. Der Funktionsblock berücksichtigt die Temperaturverteilung über das Jahr. Die Minimal- bzw. Maximaltemperatur mit dem dazugehörigen Monat kann eingestellt werden (vgl. Abbildung A.8).

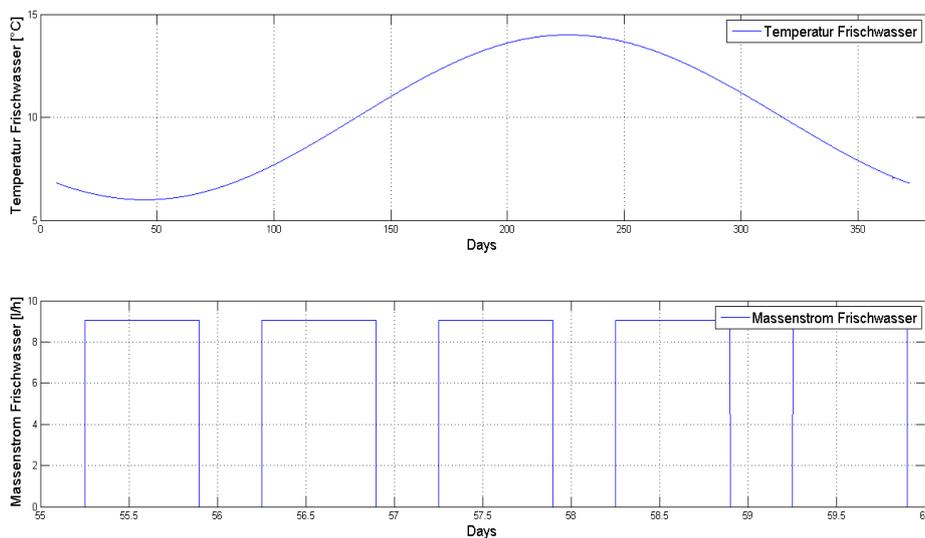


Abb. A.8: Brauchwarmwasser-Zapfprofil

Oben: Temperaturverlauf des Frischwassers über das Jahr. Unten: Massenstrom des Frischwassers während fünf Tagen. Konstanter Massenstrom von 06:00 Uhr bis 21:30 Uhr auf 140l/Tag

## B.4 Berechnungen

Der Block der Berechnungen führt mathematische Operationen aus und liest die Daten für den Workspace aus. Mit einem M-File werden die ausgewerteten Graphen und Kennzahlen dargestellt. Die relevanten Parameter sind:

### B.4.1 Energetische Parameter

#### Elektrische Energie Wärmepumpe

$E_{el\_hp}$  beinhaltet die elektrische Energie des Kompressors.

$$E_{el\_hp} = \int P_{el\_hp} dt \quad (A.1)$$

#### Erzeugte Wärmeenergie

$$Q_{tot\_hp} = \int \dot{Q}_{hp} dt \quad (A.2)$$

#### Elektrische Energie der Hilfsaggregate

$$E_{tot\_Hilfsaggregate} = \int (P_{Heizkreispumpe} + P_{Ventilator} + P_{Brauchwarmwasserpumpe}) dt \quad (A.3)$$

#### elektrischer Verbrauch total

$$E_{tot} = E_{tot\_Hilfsaggregate} + E_{el\_hp} \quad (A.4)$$

#### PV - Produktion

$$E_{PV} = \int P_{PV} dt \quad (A.5)$$

#### Netzbezug

$$\text{Für } P_{el\_Verbrauch} > P_{PV} \rightarrow \text{Netzbezug} = \int (P_{el\_Verbrauch}(t) - P_{PV}(t)) dt \quad (A.6)$$

### B.4.2 Kosten

Aufgrund der Möglichkeit von fluktuierenden Preisen können die Kosten nicht einfach aus der totalen elektrischen Energie und dem Elektrizitätspreis multipliziert werden. Es gilt:

$$\text{Für } P_{el\_Verbrauch} > P_{PV} \rightarrow \text{Stromkosten} = \int ((P_{el\_Verbrauch}(t) - P_{PV}(t)) * \text{Preis}(t)) dt \quad (A.7)$$

$$\text{Für } P_{el\_Verbrauch} < P_{PV} \rightarrow \text{Vergütung} = \int ((P_{PV}(t) - P_{el\_Verbrauch}(t)) * \text{Preis}(t)) dt \quad (A.8)$$

### B.4.3 Jahresarbeitszahlen und Definition

Die Jahresarbeitszahl ist ein gutes Mass für die Effizienz einer Wärmepumpe. Für die Auswertung lohnt es sich, verschiedene Jahresarbeitszahlen zu definieren. Dabei lehnt sich die Definitionen an das Wärmepumpenhandbuch [11, S. 5].

### Jahresarbeitszahl nur Wärmepumpe

$$JAZ_{\text{nur Wärmepumpe}} = \frac{\int \dot{Q}_{\text{WP}} dt}{\int P_{\text{el. WP}} dt} \quad (\text{A.9})$$

### Jahresarbeitszahl mit Hilfsaggregaten

$$JAZ_{\text{WP mit Hilfsaggregaten}} = \frac{\int \dot{Q}_{\text{WP}} dt - \int \dot{Q}_{\text{Speicherverluste}} dt}{\int (P_{\text{el. WP}} + P_{\text{el. tot. Hilfsaggregate}}) dt} \quad (\text{A.10})$$

### Jahresarbeitszahl nur Brauchwarmwasseraufbereitung

$$JAZ_{\text{WP BWW}} = \frac{\int \dot{Q}_{\text{WP an BWW}} dt}{\int (P_{\text{el. WP}}) dt} \quad (\text{A.11})$$

### Jahresarbeitszahl nur Heizbetrieb

$$JAZ_{\text{WP Heizbetrieb mit Hilfsaggregaten}} = \frac{\int \dot{Q}_{\text{WP Heizbetrieb}} dt}{\int (P_{\text{el. WP}}) dt} \quad (\text{A.12})$$

## B.4.4 Komfortparameter

Die Komfortparameter werden nur während der Heizperiode gebildet. Im Sommer, wenn die Heizung ausgeschaltet ist, ist zum Beispiel die Bildung des Mittelwertes über der Raumtemperatur sinnlos.

### Mittelwert der Raumtemperatur

Bei der Raumtemperatur handelt es sich um eine Funktion über der Zeit. Der Mittelwert wird folgendermassen gebildet:

$$T_{\text{Mittelwert Raumtemperatur}} = \frac{1}{n} * \sum_{i=0}^n T_{\text{Raum}} \quad (\text{A.13})$$

### Standardabweichung der Raumtemperatur

Die Standardabweichung der Raumtemperatur ist ein Mass für die Streuung der Raumtemperatur.

$$S_{\text{Raumtemperatur}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=0}^n (T_i - T_{\text{Mittelwert Raumtemperatur}})^2} \quad (\text{A.14})$$

### Maximalwert der Raumtemperatur

Dieser Parameter wird nur während der Heizperiode ausgewertet.

$$T_{\text{max}} = \max(T_{\text{Raum}}(t)) \quad (\text{A.15})$$

### Minimalwert der Raumtemperatur

Dieser Parameter wird nur während der Heizperiode ausgewertet.

$$T_{\text{min}} = \min(T_{\text{Raum}}(t)) \quad (\text{A.16})$$

### B.4.5 Betriebsparameter

Die Betriebsparameter geben Auskunft über das Betriebsverhalten des Wärmepumpensystems.

#### Totale Laufzeit der Wärmepumpe

$$\text{Totale Laufzeit der Wärmepumpe} = \sum_{t=0}^{t_{end}} t_{WP \text{ on}} \quad (\text{A.17})$$

#### Anzahl Zyklen der Wärmepumpe zu null

Die Anzahl Zyklen werden mit einem Counter gezählt. Gezählt werden nur diejenigen Zyklen, bei denen die Wärmepumpe ganz ausschaltet. Falls die Wärmepumpe von 80% auf 30% fährt und wieder auf 80%, ist dies kein Zyklus.

#### Mittlere Laufzeit der Wärmepumpe

$$\text{Mittlere Laufzeit der Wärmepumpe} = \frac{\text{Totale Laufzeit der WP}}{\text{Anzahl Zyklen der WP}} \quad (\text{A.18})$$

### B.4.6 Eigenbedarfsparameter

#### Autarkie

Für den zweiten Teil der Projektarbeit - Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage - ist die Autarkie ein entscheidendes Optimierungsmerkmal. Die Autarkie ist das Verhältnis aus der selbst genutzten Solarenergie (PV-Energie) zum gesamten Stromverbrauch (WP inkl. Hilfsaggregaten)[12].

$$\text{Autarkie} = \frac{\text{Selbst genutzte Solarenergie}}{\text{Gesamter Stromverbrauch}} = \frac{E_{dcs}}{E_{cs}} = R_{\text{aut}} = 1 - \frac{\text{Netzbezug}}{\text{tot. el. Energieverbrauch}} \quad (\text{A.19})$$

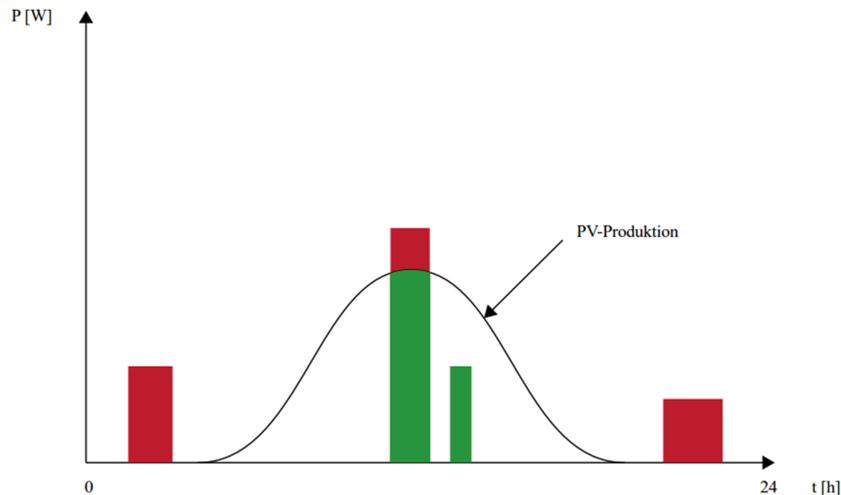


Abb. A.9: Visualisierung der Autarkie von J.Ragaller[8]

Autarkie entspricht dem Verhältnis der grünen Fläche zur roten und grünen Fläche. Die Abbildung stammt von J.Ragaller [8]

**Eigenverbrauchverhältnis**

Das Eigenverbrauchsverhältnis sagt aus, wie hoch der Anteil des direkt im Gebäude verwendeten Solarstromes am gesamt produzierten Solarstrom über einer Zeitperiode ist [12]. Diese Kennzahl ist für den zweiten Teil der Projektarbeit - Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage - von Bedeutung.

$$\text{Eigenverbrauchsverhältnis} = \frac{\text{Gesamter Stromverbrauch} - \text{Netzbezug}}{\text{Eigenstromproduktion}} = \frac{E_{cs} - E_{feg}}{E_{acp}} = R_{ocs} \quad (\text{A.20})$$

## C Auslegung der Wärmepumpe

Die Wärmepumpe wurde erst grob mit den Planungshilfen der Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen (STASCH [10]) und dann mit der Simulation ausgelegt. In der Simulation wurde ein künstlicher Wettervektor erzeugt, welcher den Auslegungskriterien von  $-10\text{ °C}$  Aussentemperatur entspricht. Die Stützpunkte aus Kapitel 3.1 werden dabei einfach linear skaliert, bis das Heizsystem die Raumtemperatur von  $20\text{ °C}$  halten kann und die Brauchwarmwasseraufbereitung auf  $55\text{ °C}$  klappt.

Parameter	SFH15	SFH45	SFH100
Heizleistung für $-10\text{ °C}$ [kW]	1.792	4.072	7.337
Vorlauftemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	35	35	55
Rücklauftemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	30	30	45
Wärmebedarf Heizung pro Tag [kWh/d]	43.0	97.7	176.1
Anzahl Bewohner	4	4	4
Spitzen-Wärmebedarf Wassererwärmung pro Tag [kWh/d]	16	16	16
Sperrzeit pro Tag [h]	4	4	4
Notwendige Heizleistung [kW]	2.95	5.69	9.61
Förderstrom der Heizungspumpe (Umwälzpumpe) [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	1.23	1.89	2.03
Leistung der Heizungspumpe (Umwälzpumpe) [W]	35	65	100
Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger [K]	5	5	5
Förderstrom der Wassererwärmerpumpe [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	1.025	1.877	2.44
Leistung der Wassererwärmerpumpe [W]	35	65	100

Tab. A.1: Auslegung der Wärmepumpe nach STASCH[10] und den Daten der IEA Task 44[9]

$$\text{Wärmebedarf Heizung pro Tag} = \text{Heizleistung} * 24h \quad (\text{A.1})$$

$$\text{Spitzen-Wärmebedarf Wassererwärmung pro Tag} = \text{Anzahl Bewohner} * 4\text{kWh/d} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{Notwendige Heizleistung} = \frac{\text{Wärmebedarf Heizung pro Tag} + \text{Spitzen-Wärmebedarf Wassererwärmung pro Tag}}{24h - \text{Sperrzeit pro Tag}} \quad (\text{A.3})$$

$$\text{Förderstrom der Heizungspumpe}[\text{m}^3/\text{h}] = \frac{0.86 * \text{Heizleistung der Wärmepumpe bei Auslegungstemperatur [kW]}}{\text{Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger [K]}} \quad (\text{A.4})$$

$$\text{Förderstrom der Wassererwärmerpumpe}[\text{m}^3/\text{h}] = \frac{0.86 * \text{Heizleistung der Wärmepumpe an der Heizgrenze [kW]}}{6K} \quad (\text{A.5})$$

Die Simulation ergab folgende Skalierungsfaktoren:

Gebäude	SFH15	SFH45	SFH100
Skalierungsfaktoren	0.65	1.0	1.55
Mittelwert der Raumtemperatur während der Simulation [°C]	20.07	20.31	20.35
Standardabweichung der Raumtemperatur während der Simulation [°C]	0.46	0.49	0.70

Tab. A.2: Skalierungsfaktoren der Wärmepumpen für verschiedene Gebäude.

Neben der Dimensionierung auf die höchst mögliche Beanspruchung bei -10°C Aussentemperatur ist bei leistungsgeregelten Wärmepumpen auch auf die Dimensionierung bei minimaler Leistung zu achten. Bei minimaler Leistung der Wärmepumpe ist auch die Strömungsgeschwindigkeit in der Saugleitung vor dem Kompressor minimal. Die Rohrleitungen müssen so dimensioniert werden, dass der Öltransport zurück in den Kompressor gewährleistet ist. Weiter ist zu kontrollieren, ob das Expansionsventil bei minimaler Leistung einwandfrei funktioniert und auch die Wärmeübertrager, Verdampfer und Kondensator, müssen den Bedingungen bei minimaler Leistung genügen[4, S. 52]. Die erwähnten Punkte sind für den Aufbau und Durchführung der Simulationen nicht relevant und werden hier vollständigshalber angefügt.

## C.1 Auslegung der Speicher nach STASCH

### SFH15

Seriespeicher	Volumen	0.01 m <sup>3</sup>
	Durchmesser	0.7m
Brauchwarmwasserspeicher	Volumen	0.3 m <sup>3</sup>
	Durchmesser	0.8m

### SFH45

Seriespeicher	Volumen	0.15 m <sup>3</sup>
	Durchmesser	0.7m
Brauchwarmwasserspeicher	Volumen	0.3 m <sup>3</sup>
	Durchmesser	0.8m

### SFH100

Seriespeicher	Volumen	0.25 m <sup>3</sup>
	Durchmesser	0.7m
Brauchwarmwasserspeicher	Volumen	0.3 m <sup>3</sup>
	Durchmesser	0.8m

Tab. A.3: Eckdaten der Speicher durch die Auslegung nach STASCH

$$\text{Volumen Seriespeicher}[l] = \text{Heizleistung der Wärmepumpe an der Heizgrenze [kW]} * 15...20 \text{ l/kW} \quad (\text{A.6})$$

$$\text{Volumen Brauchwarmwasserspeicher}[l] = 50 \text{ Liter pro Bewohner} * \text{Anzahl Bewohner} (\text{min. } 300l \text{ für EFH}) \quad (\text{A.7})$$

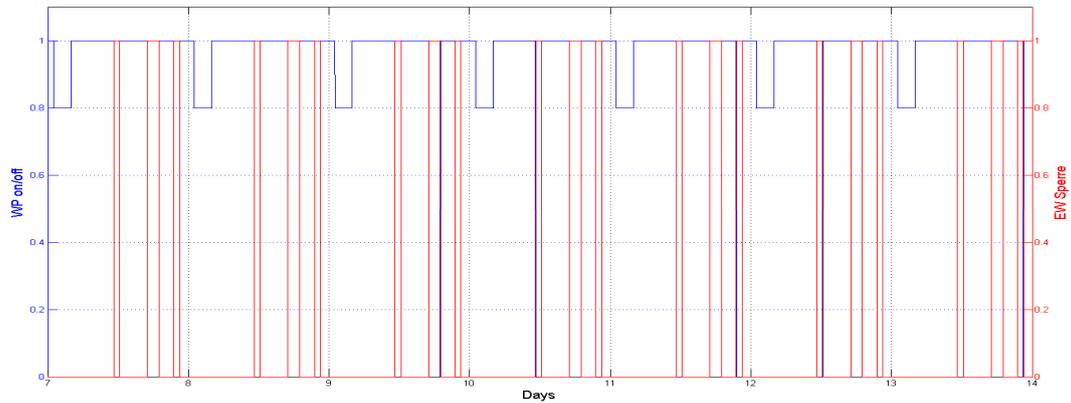


Abb. A.1: Verlauf der Stellgröße und der Sperrzeiten während der Auslegungssimulation für das SFH 15. Die Stellgröße stösst bei  $-10^{\circ}\text{C}$  immer an das Maximum und kann die Raumtemperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  gerade noch halten. Im Bereich mit der Stellgröße 0.8 wird Brauchwarmwasser aufbereitet. Für das SFH45 und SFH100 ergaben sich ähnliche Verläufe.

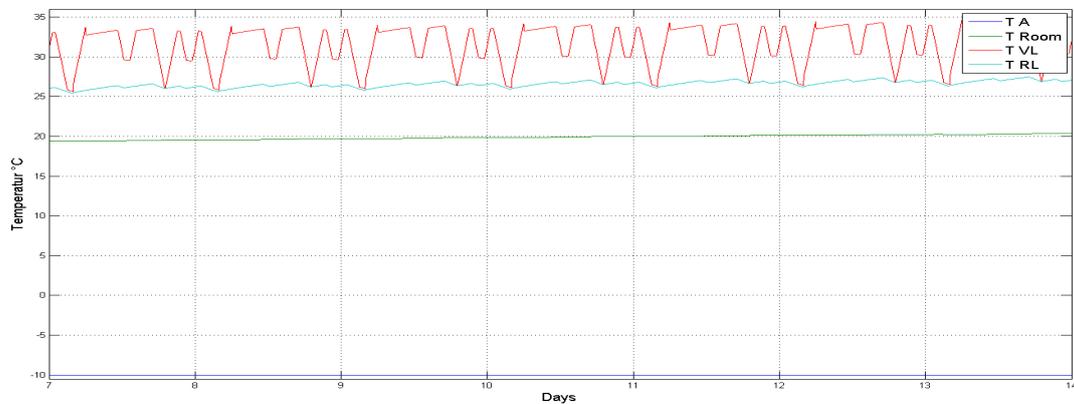


Abb. A.2: Verlauf der Raum-, Vorlauf-, Rücklauf- und Aussentemperatur während der Auslegungssimulation für das SFH 15.

Für das SFH45 und SFH100 ergaben sich ähnliche Verläufe.

## C.2 Auslegung der Kombination Ventilator-Motor für den Verdampfer

Die Auslegung des Ventilators (eigentlich Ventilator inklusive Antriebsmotor) nimmt eine entscheidende Rolle in der Effizienz der Gesamtanlage ein, weil sich die Leistung nach dem Affinitätsgesetz  $P_{el} \propto \dot{V}^3$  zum Volumenstrom verhält. Mehr dazu im Kapitel 5.2 auf Seite 15. Bei der Auslegung des Ventilators geht es in erster Linie darum, den in der Simulation einzustellende Massenstrom und die elektrische Leistungsaufnahme zu finden. Der Druckverlust und andere strömungstechnische Aspekte werden daher vernachlässigt.

Wert	Quelle
$P_{max} = 150W$	Stiebel-Eltron
$\dot{Q}_{max} = 11kW$	Stiebel-Eltron
$\rho_{Luft} = 1.16kg/m^3$	REFPROP bei 0.1MPa und 300K
$c_{Luft} = 1.0064 kJ/(kg K)$	REFPROP bei 0.1MPa und 300K
$\Delta T_{src,design} = 6.5 K$	Hochschule Luzern [4, S. 54]

Tab. A.4: Daten zur Berechnung des Luftvolumenstromes

$$\dot{m}_{Luft} = \frac{\dot{Q}_{max,WP}}{c_{Luft} * \Delta T_{src,design}} \quad (A.8)$$

$$P_{el} \propto \dot{V}^3 \propto \dot{m}^3 \quad (A.9)$$

$$P_{el} = 150W * \text{Skalierungsfaktor}^3 \quad (A.10)$$

Gebäude	SFH15	SFH45	SFH100
Skalierungsfaktoren	0.65	1.0	1.55
Maximale Heizleistung der WP [kW]	7.15	11.0	17.05
Luftmassenstrom für die max. Leistung [kg/s]	1.12	1.7	2.69
Luftvolumenstrom für die max. Leistung [ $m^3/h$ ]	3392	5218	8089
Berechnete elektrische maximale Leistungsaufnahme [W]	41.2	150	558.6
Gewählte elektrische maximale Leistungsaufnahme [W]	150	150	150

Tab. A.5: Auslegung des Ventilators

Die berechnete elektrische Leistungsaufnahme des Ventilators (inklusive Antriebsmotor) reißt wegen der Abhängigkeit  $P_{el} \propto \dot{V}^3$  stark nach oben/unten aus. Vergleicht man die berechneten Werte mit Werten aus dem Datenblatt von Stiebel-Eltron, so hat die Wärmepumpe WPL 25 I-2 mit maximal 21kW Heizleistung trotzdem nur maximal 150W Ventilatorleistung. (Die WPL 25 I-2 gehört zur gleichen Baureihe wie die WPL 15 I-2, welche die Daten für die Stützpunkte der Simulation liefert). Also hat man sich hier entschieden, die maximale Aufnahmeleistung des Ventilators auf 150W zu belassen, unabhängig des Gebäudes mit seinen Skalierungsfaktoren für die Wärmepumpe. Für das SFH 45 sind keine Folgefehler zu erwarten, da die Wärmepumpe WPL 15 I-2 sehr genau auf das Gebäude SFH 45 passt (Skalierungsfaktor nur 1.0). Also kann die optimale Einbindung der Wärmepumpe als System sicher untersucht werden. Da die Daten der Aufnahmeleistung des Ventilators auf den Informationen von Stiebel-Eltron basieren, werden auch die Simulationen für das SFH 15 und SFH 100 aussagekräftig. Aufgrund der verschiedenen Verhältnisse von Heizleistung zu Ventilatorleistung in allen Gebäudetypen könnten sich jeweils andere Regelstrategien als optimal erweisen oder aber die gleiche Regelstrategie kann unterschiedliche Auswirkungen in den verschiedenen Gebäudetypen zeigen.

## D STASCH - Hydraulische Schaltungen

Die Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen wurden im Auftrag des Bundesamtes für Energie entworfen. Die STASCH bieten eine Grundlage für die Wahl des Hydraulikschemas und die Auslegung von Wärmepumpen. Diese Schaltungen werden von vielen Herstellern genutzt und auf individuelle Bedürfnisse angepasst. Aufgrund der weiten Verbreitung und Akzeptanz orientiert sich dieses Projekt an Hydraulikschemas gemäss STASCH.

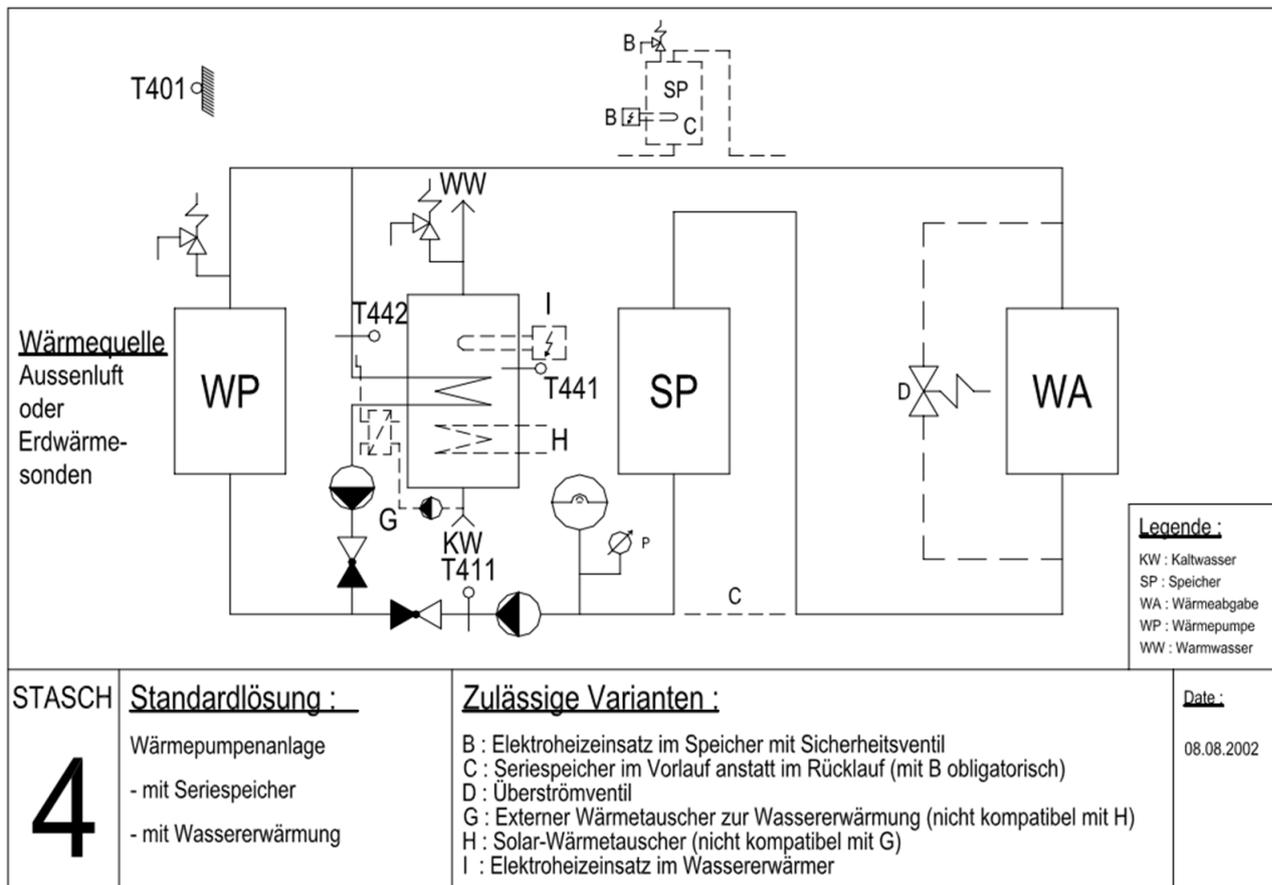


Abb. A.1: Originalschema der STASCH4 - mit Seriespeicher und Brauchwarmwasser Erwärmung [10]

Mit der Variante STASCH4 - Seriespeicher und Brauchwarmwasser Erwärmung - können vier Fälle abgedeckt werden, STASCH 1 bis STASCH 4. Um STASCH 1 und STASCH 2 zu simulieren, ist das Volumen des Seriespeichers zu schrumpfen (Falls ein zu kleines Volumen zu numerischen Problemen in der Simulation führt, ist das Volumen vernachlässigbar klein zu wählen). Für die Untersuchung von STASCH 1 und STASCH 3 kann der Brauchwarmwasserregler ausgeschaltet werden.

# Projektskizze P6, Version 2 (Update)

## Studiengang Energie- und Umwelttechnik

---

**Titel des Projektes:**

Neue Regelstrategien für leistungsgeregelte Wärmepumpen

**Auftraggeber:**

Firma	BFE (Bundesamt für Energie)
Name:	Kobler
Vorname:	Rita
Funktion	Fachspezialistin Erneuerbare Energien
Strasse	Mühlestrasse 4
PLZ / Ort	3063 Ittigen
Telefon	+41 31 323 30 14
Mobil	
E-Mail	<a href="mailto:rita.kobler@bfe.admin.ch">rita.kobler@bfe.admin.ch</a>
Homepage	<a href="http://www.bfe.admin.ch">www.bfe.admin.ch</a>
Projekt-Nr.	4523

**Betreuendes Institut FHNW:**

Hochschule	FHNW, HT
Institut	Automation
Betreuer Name, Vorname:	Prof. Dr. David Zogg
Mail	<a href="mailto:david.zogg@fhnw.ch">david.zogg@fhnw.ch</a>
Mobil	+41 056 202 77 75

**Themengebiet (in Stichworten):**

Wärmepumpen, Regelungstechnik, Gebäude-Simulationen, MATLAB/Simulink

**Projekt eignet sich für:**

5. Semester  
 6. Semester (Thesis)  
 beide Semester  
 5. Semester, im 6. S. als Thesis fortgesetzt

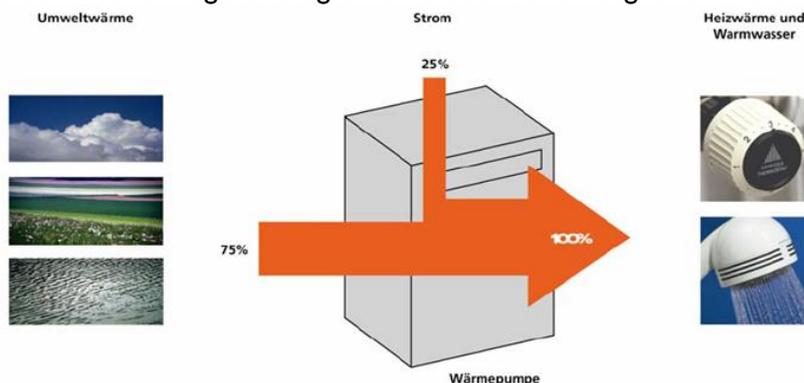
**Schwierigkeitsgrad:**

- leicht  
 mittel  
 schwer

## Beschreibung des Projektes

### Ausgangslage / Problemstellung

Wärmepumpen haben heute in der Schweiz eine weite Verbreitung. Sie haben den Vorteil, dass sie „Gratis-Energie“ aus der Umwelt beziehen, entweder aus einer Erdwärmesonde oder aus der Umgebungsluft. Um den Wärmepumpen-Betrieb energetisch weiter zu optimieren, kamen in letzter Zeit hocheffiziente, leistungsgeregelte Wärmepumpen auf dem Markt. Diese werden nicht mehr im „ein/aus“-Betrieb, sondern mit variabler Kompressor-Drehzahl betrieben. Damit ist eine kontinuierliche Leistungsanpassung an den tatsächlichen Bedarf möglich. Um allerdings im realen Gebäude einen Vorteil zu generieren, ist die optimale regelungstechnische Einbindung von zentraler Bedeutung. In diesem Projekt sollen verschiedene Regelstrategien untersucht und verglichen werden.



### Ziele / Zielzustand / Ergebnisse / Lieferobjekte für P6 (Update):

**Teilziel I** dieses Projektes ist es, eine regelungstechnisch optimale Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen zu finden. Dazu soll die Arbeit des P5 weitergeführt werden mit dem Fokus auf folgende Punkte:

- Verifizierung des Wärmepumpenmodells, Implementierung von realistischen Betriebsgrenzen
- Einbindung von Brauchwarmwasser-Erwärmung
- Optional: Untersuchung modellbasierter Regelstrategien, basierend auf Gebäudemodell und Wettervorhersage
- Systematische Untersuchung der erreichten Jahresarbeitszahl (JAZ) für die Leistungsregelung des Kompressors/Ventilators/Umwälzpumpe, für verschiedene Gebäudetypen und hydraulische Schaltungen
- Vergleich und Vorschlag für die Umsetzung

**Teilziel II** dieses Projektes ist es, eine leistungsgeregelte Wärmepumpe mit einer PV-Anlage zu kombinieren, um damit den lokalen Eigenverbrauch im Gebäude zu optimieren. Im Rahmen eines laufenden BFE-Projektes zu diesem Thema sollen folgende Punkte untersucht werden:

- Aufbau bzw. Übernahme eines Simulationsmodells mit Kombination von Wärmepumpe und PV-Anlage, Anpassung auf leistungsgeregelte Wärmepumpe
- Aufbau von klassischen Regelalgorithmen mit leistungsgeregelter Wärmepumpe zur Optimierung des Eigenverbrauchs bei hoher Energieeffizienz und Einhaltung des Raumkomforts.
- Optional: Einarbeitung und Aufbau modellbasierter, prädiktiver Regelalgorithmen zur Online-Optimierung
- Durchführung systematischer Simulationen für verschiedene Regelalgorithmen, hydraulische Schaltungen und Gebäudetypen
- Auswertung und Vergleich der Simulationsresultate bezüglich vorgegebener Kennzahlen

### Besondere Bemerkungen, Rahmenbedingungen / Geheimhaltung:

Die Resultate im Rahmen des laufenden BFE-Projektes bleiben bis zur Publikation in Form von BFE-Berichten geheim. Das Erstellen der BFE-Berichte ist nicht Teil dieses Projektes, die Resultate können aber in diese einfließen.

- Rahmenbedingungen** Der Studierende wird ca. 360h (P6) aufwenden. Das Projektteam setzt sich aus 1 Studierenden zusammen, es ist aber im Rahmen anderer laufender Studierendenprojekte zum gleichen Thema ein gegenseitiger Austausch gefordert.
- Kosten** Die Hochschule für Technik erhebt eine Gebühr von CHF 1'500.- zuzüglich MWSt. pro Projekt. Allfällige Spesen werden bei der Auftragserteilung mit den Studierenden vereinbart und vom Auftraggeber übernommen.
- Gewährleistung** Die Betreuung durch Dozierende und das Engagement der Studierenden versprechen eine hohe Wahrscheinlichkeit eines Projekterfolges. Die Hochschule für Technik bietet jedoch keine Gewähr für das Erreichen der Projektziele.
- Geheimhaltung** Die Aufgabenstellungen können vertraulich bearbeitet werden. Hierzu wird eine gegenseitige Geheimhaltungsvereinbarung unterzeichnet. Bei P6-Projekten (Thesis) findet am Abschluss eine öffentliche Ausstellung der Arbeiten statt, für die Plakate erstellt werden müssen.
- Termine** Die Projekte werden parallel zum Studium durchgeführt und sind an die Semestertermine gekoppelt.

	Einreichung	Projektstart	Abgabe	Abschlusspräsentation
Frühlingssemester	Bis KW 4	KW 9	KW 34	KW 36 - 37
Herbstsemester	Bis KW 34	KW 39	KW 3	KW 3 - 4

**Studierendenprojekte  
Energie- und Umwelttechnik**

Prof. Dr. Christoph Gossweiler christoph.gossweiler@fhnw.ch  
Studiengangleiter  
Dipl.-Ing TU Klaus Eisele klaus.eisele@fhnw.ch  
Leitung Studierendenprojekte

**Vertiefung Energiesysteme**

Inst. für Aerosol- und Sensortechnik  
Inst. für Automation  
Inst. für Thermo- u. Fluidengineering  
Inst. für Biomasse u. Ressourceneffizienz

Prof. Dr. Heinz Burtscher: Heinz.Burtscher@fhnw.ch  
Prof. Dr. Roland Anderegg Roland.Anderegg@fhnw.ch  
Prof. Dr. Beat Ribí Beat.Ribi@fhnw.ch  
Prof. Dr. Timothy Griffin Timothy.Griffin@fhnw.ch

**Vertiefung Energie in Gebäuden**

Inst. Energie am Bau

Prof. Heinrich Huber Heinrich.Huber@fhnw.ch

**Vertiefung Umwelt und Management**

Inst. für Finanzmanagement  
Kompetenzschwerpunkt Nachhaltiges Management

Prof. Dr. Carsten Peuckert Carsten.Peuckert@fhnw.ch  
Prof. Dr. Claus Daub Clausheinrich.Daub@fhnw.ch

**Adresse Studiengangleitung**

Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Technik  
Klosterzelgstr. 2  
5210 Windisch  
www.fhnw.ch/technik

# Projektauftrag

## Neue Regelstrategien für leistungsgeregelte Wärmepumpen

Studiengang	Energie- und Umwelttechnik
Vertiefungsrichtung	Energiesysteme
Student	Lukas Voramwald
Betreuer	Prof. Dr. David Zogg
Auftraggeber	BFE (Bundesamt für Energie)
Zuständig	Rita Kobler
Experte	Peter Dähler

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ausgangslage</b>	<b>1</b>
<b>2 Projektziele</b>	<b>2</b>
<b>3 Systemabgrenzung</b>	<b>3</b>
<b>4 Projektplanung</b>	<b>4</b>
<b>5 Projektrisiken</b>	<b>5</b>
<b>6 Rahmenbedingungen</b>	<b>6</b>
<b>7 Projektbudget und Kosten</b>	<b>6</b>
<b>8 Kommunikationskonzept</b>	<b>7</b>
<b>9 Vereinbarung / Unterschriften</b>	<b>8</b>

# 1 Ausgangslage

Luft/Wasser - Wärmepumpen sind ein beliebtes Mittel zur Bereitstellung von Heizenergie. Im Wärmepumpenprozess wird "Gratis-Energie" aus dem Erdreich, dem Grundwasser oder der Umgebungsluft auf ein höheres, brauchbares Temperaturniveau gepumpt. Die weite Verbreitung basiert auf der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit und dem immer grösser werdenden Umweltbewusstsein der Nutzer. Die Effizienz der L/W-WP nimmt dabei eine entscheidende Rolle ein. Das Mass für die Effizienz einer Wärmepumpe ist der COP (Coefficient of Performance). Der COP beschreibt das Verhältnis aus der Heizenergie und dem dafür nötigen elektrischen Aufwand. Jahrelang wurde die Leistungszahl gemäss dem Prüfverfahren EN 14511 optimiert. Neuste Entwicklungen tendieren dazu, nicht nur die Wärmepumpe als Gerät, sondern das Heizsystem als Ganzes zu verbessern. In diesem Zusammenhang taucht die kontinuierliche Leistungsregelung der Wärmepumpen auf dem Markt auf. Klassische Wärmepumpen werden über Zweipunktregler ein- und ausgeschaltet. Leistungsgeregelte Wärmepumpen passen die Kompressordrehzahl der geforderten Heizleistung an. Gerade mit dieser Technologie ist die regelungstechnische Einbindung in das Heizsystem von Bedeutung.

Diese Arbeit ist unter anderem eine Weiterführung der Projektarbeit P5 mit dem gleichen Titel "Neue Regelstrategien für leistungsgeregelte Wärmepumpen". Die noch offenen Punkte der vorangegangenen Projektarbeit sollen in einer ersten Phase geklärt werden. Die detaillierten Ziele der ersten Phase dieses Projektes finden Sie im Kapitel 2 in diesem Dokument.

In einer zweiten Phase werden die bisherigen Erkenntnisse mit dem laufenden BFE-Projekt "Optimierung des lokalen Eigenverbrauchs von Photovoltaik- Wärmepumpenanlagen" kombiniert. Das erarbeitete Simulationsmodell der leistungsgeregelten Wärmepumpe soll mit den Regelalgorithmen des BFE-Projektes kombiniert werden. Erwartet wird, dass die Grössen "Autarkie" und "Eigenverbrauchsverhältnis" deutlich besser ausfallen als mit einer konventionellen ein/aus-Regelung der Wärmepumpen.

## 2 Projektziele

**Teilziel I** dieses Projektes ist es, eine regelungstechnisch optimale Einbindung leistungsgeregelter Wärmepumpen zu finden. Dazu soll die Arbeit des P5 weitergeführt werden mit dem Fokus auf folgende Punkte:

- Verifizierung des Wärmepumpenmodells, Implementierung von realistischen Betriebsgrenzen und Berücksichtigung variierender bzw. kleiner Massenströme (speziell auf der Quellenseite)
- Einbindung von Brauchwarmwasser-Erwärmung
- Optional: Untersuchung modellbasierter Regelstrategien, basierend auf Gebäudemodell und Wettervorhersage
- Systematische Untersuchung der erreichten Jahresarbeitszahl (JAZ) für die Leistungsregelung des Kompressors/Ventilators/Umwälzpumpe, für verschiedene Gebäudetypen und hydraulische Schaltungen. Dazu ist die Durchführung von Jahressimulationen notwendig.
- Vergleich und Vorschlag für die Umsetzung

**Teilziel II** dieses Projektes ist es, eine leistungsgeregelte Wärmepumpe mit einer PV-Anlage zu kombinieren, um damit den lokalen Eigenverbrauch im Gebäude zu optimieren. Im Rahmen eines laufenden BFE-Projektes zu diesem Thema sollen folgende Punkte untersucht werden:

- Aufbau bzw. Übernahme eines Simulationsmodells mit Kombination von Wärmepumpe und PV-Anlage, Anpassung auf leistungsgeregelte Wärmepumpe
- Aufbau von klassischen Regelalgorithmen mit leistungsgeregelter Wärmepumpe zur Optimierung des Eigenverbrauchs bei hoher Energieeffizienz und Einhaltung des Raumkomforts.
- Optional: Einarbeitung und Aufbau modellbasierter, prädiktiver Regelalgorithmen zur Online-Optimierung
- Durchführung systematischer Simulationen für verschiedene Regelalgorithmen, hydraulische Schaltungen und Gebäudetypen
- Auswertung und Vergleich der Simulationsergebnisse bezüglich vorgegebener Kennzahlen. Dabei ist die Abstimmung mit Remo Waser essentiell.

### 3 Systemabgrenzung

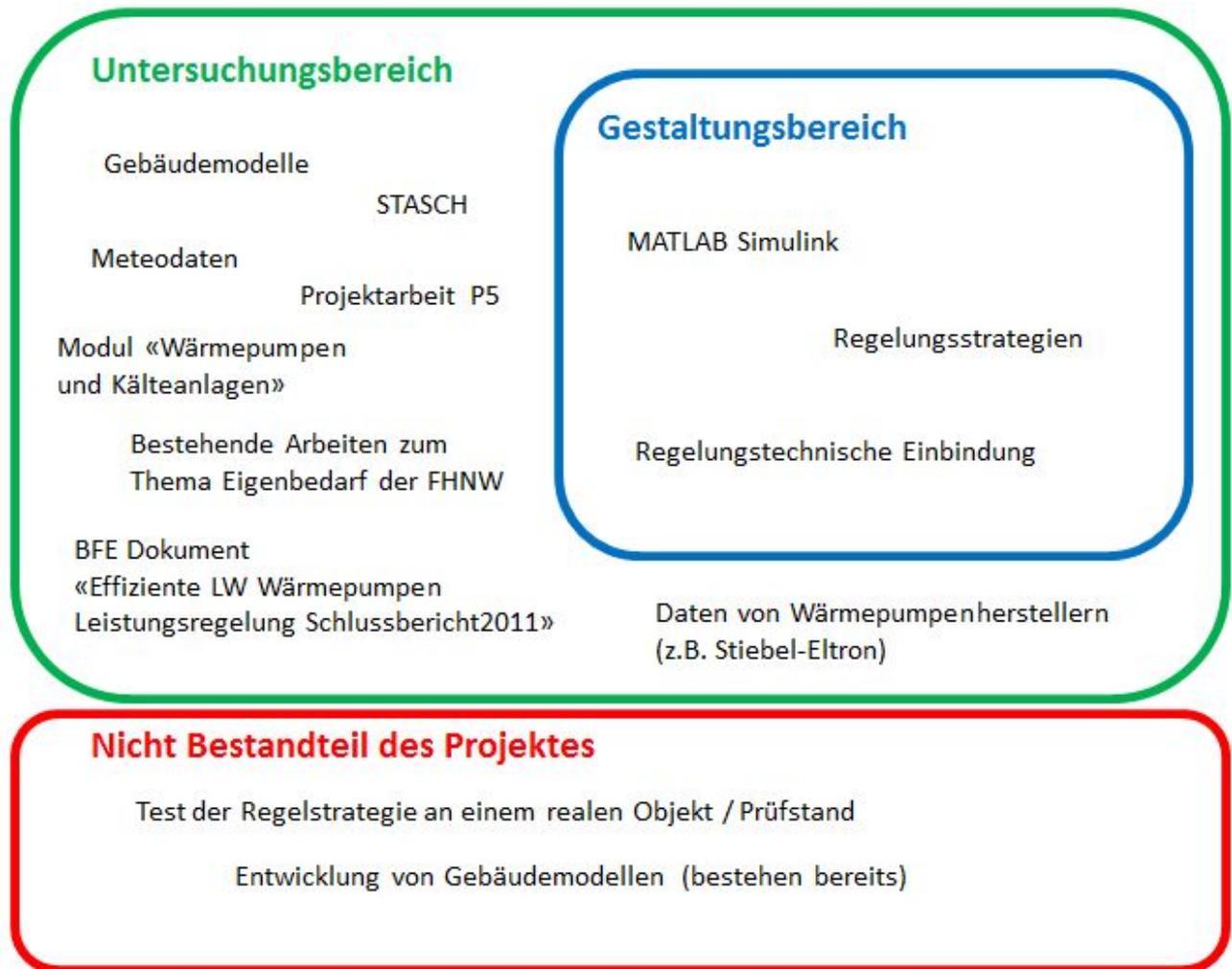


Abb. 1: Gestaltungs- und Untersuchungsbereich sowie nicht Bestandteil des Projektes im Überblick

## 4 Projektplanung

Phasen	Arbeitspakete	März	April	Mai	Juni	Juli	August
		24.2.-2.3. 3.3.-9.3. 10.3.-16.3. 17.3.-23.3. 24.3.-30.3. 31.3.-6.4. 7.4.-13.4. 14.4.-20.4. 21.4.-27.4. 28.4.-4.5. 5.5.-11.5. 12.5.-18.5. 19.5.-25.5. 26.5.-1.6. 2.6.-8.6. 9.6.-15.6. 16.6.-22.6. 23.6.-29.6. 30.6.-6.7. 7.7.-13.7. 14.7.-20.7. 21.7.-27.7. 28.7.-3.8. 4.8.-10.8. 11.8.-14.8.					
<b>Diverses</b>	Sitzungen Traktandenliste Protokolle						
<b>Auftragsklärung</b>	Projektauftrag	x x x x					
<b>Analyse</b>							
	<b>Teilziele 1</b>						
	STASCH 2, 4, 6	x x x x					
	Optimierung des Wärmepumpenmodells	x x x x					
	Simulationen		x x x x				
	Auswertung und Beurteilung			x			
	<b>Teilziele 2</b>						
	Analyse der Vorgängerarbeit von R. Waser				x		
	Aufbau des Simulationsmodells				x x x x x		
	Simulationen				x x x x	x x	
	Auswertung und Beurteilung					x x	x x
<b>Umsetzung</b>							
	Bericht schreiben und Reserve						x x x
<b>Abschluss</b>							
	Abschlussplanung						x
	Plakat						x
	Abgabe Projektunterlagen						14.8.2014 um 12:00
	Plakatausstellung						14.8.2014 um 16:00
	Präsentation						KW 36 oder 37

Tab. 1: Projektplanung der Bachelorthesis - Stand 17.3.2014

Die Projektplanung ist sehr grob und wird jeweils in den einzelnen Arbeitspaketen verfeinert.

In den folgenden Zeitabschnitten wird ausserhalb der Schulzeit an der Projektarbeit gearbeitet:

- 12. - 18. Mai 2014 → Projektwoche (40h)
- 14. Juli - 14. August 2014 → Vollzeitbereich der Projektarbeit (5 Wochen à 40h = 200h)
- 30. Juni - 13. Juli 2014 → Modulschlussprüfungen (MSP schränken die Projektarbeit nicht ein)

## 5 Projektrisiken

Nr.	Risiken	Ursache	Indikator	Eintrittswahrscheinlichkeit	Schadenshöhe	Risiko	Risiko Klasse	Präventivmassnahmen	Gegenmassnahmen
1	Aufgabenstellung nicht verstanden oder unterschätzt	Unzureichende Auseinandersetzung mit der Aufgabenstellung	Verschiedene Ansichten der Projektmitglieder zur Aufgabenstellung.	2	4	8	<b>B</b>	Aufgabenstellung mit Projektmitglieder in einer frühen Phase offen diskutieren und Unklarheiten beseitigen.	Sitzung mit dem Coach und Auftraggeber zur Klärung der Aufgabenstellung durchführen
2	Keine / schlechte Projektergebnisse	Probleme mit der Simulation	Die Simulation läuft nicht wunschgemäss	2	3	6	<b>B</b>	Früh mit Simulationen und Verifizierungen beginnen / Absprachen mit dem Coach, Kollegen oder anderen Experten	Sitzung mit dem Coach und weitere Versuche starten
3	Qualitätsansprüche und Erwartungen können nicht erfüllt werden	Das Simulationsmodell kann nicht weiter verfeinert werden	Die Simulationsergebnisse haben unrealistische Ausreisser	2	5	10	<b>A</b>	Früh mit Simulationen und Verifizierungen beginnen / Kontakt zu R. Waser und R. Dott aufnehmen	Sitzung mit dem Coach, weitere Versuche starten oder mit eigenen Modellen aus den Ansätzen im Unterricht arbeiten
4	Datenverlust	Keine Datensicherung eingerichtet	Erstellte Daten fehlen	1	5	5	<b>C</b>	Alle Projektdaten werden auf der lokalen Festplatte des Studenten und auf der Plattform Dropbox gespeichert	keine
5	Erstellung des Dossiers benötigen am Ende des Projektes zu viel Zeit.	Zu später Beginn der Erstellung des Dossiers; Perfektionismus	Gegen Ende des Projektes ist ein hoher Aufwand für die Dokumentationen aufzubringen.	3	4	12	<b>A</b>	Dokumentation stets aktualisieren; dauernde Kontrolle über den Stand des Berichtes; Reservezeit	Nachtschichten einlegen
6	Planungsfehler	Unzureichende Planung oder zu kurze Planungsphase / Informationen noch nicht im Detail bekannt	Terminplan kann nicht eingehalten werden	2	5	10	<b>A</b>	Seriöse Planung / sauberer Terminplan / laufende Detailplanung der groben Arbeitspakete	Sitzung mit den Projektmitgliedern einberufen und zusammen Prioritäten setzen
7	Ziel kann nicht erfüllt werden	Projektmitarbeiter hat keine Zeit oder ist überfordert.	Ratlosigkeit / Zeitmangel	1	5	5	<b>C</b>	Bei Ratlosigkeit / Zeitmangel sofort mit dem Coach kontakt aufnehmen	Prioritäten werden geändert; Mehr Einsatz wird von den Projektmitarbeitenden verlangt
8	Personalausfall	Krankheit, Unfall, etc.	Abwesenheit	2	2	4	<b>C</b>	Terminplanung anpassen, Reserven einplanen	Reservezeit nutzen

Tab. 2: Risikoanalyse der Bachelorthesis - Stand 17.3.2014

### Legende

- A → Risiko >9 Punkte → hohe Eintrittswahrscheinlichkeit und hohe Tragweite
- B → Risiko 6..9 Punkte → mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit und mittlere Tragweite
- C → Risiko <5 Punkte → geringe Eintrittswahrscheinlichkeit und geringe Tragweite
- Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit (1..3) \* Schadensausmass (1..5)

## 6 Rahmenbedingungen

Der zeitliche Rahmen dieser Projektarbeit liefert das Modul. Eine erfolgreiche Durchführung des Projektes wird mit 12 ETCS honoriert, was einem Arbeitsaufwand von 360 Stunden entspricht.

- Die Termine werden gemäss der Projektplanung eingehalten. Das Projekt wird spätestens am 14. August um 12:00 Uhr abgeschlossen.
- *Seitens der Hochschule werden Studierendenprojekte von Projektcoachs begleitet und diese sind für die Studierenden die primären Ansprechpersonen. Aus Sicht der Studierenden gilt für unterstützende Informationen das Holprinzip. Die Projektcoachs sind Angestellte der FHNW, deren Aufgaben in der fachliche und methodischen Begleitung der Projekte bestehen. Die Coachs überprüfen im Rahmen der Möglichkeiten das fachlich korrekte Projektergebnis (Qualitätskontrolle). Es ist nicht die Aufgabe der Coachs die Projektleitung oder Projektarbeitspakete zu übernehmen. Die Aufgabe der Coachs ist es, bei Abweichungen des Projektes korrigierend einzugreifen, so dass die Projekte aus Sicht des Auftraggebers erfolgreich ablaufen.<sup>1</sup>*
- Die Bewertung des Projektes erfolgt durch den Projektcoach gemäss dem Bewertungsbogen P5 bzw. P6 auf dem Active Directory.  
Benotet werden:
  - das Projektergebnis
  - die Lieferobjekte (Projektauftrag, Poster, Abschlussbericht, Präsentationen)
  - die Ergebnispräsentation
  - der Prozess und die Abwicklung des Projekts

## 7 Projektbudget und Kosten

Die Hochschule für Technik erhebt dem Bundesamt für Energie eine Gebühr von CHF 1500.- zuzüglich MWSt. für den ersten Teil des Projektes. Der zweite Teil läuft unter dem Forschungsprojekt zur Optimierung des Eigenbedarfs. Entgegen dem Dokument "Leitfaden\_EUT\_P5\_P6" werden die Spesen von der Fachhochschule bzw. der Studiengangleitung getragen. Lukas Voramwald führt eine fortlaufende Spesenrechnung, in welche der Projektcoach jederzeit Einblick hat.

---

<sup>1</sup>Zitat aus dem Dokument "Leitfaden\_EUT\_P5\_P6"

## 8 Kommunikationskonzept

Dank der geringen Projektgrösse bedarf dieses Projekt keinem aufwändigem Kommunikationskonzept. Zur Informationsbeschaffung gehen wir persönlich, per Email oder mittels Telefon aufeinander zu. Sitzungen finden nach einer Schriftlichen Einladung statt und werden in einem Protokoll festgehalten und reflektiert. Der gesamte Projektordner befindet sich auf der Plattform "Dropbox". Dadurch sind die Daten gesichert und falls erwünscht, kann dem Projektcoach, wie auch den anderen beteiligten Personen, Zugriff gewährt werden.

Kontakte der im Projekt beteiligten Personen:

### **Auftraggeber**

Rita Kobler  
Bundesamt für Energie  
Fachspezialistin Erneuerbare Energien  
Mühlestrasse 4  
3063 Ittigen  
rita.kobler@bfe.admin.ch  
+41 31 323 30 14  
www.bfe.admin.ch

### **Experte**

Peter Dähler  
ABB Schweiz AG  
Austrasse  
5300 Turgi  
  
peter.daehler@ch.abb.com  
+41 56 284 24 32 (P)  
+41 58 585 00 00 (ABB Turgi)

### **Projektcoach**

Prof. Dr. David Zogg  
Hochschule für Technik  
Institut für Automation  
Klosterzelgstrasse 2  
5210 Windisch  
david.zogg@fhnw.ch  
+41 56 202 77 75 (direkt)  
+41 56 202 77 00 (zentrale)

### **Student**

Lukas Voramwald  
Knubelstrasse 34  
5726 Unterkulm  
  
lukas.voramwald@students.fhnw.ch  
+41 79 283 41 45

## 9 Vereinbarung / Unterschriften

Mit der Unterschrift bestätigen die Unterzeichner das Dokument gelesen und den Inhalt verstanden zu haben. Des Weiteren bestätigen die Unterzeichnenden mit dem Inhalt der Projektvereinbarung einverstanden zu sein.

Die Unterzeichnenden:

### **Auftraggeber**

Frau Rita Kobler, BFE

---

Ort / Datum / Unterschrift

### **Projektcoach**

David Zogg, FHNW

---

Ort / Datum / Unterschrift

### **Experte**

Peter Dähler, ABB

---

Ort / Datum / Unterschrift

### **Student**

Lukas Voramwald, Student in Energie- und Umwelttechnik

---

Ort / Datum / Unterschrift