

Master-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	Bewertungsverfahren für den Vergleich von Energiemanagementsystemen – Umsetzung des Bewertungsverfahrens
Diplomandin/Diplomand	Gubler, Carina
Master-Studiengang	Master in Engineering
Semester	HS20
Dozentin/Dozent	Steiger, Olivier
Expertin/Experte	Stalder, Martin

Abstract Deutsch

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Umsetzung eines Bewertungsverfahrens für den Vergleich von Energiemanagementsystemen zur Eigenverbrauchsoptimierung (EMS). Sie ist der dritte und letzte Teil meiner Masterarbeit, in der dieses Bewertungsverfahren entwickelt wurde.

Ein EMS optimiert den Eigenverbrauch, indem es Verbraucher dann einschaltet, wenn die PV-Anlage mehr Energie produziert als das Gebäude verbraucht. Umgekehrt schaltet das EMS Verbraucher aus, wenn Energie vom Netzbetreiber gekauft werden muss.

Der Markt für EMS ist in der Schweiz noch jung und verändert sich laufend. Das macht es schwierig den Überblick zu behalten. Mit dem Bewertungsverfahren sollen die EMS unter jeweils gleichen und reproduzierbaren Bedingungen geprüft werden können. Die Testergebnisse sollen die Auswahl eines EMS erleichtern.

Das Bewertungsverfahren beschränkt sich auf EMS, die für den Einsatz in Einfamilienhäusern vorgesehen sind. Geprüft wird, wie hoch der Eigenverbrauchsanteil und der Autarkiegrad ausfallen. Die Energiekosten werden ebenfalls berechnet.

In der Arbeit werden die Modelle der Verbraucher und der PV-Produktion zuerst theoretisch beschrieben und dann in der Simulationssoftware Simulink umgesetzt. Das EMS wird als «Hardware in the Loop» in den Prüfaufbau eingebaut.

Bei der Umsetzung der Schnittstellen S0 und UDP sind einige Probleme aufgetaucht, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr behoben werden konnten.

Mit dem Referenzablauf (Simulation ohne EMS) konnte das Bewertungsverfahren trotzdem getestet werden. Darin konnten auch alle Modelle umgesetzt werden.

Die Resultate lassen darauf schliessen, dass dieses Bewertungsverfahren funktioniert und dass die EMS so geprüft und bewertet werden können.

Abstract Englisch

This paper presents the implementation of an assessment method for the comparison of energy management systems for self-consumption optimization (EMS). It is the last of three parts in which this assessment method was developed.

An EMS optimizes self-consumption by switching on consumers when the PV system produces more energy than the building consumes or switches them off when energy has to be purchased from the network operator. The EMS market in Switzerland is still young and constantly changing. That makes it difficult to keep track of things. This evaluation procedure allows testing of various EMS under the same and reproducible conditions. This simplifies the selection of the most suited EMS for the PV system.

The assessment method is limited to EMS, which are intended for use in single-family homes. The method checks the self-consumption share and degree of self-sufficiency. Furthermore, it calculates the energy costs. This thesis describes the consumer models and PV production theoretically. In a later step these models are implemented in a simulation using the software Simulink. The EMS is built into the test setup as «hardware in the loop».

In the implementation of the interfaces S0 and UDP, problems occurred which could not be solved before the deadline.

The reference process (simulation without EMS) could be used to test the assessment method. Furthermore, all models could be implemented.

The result suggests that this assessment method works, and the EMS can be tested and assessed using this method.

Ort, Datum

Nebikon, 22. Januar 2021

© Carina Gubler, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	6
Begriffserklärungen	8
1. Einleitung	11
1.1. Ausgangslage.....	11
1.2. Ziel der Arbeit.....	12
1.3. Aufbau der Arbeit	12
2. Grundlagen	14
2.1. EMS allgemein.....	14
2.1.1. Komponenten eines EMS.....	15
2.1.2. Funktion eines EMS.....	17
2.2. Abgrenzungen.....	19
3. Bewertungsverfahren	21
3.1. Prüfaufbau	21
3.2. Modelle.....	22
3.2.1. EFH	23
3.2.2. Bewohner	24
3.2.3. PV-Anlage	25
3.2.4. Allgemeine Verbraucher	28
3.2.5. Wärmepumpe mit Warmwasser- und Energiespeicher	29
3.2.6. Geschirrspüler	35
3.2.7. Waschmaschine	36
3.2.8. Tumbler	37
3.2.9. Ladestation Elektroauto.....	38
3.3. Prüfmethode	41
3.4. Referenzablauf.....	42
3.5. Prüfdauer.....	42
3.6. Bewertung.....	43
4. Prüfaufbau	50

4.1. Schnittstellen	51
4.1.1. S0	51
4.1.2. RS485	52
4.1.3. UDP	52
4.2. Hardware	52
4.2.1. I/O Karte	52
4.2.2. Schaltrelais.....	53
4.2.3. Halbleiterrelais.....	54
4.3. Software	55
4.3.1. Software für Meteodaten.....	55
4.3.2. Auswahl Simulationssoftware.....	55
4.3.3. Simulations- und Echtzeit.....	56
4.3.4. Aufbau Simulation	56
4.3.5. Umsetzung Schnittstellen.....	65
5. Ergebnisse	69
5.1. Tests mit EMS.....	70
5.1.1. Auswahl EMS.....	70
5.1.2. Tests der Schnittstellen.....	71
5.1.3. Test Bewertungsverfahren.....	75
5.2. Referenzablauf	76
5.2.1. Verifizierung Modelle.....	76
5.2.2. Resultate Referenzablauf.....	89
6. Schlusswort.....	97
6.1. Rückblick.....	97
6.2. Ausblick.....	99
Abbildungsverzeichnis	101
Tabellenverzeichnis	105
Literatur- und Quellenverzeichnis	107
Anhang	112
Anhang I: Variantenübersicht.....	112

Anhang 2: Modelle des Bewertungsverfahrens	113
EFH.....	113
Bewohner.....	114
PV-Anlage.....	115
Allgemeine Verbraucher.....	118
Wärmepumpe mit Warmwasser- und Energiespeicher.....	119
Geschirrspüler.....	122
Waschmaschine.....	124
Tumbler.....	126
Ladestation Elektroauto.....	128
Anhang 3: Meteodaten	131

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (Alternating Current)
AG	Autarkiegrad
BH	Bodenheizung
CCCV	Konstantstrom, Konstantspannung (Constant Current, Constant Voltage)
DC	Gleichstrom (Direct Current)
EBF	Energiebezugsfläche
EFH	Einfamilienhaus
EG	Erdgeschoss
EMS	Energiemanagementsystem
ES	Energiespeicher
EVA	Eigenverbrauchsanteil
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GEE	Gebäude-Elektroengineering
HiL	Hardware in the Loop
HT	Hochtarif
I/O	Eingänge / Ausgänge (Inputs / Outputs)
KW	Kaltwasser
MFH	Mehrfamilienhaus
NT	Niedertarif
NOCT	Nennbetriebstemperatur der Zelle (Nominal Operating Cell Temperature)
OG	Obergeschoss
PV	Photovoltaik
RL	Rücklauf
SG	Smart Grid
SOC	Ladezustand (State of Charge)
STC	Standardtestbedingungen (Standard Test Conditions)
UDP	User Datagram Protocol
UG	Untergeschoss

VL	Vorlauf
VM	Vertiefungsmodul (auch Vertiefungsarbeit)
WLTP	weltweit einheitliches Leichtfahrzeuge-Testverfahren (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure)
WP	Wärmepumpe
WR	Wechselrichter
WW	Warmwasser
WWS	Warmwasserspeicher
ZEV	Zusammenschluss zum Eigenverbrauch

Begriffserklärungen

Autarkie

Autarkie bedeutet, dass ein Objekt sich selbst mit der benötigten Energie versorgen kann und nicht abhängig ist von einem Lieferanten. Das heisst, dass die Produktion und der Verbrauch aufeinander abgestimmt sein müssen. Das kann mit Hilfe eines Speichers unterstützt werden [1].

Autarkiegrad

Der Autarkiegrad ist der Anteil der selbst verbrauchten Energie vom Gesamtverbrauch. Je grösser der Autarkiegrad ist, desto weniger Energie wird vom Netz bezogen [2].

Benchmark

Der Benchmark ist ein Vergleichsmassstab. Dieser Wert wird zum Vergleich von Leistungen verwendet [3].

Benchmarking wird in vielen Bereichen angewendet. Es können damit zum Beispiel Prozesse oder Produkte miteinander verglichen werden. Dies kann innerhalb eines Unternehmens oder über mehrere Unternehmen hinweg stattfinden [4].

Eigenverbrauch

Der Eigenverbrauch umfasst den Teil der selbst produzierten Energie, der das Gebäude bzw. Areal nicht verlässt, d.h. nicht ins öffentliche Netz eingespeist wird. Sei dies, weil die Energie sogleich verbraucht wird oder weil sie gespeichert wird [5].

Eigenverbrauchsanteil

Der Eigenverbrauchsanteil ist der Anteil der selbst verbrauchten Energie vom selbst erzeugten Strom. Je grösser dieser Anteil ist, desto weniger selbst erzeugter Strom wird ins Netz zurückgespielen [2].

Eigenverbrauchsoptimierung

Die Eigenverbrauchsoptimierung hat zum Ziel, möglichst viel der selbst erzeugten Energie selbst zu nutzen. Das heisst, es soll ein möglichst hoher Eigenverbrauchsanteil erreicht werden.

Einschaltschwellwert

Der Einschaltswellwert wird in den Einstellungen des EMS für jeden Verbraucher separat festgelegt. Es ist der minimale Wert an Überproduktion, der erreicht werden muss, damit das EMS den Verbraucher einschaltet. Der Schwellwert wird anhand der Leistung des Verbrauchers definiert.

Energieerzeugungsanlage

Mit einer Energieerzeugungsanlage kann Energie erzeugt werden, dies meist in Form von Elektrizität. Dazu zählen beispielsweise Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen, Wasserkraftanlagen, Blockheizkraftwerke oder Diesel-Notstromanlagen [6].

Energiemanagement

Das Energiemanagement umfasst verschiedene Massnahmen, mit denen der Energiebezug und die Energieerzeugung eines Objektes geplant und umgesetzt werden können. Dabei geht es darum, den Energiebezug zu senken oder die erzeugte Energie optimal zu nutzen und gleichzeitig die geforderte Leistung sicherzustellen [7] [8].

Energiemanagementsystem (EMS)

Das Energiemanagementsystem erfasst die Energieströme eines Objektes systematisch und steuert anhand dieser Daten die Speicher und Verbraucher automatisch [9]. In der Vertiefungsarbeit 1 wurden Energiemanagementsysteme ausführlich behandelt [10].

Energiemonitoring

Beim Energiemonitoring werden Messdaten, Informationen und Betriebszuständen lückenlos aufgezeichnet. Die erfassten Informationen werden langfristig in einer Datenbank abgespeichert. Sie können visualisiert und ausgewertet werden [11].

Mindestlaufzeit

Die Mindestlaufzeit wird in den Einstellungen des EMS für jeden Verbraucher separat festgelegt. Es ist die minimale Zeitspanne, während der ein Verbraucher eingeschaltet sein muss. Dies ist zum Beispiel bei der Waschmaschine wichtig, damit sie ihr Programm beenden kann.

SG Ready

SG Ready ist ein Label des deutschen Bundesverband Wärmepumpe, das Wärmepumpen erhalten, wenn sie für die Einbindung in ein intelligentes Stromnetz (SG = Smart Grid) vorbereitet sind. Die Regelung der Wärmepumpe muss vier Betriebszustände abdecken. Die Ansteuerung dieser vier Zustände erfolgt über zwei ansteuerbare Schaltkontakte (Kontakt 1:Kontakt 2).

Betriebszustand 1 (1:0):	EVU-Sperre (EVU = Energieversorgungsunternehmen)
Betriebszustand 2 (0:0):	Normalbetrieb
Betriebszustand 3 (0:1):	Einschaltempfehlung für Betrieb mit erhöhten Werten für Raumheizung und Warmwasserbereitung
Betriebszustand 4 (1:1):	Einschaltbefehl

Für die Eigenverbrauchsoptimierung werden meistens nur die Betriebszustände 2 und 3 verwendet. Bei Überproduktion wird der Schaltkontakt 2 eingeschaltet und somit Zustand 3 aktiviert [12].

Visualisierung

Die Visualisierung ist die optische Darstellung der im Energiemonitoring erfassten Informationen. Meistens werden dafür Diagramme genutzt. Dies kann aber auch mit einer farbigen Lichtanzeige gemacht werden (z. B. grünes Licht bei Überproduktion der PV-Anlage).

Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV)

Wenn es am Ort der Produktion mehrere Endverbraucher gibt, beispielsweise in einem Mehrfamilienhaus (MFH), können sie sich zum gemeinsamen Eigenverbrauch zusammenschliessen. Sie erhalten dann einen gemeinsamen Netzanschluss vom Verteilnetzbetreiber und müssen den Energieverbrauch selbstständig untereinander abrechnen. Der Zusammenschluss wird vertraglich geregelt [5].

I. Einleitung

I.1. Ausgangslage

Ein Besitzer eines Einfamilienhauses (EFH) möchte seine Photovoltaikanlage (kurz PV-Anlage) möglichst wirtschaftlich betreiben. Die selbst produzierte Energie darf er seit 2014 selber in seinem Haus verbrauchen [13] [5]. Das kostet ihn zwischen 10 und 20 Rp/kWh (Investition- und Betriebskosten PV-Anlage auf eine Lebensdauer von 25 – 30 Jahren) [2]. Die überschüssige Energie kann er ins öffentliche Stromnetz zurückspeisen. Der Netzbetreiber zahlt ihm dafür aber nur 6 bis 13 Rp/kWh [14].

Produziert die PV-Anlage zu wenig Energie, so kann der EFH-Besitzer zusätzliche Energie vom öffentlichen Stromnetz beziehen. Dafür zahlt er dann aber zwischen 15 und 30 Rp/kWh [15] [16].

Für den EFH-Besitzer ist es deshalb am günstigsten, wenn er seinen Energiebedarf möglichst mit der selbst produzierten Energie abdecken kann, mit anderen Worten, wenn er seinen Eigenverbrauch optimiert.

Die EFH-Bewohner können durch ihr Verhalten den Eigenverbrauch beeinflussen, indem sie die Verbraucher, z. B. die Waschmaschine, dann einschalten, wenn die PV-Anlage genügend Energie produziert. Dafür müsste aber ständig jemand zu Hause sein, die Produktion der PV-Anlage überwachen und die Verbraucher dann entsprechend einschalten.

Um den Bewohnern diesen Aufwand abzunehmen, gibt es Systeme, die das automatisch machen. Diese werden Energiemanagementsysteme oder kurz EMS genannt.

Das EMS misst die PV-Produktion und den Gesamtverbrauch des EFH und vergleicht die beiden Werte miteinander. Wenn die PV-Anlage mehr Energie produziert als verbraucht wird, dann schaltet das EMS Verbraucher ein oder erhöht deren Leistung (z. B. Wärmepumpe). Umgekehrt schaltet das EMS Verbraucher aus oder drosselt ihre Leistung, wenn das EFH mehr Energie verbraucht als produziert wird.

Das EMS bewirkt damit, dass weniger Energie ins Netz zurückgespielen werden muss bzw. dass weniger Energie vom Netzbetreiber gekauft werden muss. Dadurch wird der Eigenverbrauch erhöht und die PV-Anlage wird wirtschaftlicher betrieben.

In dieser Master-Thesis wird nur das Szenario EFH betrachtet. EMS können aber auch bei Mehrfamilienhäusern (MFH), Arealen oder Gewerbenutzungen eingesetzt werden.

Bei einem MFH kann das EMS bei einem Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) nützlich sein. Beziehen mehrere Parteien Energie von der gleichen PV-Anlage, so können sie sich zu einer Eigenverbrauchsgemeinschaft zusammenschliessen. Dieser Zusammenschluss zum Eigenverbrauch ist seit der Änderung des Energiegesetzes per 01. Januar 2018 erlaubt [5]. Das EMS bietet Unterstützung bei der Abrechnung der PV-Energie.

1.2. Ziel der Arbeit

Der Markt für EMS ist noch neu und wächst laufend. Es gibt zahlreiche Anbieter und Varianten von EMS. Die EMS haben unterschiedliche Funktionen und Schnittstellen und unterstützen verschiedene Produkttypen (z. B. Typen von Wechselrichter). Die grosse Auswahl und Diversität macht es schwierig, den Überblick zu behalten und das optimale System für ein Projekt auszuwählen.

EnergieSchweiz hat 2017 das Handbuch «Solarstrom Eigenverbrauch optimieren» herausgegeben. Darin wird das Thema Eigenverbrauch erläutert und verschiedene EMS mit den entsprechenden Herstellerangaben werden aufgelistet [2].

Im Juni 2020 hat Energie Zukunft Schweiz eine Marktübersicht von EMS veröffentlicht [17]. Auch hier werden verschiedene EMS mit den Herstellerangaben aufgeführt.

Diese zwei Publikationen helfen zwar einen Überblick über das Angebot an EMS zu erhalten, sie sagen aber nichts darüber aus, wie gut ein EMS ist. Dafür sind praktische Tests, die unter jeweils gleichen Bedingungen stattfinden und reproduzierbar sind, notwendig.

In dieser Masterarbeit wird ein generisches Bewertungsverfahren entwickelt, das es ermöglicht, die verschiedenen EMS objektiv miteinander zu vergleichen und eine Aussage darüber zu machen, wie gut ein EMS ist. Es soll ein Hilfsmittel geschaffen werden, mit dem man das optimale System für ein Projekt auswählen kann. Die Zielgruppe von diesem Hilfsmittel sind all diejenigen, die ein EMS planen, verkaufen oder installieren, wie z. B. Elektriker, Elektroplaner und -ingenieure sowie fachkundige und interessierte Bauherren. Für Labels könnte das Bewertungsverfahren interessant sein, um Vorgaben für die Vergabe einer Zertifizierung festlegen zu können.

Es ist nicht das Ziel der Arbeit, möglichst viele EMS zu prüfen, sondern das Bewertungsverfahren zu entwickeln, umzusetzen und mit einem bis zwei EMS auszutesten. Danach sollte eine Abschätzung möglich sein, ob die Prüfung von EMS mit diesem Bewertungsverfahren funktioniert.

1.3. Aufbau der Arbeit

Die Masterarbeit besteht aus zwei Vertiefungsarbeiten (VM) und der Master-Thesis. Die Abbildung 1 zeigt den zeitlichen Ablauf der drei Arbeiten. Die beiden Vertiefungsarbeiten wurden bereits abgeschlossen. Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um die Master-Thesis.

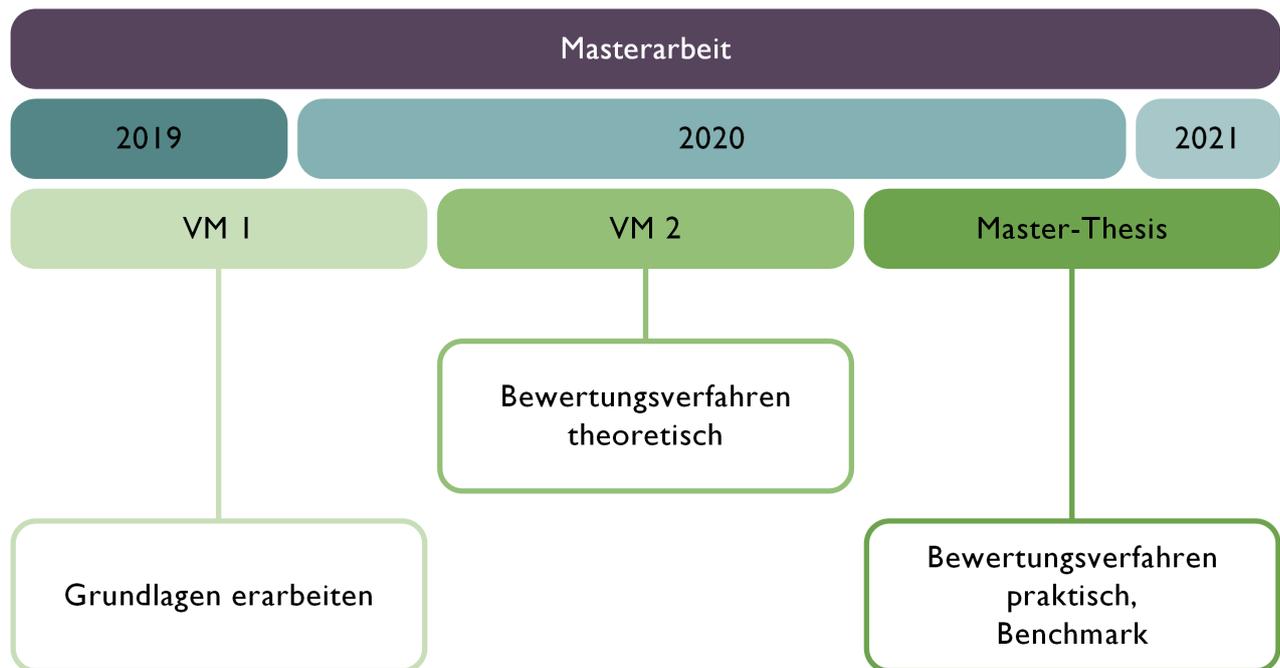


Abbildung 1: Ablauf Masterarbeit

Die Masterarbeit setzt sich aus zwei Vertiefungsarbeiten und der Master-Thesis zusammen. Jede Arbeit dauert ein Semester. Quelle: Hochschule Luzern

In der ersten Vertiefungsarbeit wurden die Grundlagen zu den EMS erarbeitet. Es wurde aufgezeigt, aus welchen Komponenten ein EMS besteht und welche Funktionen es hat. Weiter wurden fünf EMS ausgewählt und genauer untersucht. Die fünf Hersteller der EMS wurden befragt, die Unterlagen zu den EMS wurden gelesen und die EMS wurden in Betrieb genommen und bedient. Aus den daraus gewonnenen Informationen wurde ein umfangreiches Datenblatt erstellt. Die Vertiefungsarbeit 1 hat aufgezeigt, wie unterschiedlich die EMS sein können und wie schwer sie zu vergleichen sind.

In der zweiten Vertiefungsarbeit wurde das Bewertungsverfahren theoretisch ausgearbeitet und die Rahmenbedingungen wurden bestimmt. Es wurde festgelegt, wie und wie lange das EMS geprüft wird und wie es bewertet wird. Weiter wurde der Prüfaufbau beschrieben. Es wurde bestimmt welche Komponenten notwendig sind und welche davon simuliert werden und welche real aufgebaut werden. Für alle Komponenten, die simuliert werden, wurden mathematische Modelle erstellt, anhand derer dann die Simulation erstellt werden kann. Für das EMS wurden die Einstellparameter definiert. Schlussendlich wurde noch geprüft, ob die Umsetzung mit den geforderten Schnittstellen möglich ist.

In der vorliegenden Master-Thesis wird das Bewertungsverfahren praktisch umgesetzt. Im Kapitel 2 werden die Grundlagen zu dieser Arbeit beschrieben. Die Komponenten und die Funktion eines EMS, welche in der Vertiefungsarbeit 1 beschrieben wurden, werden nochmals erläutert. Zudem werden in diesem Kapitel die Grenzen der Arbeit abgesteckt. Im Kapitel 3 wird die Methode des Bewertungsverfahrens beschrieben. Im Kapitel 4 wird die Umsetzung des Bewertungsverfahrens erläutert. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse aufgezeigt und in Kapitel 6 wird ein Rück- und Ausblick gemacht.

2. Grundlagen

In Kapitel 2 werden die Grundlagen zu EMS ganz allgemein beschrieben. Es wird aufgezeigt, aus welchen Komponenten ein EMS besteht und welche Funktionen es hat.

In der Vertiefungsarbeit 1 wurden die Grundlagen zu EMS ausführlich erarbeitet. Dort wurden auch fünf EMS ausgewählt und genauer untersucht. In einem umfangreichen Musterdatenblatt wurden die Eigenschaften der fünf EMS geordnet und dokumentiert [10].

2.1. EMS allgemein

Ein EMS erfasst die Energieströme eines Objektes systematisch und steuert anhand dieser Daten die Speicher und Verbraucher automatisch [9]. Das Ziel dieser automatischen Steuerung ist das Optimieren des Eigenverbrauchs der PV-Anlage. Das System schaut, dass möglichst viel von der erzeugten PV-Energie selbst verbraucht wird.

In Abbildung 2 ist ein solches EMS abgebildet. Es handelt sich dabei um ein Produkt von Alpiq Digital AG.



Abbildung 2: Beispiel EMS

Das Foto zeigt ein EMS von Alpiq Digital AG, das in einem Schaltschrank eingebaut ist. Quelle: Hochschule Luzern

2.1.1.1. Komponenten eines EMS

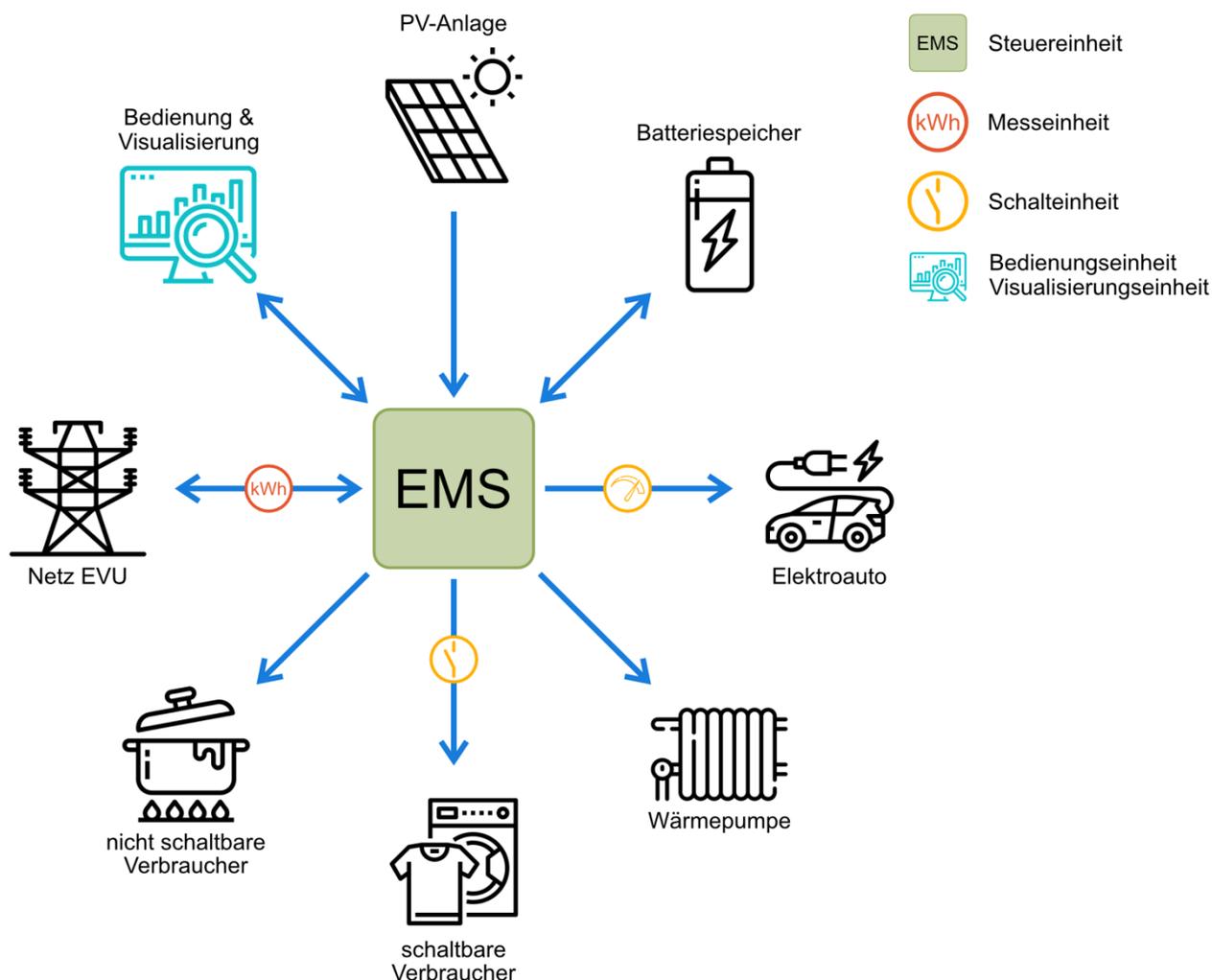


Abbildung 3: Komponenten eines EMS

Das Bild zeigt, wie ein EMS mit seinen fünf Komponenten in ein Objekt eingebunden wird. Die Bedienungs- und Visualisierungseinheit sind hier als vereintes Gerät abgebildet. Quelle: Hochschule Luzern

Jedes EMS ist grundsätzlich gleich aufgebaut. Es besteht aus den fünf Einheiten für Steuerung, Messung, Schaltung, Bedienung und Visualisierung. Diese Einheiten können separate oder vereinte Geräte sein. Nachfolgend wird jede Einheit kurz beschrieben.

Steuereinheit

Die Steuereinheit besteht aus Hard- und Software. Die Hardware bildet das Hauptgerät eines EMS. Es hat verschiedene Kommunikationsschnittstellen, um sich mit den anderen Komponenten auszutauschen. Das Gerät speichert die Daten lokal ab und oftmals werden sie zusätzlich in einer Cloud gespeichert.

Die Software verarbeitet alle Daten und versendet Steuerbefehle an die angeschlossenen Komponenten.

Messeinheit

Die Messeinheit kann aus Zählern und/oder Stromwandlern bestehen. Das System benötigt immer die Messung des Gesamtverbrauches und der Produktion. Viele Systeme verwenden Stromwandler, um die Gesamtenergie zu messen. Diese werden direkt an der Steuereinheit angeschlossen und ausgelesen. Die Messung der Produktion erfolgt oft durch einen Zähler oder die Daten werden direkt vom Wechselrichter bezogen.

Bei einem ZEV werden zusätzlich noch die Gesamtmessungen der einzelnen Parteien für die Abrechnungen benötigt.

Ob weitere Zähler benötigt werden, ist vom System abhängig oder davon, was der Benutzer visualisieren möchte. Die Steuereinheit liest bei den Zählern die notwendigen Daten aus. Dies geschieht z. B. mittels M-Bus, Modbus RTU, S0 oder WLAN.

Schalteinheit

Die Schalteinheit ist diejenige Einheit, die die Befehle der Steuereinheit ausführt. Die meisten EMS haben einige Schaltkontakte oder analoge Ausgänge auf dem Hauptgerät. Bei vielen Systemen kann die Schalteinheit mit Zusatzgeräten erweitert werden.

Für das einfache Ein- und Ausschalten von Verbrauchern werden Relaiskontakte verwendet. Hier gilt es zu beachten, wie grosse Leistungen diese Relais schalten können.

Soll ein Verbraucher stufenlos angesteuert werden, können analoge Ausgänge genutzt werden. Damit kann ein bestimmter Wert (0 - 100%) direkt ausgegeben werden.

Bedienungseinheit

Viele EMS haben eine Bedienungseinheit direkt auf dem Hauptgerät. Dies können z. B. Tasten oder ein Touchscreen sein. Über eine Netzwerkschnittstelle bieten viele EMS die Bedienung mit einer Software an (App oder Web-Portal). Dort können auch Einstellungen vorgenommen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Bedienung über externe Schalter. Mit denen kann man z. B. die Waschmaschine manuell einschalten.

Visualisierungseinheit

Für die Visualisierung wird ein Bildschirm benötigt. Bei einigen EMS befindet sich einer auf dem Hauptgerät. Die meisten EMS nutzen dafür aber ein Smartphone, ein Tablet oder einen PC. Über die App oder das Web-Portal können die Visualisierungen angeschaut werden. Dies ist oft auch per Fernzugriff über das Internet möglich.

Eine andere Möglichkeit den Status des Systems dem Nutzer zu veranschaulichen ist ein Lichtcode. Dafür kann zum Beispiel in den Wohnungen der Mieter eine kleine Leuchte installiert werden. Diese leuchtet dann bei Überproduktion grün und signalisiert den Bewohnern, dass sie jetzt Verbraucher einschalten dürfen. Wird hingegen bereits Strom vom Netz bezogen, leuchtet die Leuchte rot.

2.1.2. Funktion eines EMS

Grundfunktionen

Die EMS verfügen über unterschiedliche Funktionen. Die fünf Grundfunktionen Energiemonitoring, Energiemanagement, Bedienung, Visualisierung und Alarm besitzt jedes EMS. Nachfolgend wird jede Funktion kurz beschrieben.

Energiemonitoring

Das Energiemonitoring erfasst alle Daten aus der Messeinheit. Zusätzlich werden Angaben von den angeschlossenen Komponenten wie z. B. Batteriespeicher oder Ladestation ausgelesen. Alle diese Daten werden in einer Datenbank gespeichert, entweder lokal auf dem Steuergerät oder in der Cloud.

Energiemanagement

Das Energiemanagement ist die wichtigste Funktion des Systems. Das EMS nimmt die erfassten Daten von Gesamtproduktion und Gesamtverbrauch und vergleicht diese zwei Werte miteinander. Daraus resultieren die zwei Szenarien Überproduktion und Unterproduktion. Das EMS entscheidet nun, welche Aktionen durchgeführt werden und gibt die entsprechenden Befehle.

Überproduktion

Die PV-Anlage produziert mehr Energie, als das Objekt verbraucht. Die überschüssige Energie muss an den Netzbetreiber verkauft werden. Das soll verhindert werden. Deshalb schaltet das EMS zusätzliche Verbraucher ein oder erhöht die Leistung von bereits laufenden Verbrauchern, z. B. der Wärmepumpe über die SG Ready Schnittstelle. Wenn ein Batteriespeicher vorhanden ist, kann dieser geladen werden.

Unterproduktion

Die PV-Anlage produziert weniger Energie, als das Objekt verbraucht. Die fehlende Energie muss beim Netzbetreiber eingekauft werden. Auch das ist unerwünscht. Das EMS sorgt nun dafür, dass der Energiebezug sinkt. Hier besteht die Möglichkeit Verbraucher auszuschalten oder ihre Leistung zu drosseln. Bei Vorhandensein eines Batteriespeichers kann dieser entladen werden.

Bedienung

Das EMS kann mit der Bedieneinheit bedient werden. Die Bedienung umfasst das manuelle Steuern von Verbrauchern und das Ändern von Einstellungen. Das sind z. B. Zeitpläne und Mindestlaufzeiten anpassen oder Prioritäten ändern. Bei den meisten Systemen ist die Bedienung lokal im Gebäude oder von extern über das Internet möglich.

Visualisierung

In der Visualisierung werden die Daten vom Energiemonitoring angezeigt, also die Messwerte und der Status der Komponenten. Die aktuellen Werte von Verbrauch und Produktion werden oft als Energiefluss dargestellt. Diese bildliche Darstellung ist auch für Laien gut verständlich. Für statistische Angaben werden Säulen- oder Linien- bzw. Flächendiagramme verwendet.

Mit einer einfach verständlichen Visualisierung kann man Anreize für den Nutzer schaffen. So kann man ihn zum Beispiel zum Energiesparen animieren, wenn er direkt sieht, wie viel Geld er dadurch einsparen kann. Auch ein anonymer Vergleich mit anderen Nutzern im Haus oder mit seinen eigenen Werten vom letzten Jahr sind möglich.

Alarm

Alarmer sollen den Nutzer informieren, wenn das System nicht wie gewünscht läuft. Dies kann in Form von Benachrichtigungen auf Drittgeräte erfolgen, z. B. E-Mail oder Push-Benachrichtigung in der App. Die Alarmer können aber auch direkt auf dem Steuergerät oder in der Visualisierung angezeigt werden [18].

Weitere Funktionen

Neben den Grundfunktionen gibt es noch weitere Funktionen, die aber nicht von allen EMS angeboten werden. Die Kostenabrechnung und die Datenanalyse sind zwei Beispiele dafür.

Kostenabrechnung

Beim Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) ist das Energiemonitoring sehr wichtig für die Kostenabrechnung. Der Besitzer einer PV-Anlage verkauft den eigenen Strom an die Mitglieder des ZEV weiter. Nach Eingabe des Strompreises und Zuordnung der Zähler zu den Mitgliedern kann das System die Kosten berechnen und die einzelnen Abrechnungen erstellen.

Datenanalyse

Die gespeicherten Daten aus dem Energiemonitoring werden vom System analysiert. So können Trends und Stromfresser festgestellt werden. Das System erstellt dann Reports oder es wird in der Visualisierung angezeigt.

2.2. Abgrenzungen

Systemgrenze EFH

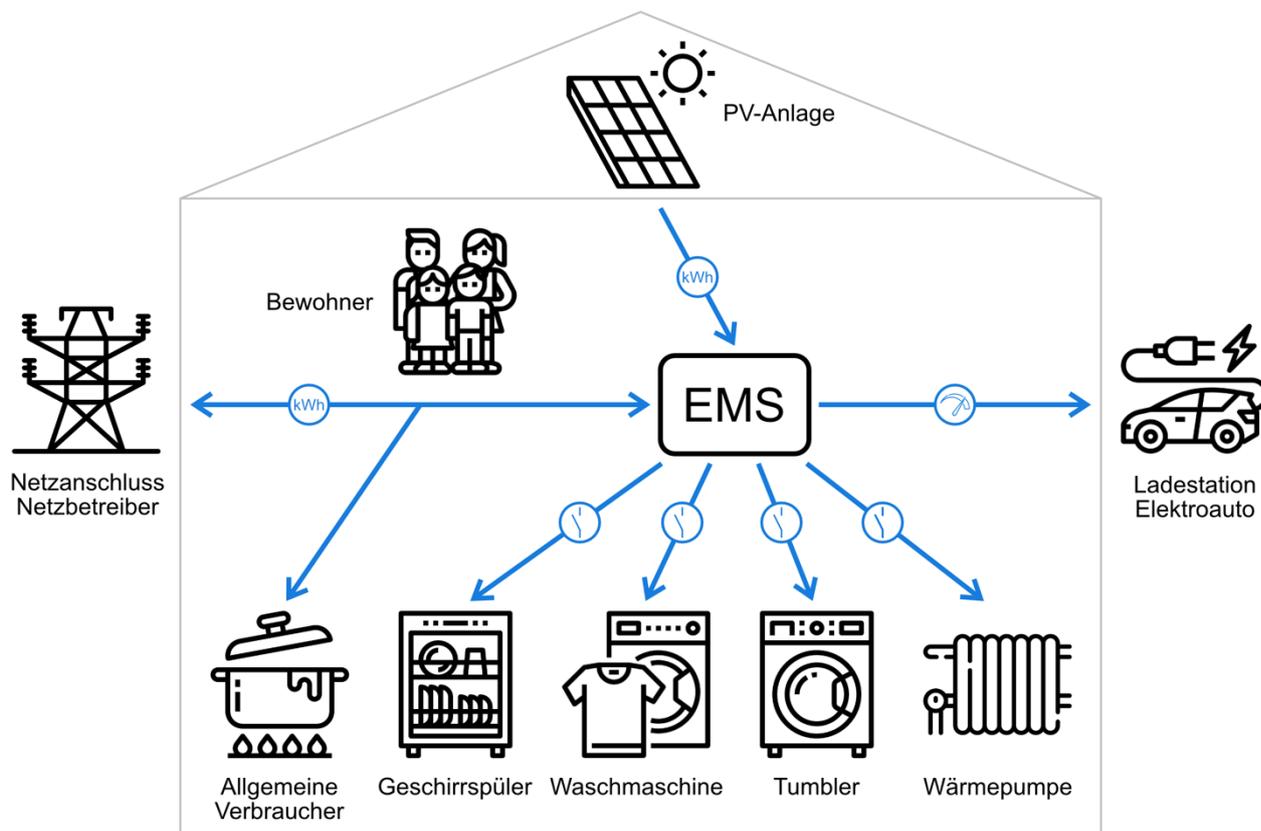


Abbildung 4: Schematische Darstellung des EFH

In dieser Abbildung sind alle Komponenten eingezeichnet, die zum Aufbau des Bewertungsverfahrens gehören. Die blauen Pfeile stellen den Energiefluss dar. Die Kreise mit der Beschriftung «kWh» sind Zähler. Die anderen Kreise weisen auf Schalter oder eine stufenlose Regelung hin. Auf diese Weise kann das EMS die Verbraucher steuern. Quelle: Hochschule Luzern

Das Bewertungsverfahren ist für EMS gedacht, die für ein EFH konzipiert sind. Das EFH, das als Grundlage benutzt wird, soll ein typisches Schweizer EFH mit Eigenverbrauchsoptimierung darstellen. Es hat eine PV-Anlage auf dem Dach, einen Netzanschluss vom Netzbetreiber, allgemeine Verbraucher und vier Bewohner. Weiter gehören eine Wärmepumpe mit einem SG Ready Kontakt, ein Geschirrspüler, eine Waschmaschine, ein Tumbler und eine Ladestation für ein Elektroauto dazu. Diese fünf Verbraucher können vom EMS angesteuert werden.

Ein Batteriespeicher hilft zwar den Eigenverbrauch zu erhöhen, aber da er noch nicht wirtschaftlich ist [2], wird er im typischen EFH noch nicht eingebaut. Daher, und weil das Bewertungsverfahren vorerst einfach gehalten werden soll, gehört der Batteriespeicher nicht zum Aufbau.

Damit ein EMS in diesem Bewertungsverfahren geprüft werden kann, benötigt es folgende Funktionen:

Zähler	Auslesen von 2 Zählern mit S0- oder RS485-Schnittstelle (S0-Zähler = Impulszähler)
Digitaler Schaltausgang	4 digitale Schaltausgänge zur Ansteuerung von SG Ready der Wärmepumpe, Geschirrspüler, Waschmaschine und Tumbler
UDP-Schnittstelle Ladestation	UDP-Schnittstelle zur Ansteuerung einer Ladestation (UDP = User Datagram Protocol)

Die Grundfunktionen Energiemonitoring, Energiemanagement, Bedienung, Visualisierung und Alarm werden beim EMS vorausgesetzt.

Nach der erfolgreichen Umsetzung dieses Bewertungsverfahrens kann es auf EMS mit anderen Anwendungsgebieten (z. B. MFH oder Areal mit mehreren Gebäuden) ausgeweitet werden. Dafür werden dann ein anderer Aufbau und andere Funktionen benötigt.

Systemgrenze Gebäudeautomations- und Smart Home Systeme

In der vorliegenden Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf Systemen, die explizit für die Eigenverbrauchsoptimierung gemacht sind. Gebäudeautomations- und Smart Home Systeme werden vorerst ausgeschlossen. Bei diesen gibt es sehr viele Freiheiten in der Konfiguration. Je nachdem wie es konfiguriert wird, arbeitet das gleiche System besser oder schlechter. Das macht den Vergleich mit anderen Systemen sehr schwierig.

3. Bewertungsverfahren

Das Bewertungsverfahren soll einen Vergleich von Energiemanagementsystemen ermöglichen. Dafür werden die verschiedenen EMS einem jeweils gleichen, reproduzierbaren Prüfverfahren unterzogen. In diesem Kapitel wird die Theorie des Bewertungsverfahrens beschrieben. Ausgearbeitet wurde diese Theorie in der Vertiefungsarbeit 2. Dort können auch die Details dazu nachgelesen werden [19]. Einige Bereiche wurden überarbeitet.

3.1. Prüfaufbau

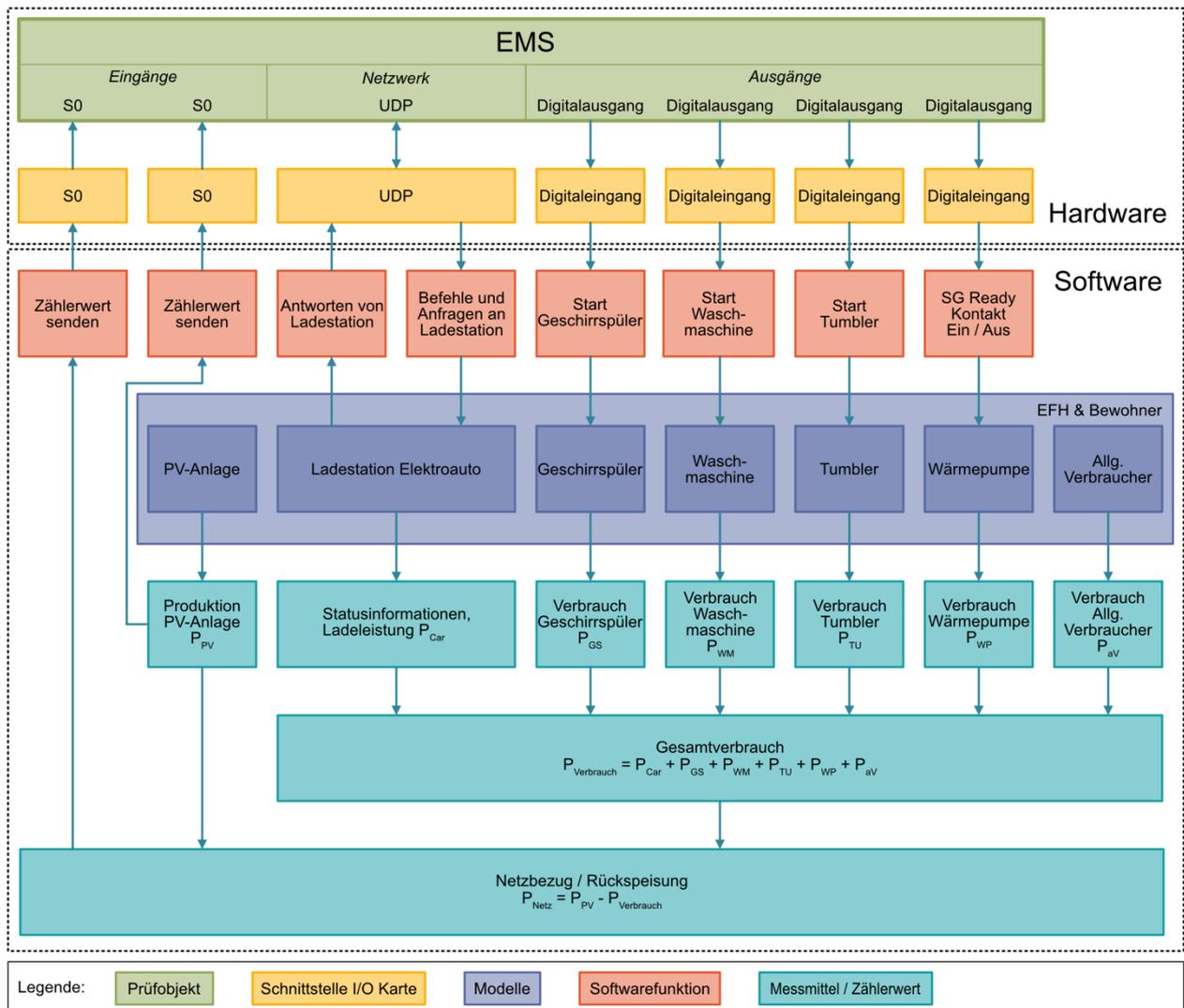


Abbildung 5: Blockschema Prüfaufbau

Dieses Blockschema umfasst den gesamten Prüfaufbau. Die Pfeile zeigen den Informationsverlauf. Im grünen Block ist das Prüfobjekt mit seinen Schnittstellen abgebildet. Diese Schnittstellen werden mit den Schnittstellen der I/O Karte verbunden (gelbe Blöcke). Die Modelle sind in den violetten Blöcken eingezeichnet. In den türkisenen Blöcken stehen die Zählerwerte, die berechnet werden. Die roten Blöcke stehen für Schritte, die die Software ausführt. Quelle: Hochschule Luzern

3.2. Modelle

Die Komponenten der Prüfumgebung werden alle simuliert und können in die zwei Gruppen «nicht flexible Komponenten» und «flexible Komponenten» unterteilt werden.

Die «nicht flexiblen Komponenten» sind fest vorgegeben und sind vom EMS während des Bewertungsverfahrens nicht beeinflussbar.

Die «flexiblen Komponenten» können während des Bewertungsverfahrens vom EMS beeinflusst werden. Das EMS kann bestimmen, wann diese Komponenten eingeschaltet werden.

Nicht flexible Komponenten:

- EFH
- Bewohner
- PV-Anlage
- Allgemeine Verbraucher
(z. B. Licht, Backofen)

Flexible Komponenten:

- Wärmepumpe mit Warmwasser- und Energiespeicher
- Geschirrspüler
- Waschmaschine
- Tumbler
- Elektroauto

Die Modelle sollen die Realität möglichst gut abbilden. Dafür gibt es aber mehrere Varianten und je nachdem wo man seinen Schwerpunkt setzt, wählt man eine andere Variante. Bei den nachfolgenden Modellen wurde jeweils eine Variante ausgewählt. Die verschiedenen Varianten sind in Anhang 1 aufgelistet.

3.2.1. EFH

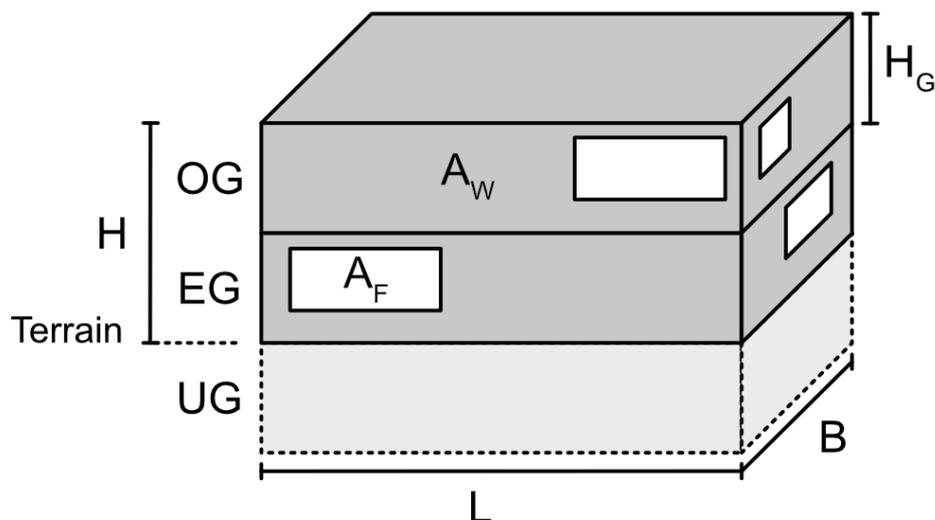


Abbildung 6: Aufbau EFH

In dieser Abbildung sind die Parameter des Gebäudes eingezeichnet, die für das Modell der Wärmepumpe mit Warmwasser- und Wärmespeicher und das Modell der PV-Anlage benötigt werden. Quelle: Hochschule Luzern

Als Standort des EFH wurde Zürich Kloten ausgewählt. Die Meteorologischen Daten und die Energiepreise beziehen sich auf diesen Standort. Der Aufbau und die Grösse des Gebäudes haben einen Einfluss auf die erforderliche Heizleistung und auf die Grösse der PV-Anlage.

Das EFH hat eine Grundfläche von $L \times B = 13 \times 8 \text{ m}$ und ein Flachdach. Es besteht aus drei Geschossen, wovon das UG unter dem Terrain liegt und nicht beheizt wird. Die oberen Geschosse EG und OG sind beheizt und haben eine Geschosshöhe H_G von 3 m. Die Gebäudehöhe H über Terrain beträgt 6 m.

Die vier Aussenwände haben einen Fensteranteil von 30% [20]. Die Fensterflächen A_F haben einen U-Wert von $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, die Aussenwände A_W (inkl. Boden und Dach) von $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [20]. Die Aussenwände haben eine Gesamtdicke von 0.4 m. Daraus ergibt sich eine Energiebezugsfläche EBF von 176 m^2 und ein Raumvolumen V_R von 457 m^3 .

Die Parameter, die mit dem Modell EFH generiert werden, sind während des gesamten Bewertungsverfahrens gleich. Sie werden für die Modelle der Wärmepumpe und der PV-Anlage benötigt.

In Anhang 2 sind die Modellparameter des EFH in einer Tabelle zusammengefasst. Details zur Auswahl einzelner Parameter sind im Dokument «Bewertungsverfahren für den Vergleich von Energiemanagementsystemen. Erarbeitung des Bewertungsverfahrens. Vertiefungsarbeit 2» zu finden [19].

3.2.2. Bewohner

Das EFH wird von einer Familie mit zwei Kindern bewohnt. Die Eltern sind berufstätig und die Kinder besuchen die Primarschule.

Die Mutter ist Hauptnutzerin des Elektroautos. Deshalb bestimmen die An- und Abwesenheiten der Mutter hauptsächlich, wann das Elektroauto zu Hause steht und geladen werden kann und welche Strecken damit gefahren werden. Da sie den Haushalt macht, hat ihre Anwesenheit auch einen Einfluss auf die Nutzungszeiten von Geschirrspüler, Waschmaschine und Tumbler.

Die Mutter arbeitet Teilzeit. Ihre Arbeitszeiten decken sich mit den Unterrichtszeiten der Kinder. Der Vater arbeitet Vollzeit zu den üblichen Arbeitszeiten.

Unter der Woche ist die Mutter mit den Kindern mittags zu Hause. Abends ist jeweils die ganze Familie zu Hause. Am Samstag geht die Familie mit dem Elektroauto einkaufen und ist mittags nicht zu Hause. Den Sonntag verbringen sie hingegen zu Hause.

Die An- und Abwesenheiten der Bewohner beeinflussen die Laufzeiten der Verbraucher.

Details zur Auswahl einzelner Parameter sind im Dokument «Bewertungsverfahren für den Vergleich von Energiemanagementsystemen. Erarbeitung des Bewertungsverfahrens. Vertiefungsarbeit 2» zu finden [19].

3.2.3. PV-Anlage

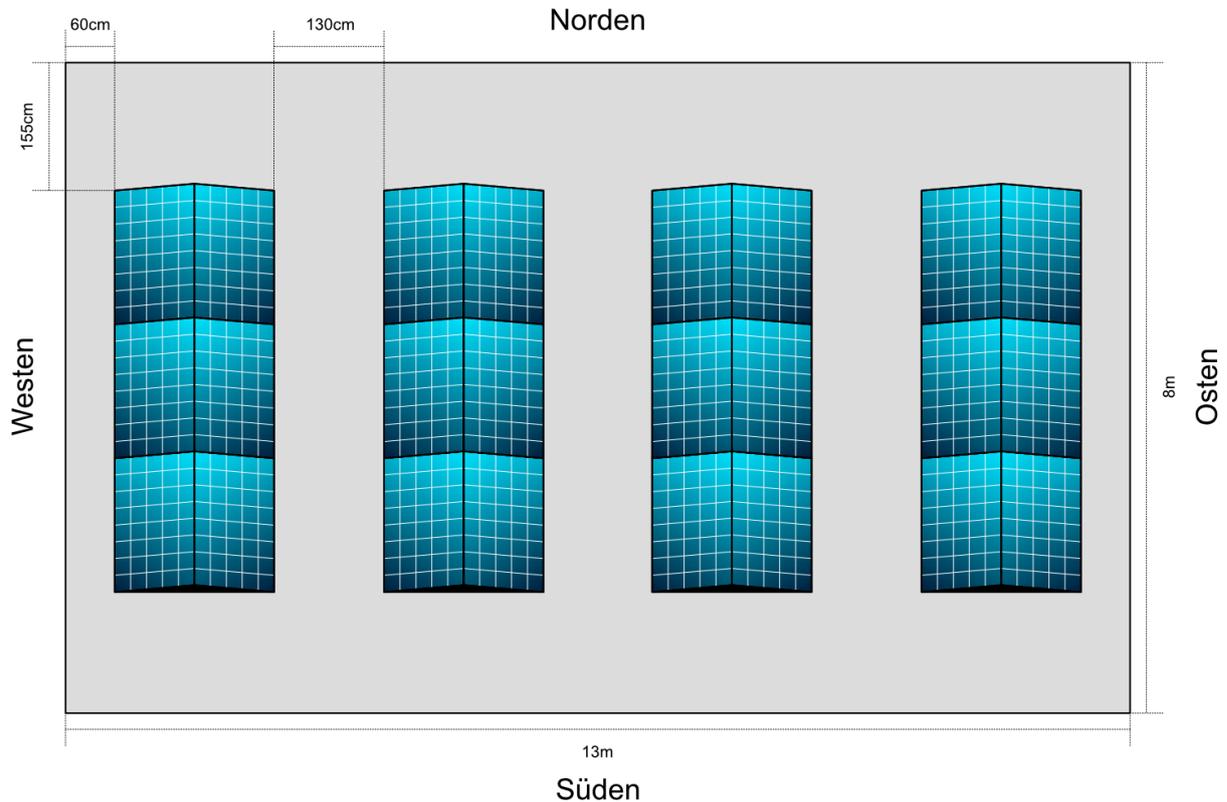


Abbildung 7: Dachansicht mit PV-Anlage

Die PV-Module werden in vier Reihen mit einer Neigung von 10° aufgestellt. In jeder Reihe gibt es 3 Module mit Ostausrichtung und 3 Module mit Westausrichtung. Quelle: Hochschule Luzern

Die PV-Anlage auf dem Flachdach besteht aus 24 Modulen. Die Module sind in vier Reihen angeordnet. In jeder Reihe gibt es 3 Module mit Ostausrichtung und 3 Module mit Westausrichtung. Die Panels haben einen Aufstellwinkel von 10° . Die PV-Anlage hat eine Nennleistung $P_{PV,Nenn}$ von 6.6 kWp.

Das Modell basiert auf den Daten des Moduls P275-60-w U40 von Megasol Energie AG und dem Wechselrichter SYMO 3.0-3-M von Fronius Schweiz AG.

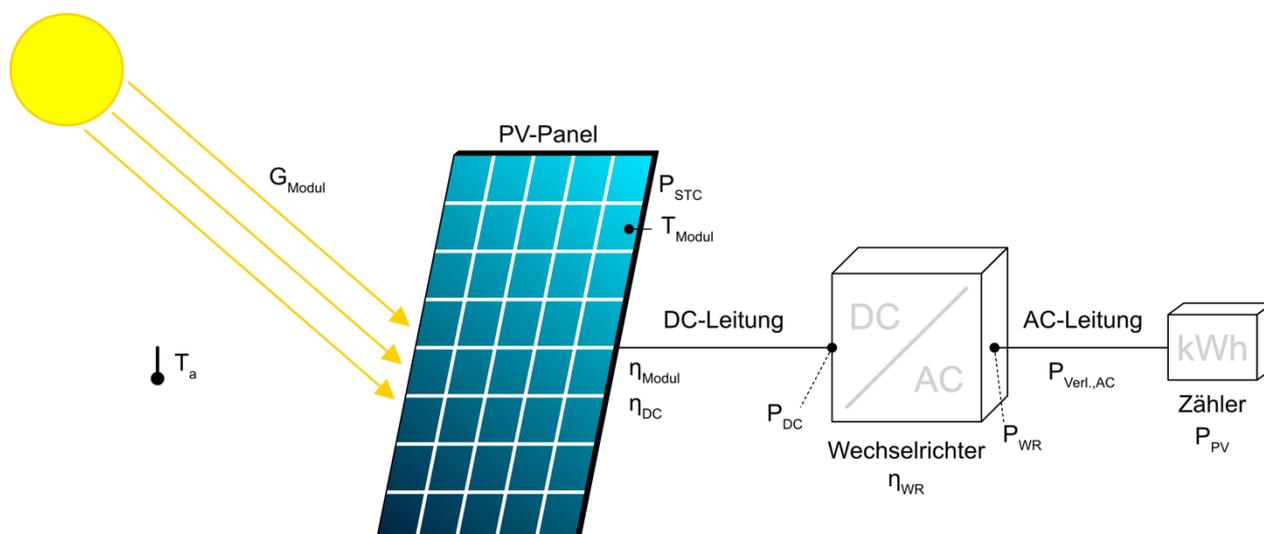


Abbildung 8: Gesamtsystem PV-Anlage

Die Sonnenstrahlen treffen auf das Modul und werden dort in elektrische Energie umgewandelt. Die Menge der erzeugten Energie ist von der Einstrahlung und der Aussentemperatur abhängig. Über die DC-Leitung fließt der Gleichstrom in den Wechselrichter. Dort wird er in Wechselstrom umgewandelt und fließt über die AC-Leitung weiter zum Zähler. Nach Abzug aller Verluste kann dort die AC-Ausgangsleistung der gesamten PV-Anlage abgelesen werden. Quelle: Hochschule Luzern

Die Nennleistung des Modules P_{STC} , die im Datenblatt angegeben ist, wurde unter den Standardtestbedingungen (STC = Standard Test Conditions) ermittelt. Das heisst bei einer Einstrahlung von $1'000 \text{ W/m}^2$ und einer Zelltemperatur von 25 °C [21].

Im realen Betrieb der PV-Anlage ändern sich die Einstrahlung G_{Modul} und die Temperatur im Verlauf des Tages und somit auch der Wirkungsgrad η_{Modul} und die Leistung des Moduls. Für das Bewertungsverfahren wird aber nicht die Modulleistung benötigt, sondern die AC-Ausgangsleistung (AC = Alternating Current / Wechselstrom) der gesamten PV-Anlage P_{PV} . Dafür müssen zusätzlich die Anzahl Module n_{Modul} und die Wirkungsgrade der DC-Seite η_{DC} (DC = Direct Current / Gleichstrom), des Wechselrichters η_{WR} und der AC-Seite $P_{Verl.,AC}$ berücksichtigt werden. Dies kann mit folgender Formel zusammengefasst werden.

$$P_{PV,o}(t) = n_{Modul,o} * P_{STC} * \frac{G_{Modul,o}(t)}{1000 \frac{W}{m^2}} * \eta_{Modul,o}(t) * \eta_{DC} * \eta_{WR,o}(t) - P_{Verl.,AC,o}(t) \quad (3.1)$$

Diese Berechnung wird für die Ost- und Westseite separat durchgeführt und dann zu einer Gesamtleistung addiert. Die Einstrahlung auf die beiden Seiten ist unterschiedlich und es gibt je einen Wechselrichter.

Zur Veranschaulichung des Modells wurde ein Tagesablauf mit Beispielwerten berechnet und in Abbildung 9 dargestellt.

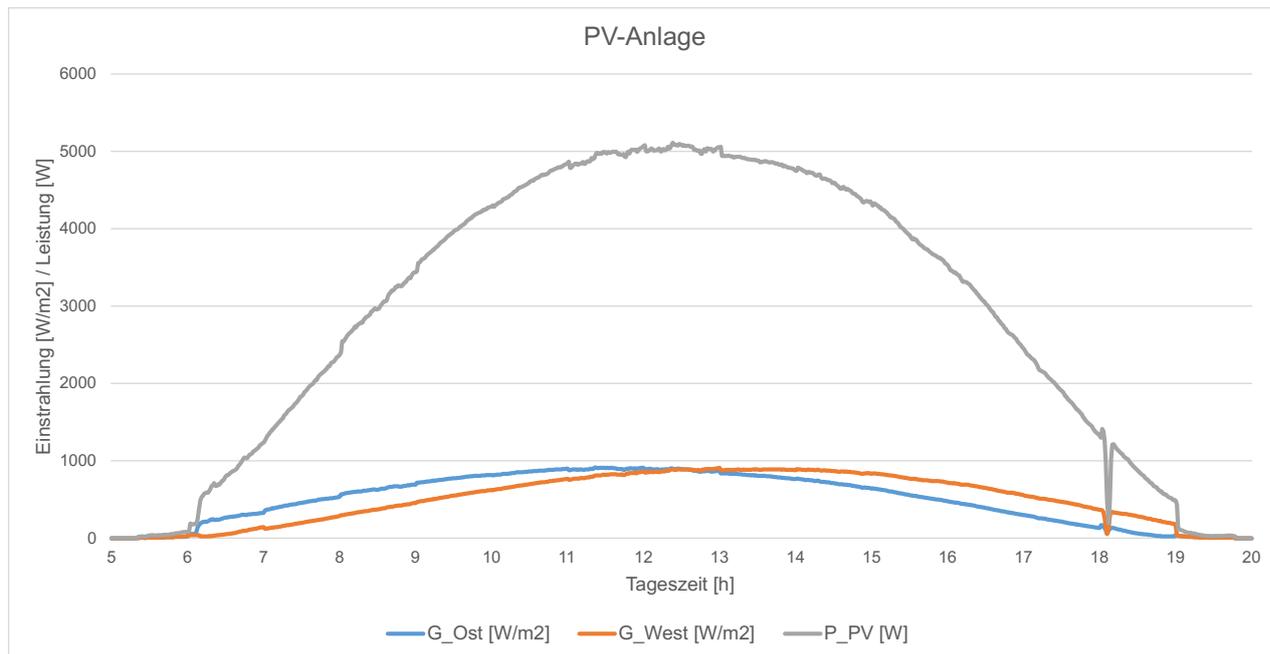


Abbildung 9: Tagesablauf PV-Anlage

In diesem Diagramm ist gut ersichtlich, dass die Einstrahlung auf der Ostseite (blau) am Vormittag grösser ist als am Nachmittag. Bei der Westseite (orange) ist es gerade umgekehrt. In der Gesamtproduktion wird das wieder ausgeglichen, da es auf beiden Seiten gleich viele Module hat. Quelle: Hochschule Luzern

Die ausführlichen Formeln sowie die Parameter zum Modell der PV-Anlage sind im Anhang 2 aufgeführt.

Details zur Auswahl einzelner Parameter sind im Dokument «Bewertungsverfahren für den Vergleich von Energiemanagementsystemen. Erarbeitung des Bewertungsverfahrens. Vertiefungsarbeit 2» zu finden [19].

3.2.4. Allgemeine Verbraucher

Zu den allgemeinen Verbrauchern zählen all diejenigen Verbraucher, die nicht vom EMS angesteuert werden, aber den Gesamtverbrauch beeinflussen.

Für den Prüfaufbau wurden die Laufzeiten und Leistungen der Verbraucher festgelegt. Dafür wurden neun Gruppen festgelegt. Die grossen Verbraucher bilden die separaten Gruppen «Kochherd, Kochen mit 3 Kochzonen», «Kochherd, Kochen mit 1 Kochzone», «Backofen» und «Steamer».

Weiter wurde der Tag zeitlich in vier Phasen unterteilt, wovon jede Phase eine eigene Gruppe bildet. Das sind die Gruppen «Verbraucher Morgen», «Verbraucher Tag», «Verbraucher Abend» und «Verbraucher Nacht». Verbraucher wie z. B. das Licht, die Kaffeemaschine oder der Fernseher wurden hier in die entsprechende Gruppe zugeteilt.

Die Verbraucher, die dauernd eingeschaltet sind, wie z. B. der Kühlschrank oder der Internet-Router, bilden die letzte Gruppe, die «Verbraucher 24h».

Aus den Laufzeiten und Leistungen der einzelnen Gruppen entsteht ein Lastprofil für eine Woche. Zur Veranschaulichung ist in der Abbildung 10 das Lastprofil vom Montag dargestellt.

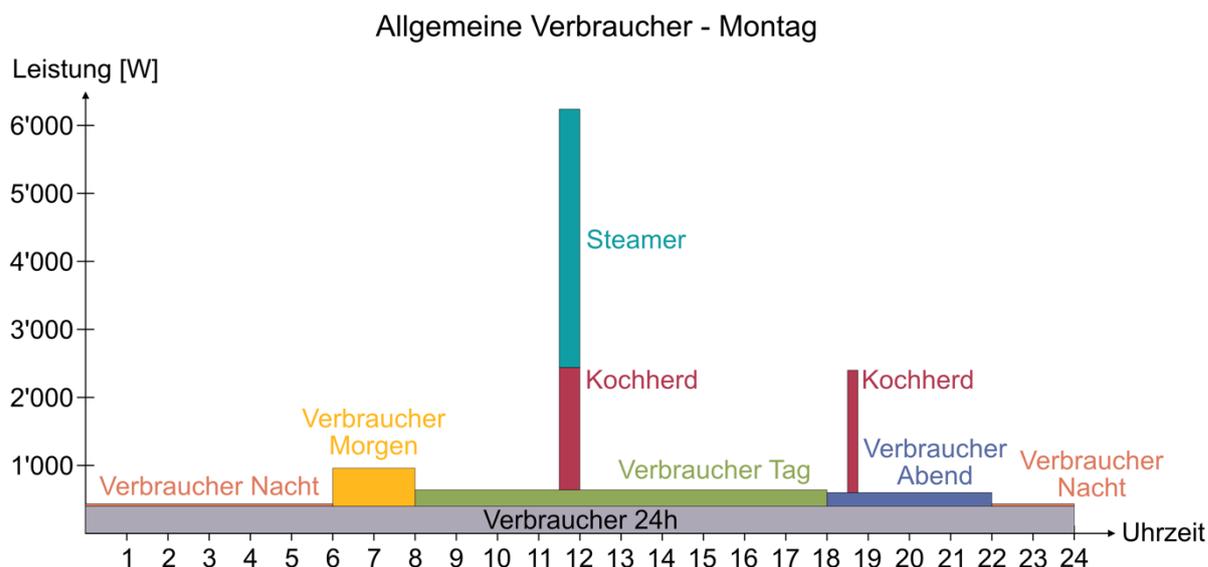


Abbildung 10: Lastprofil Allgemeine Verbraucher am Montag mit einzelnen Verbrauchern

Die Abbildung zeigt den Verlauf eines Montags. Die allgemeinen Verbraucher setzen sich aus neun Verbrauchergruppen zusammen. Die einzelnen Verbrauchergruppen sind in der Abbildung einzeln eingezeichnet und ergeben zusammen ein Lastprofil. Quelle: Hochschule Luzern

Mit dem Modell kann in jedem Zeitschritt die benötigte elektrische Leistung der allgemeinen Verbraucher P_{av} anhand des Lastprofils ermittelt werden.

Die ausführlichen Angaben zu den Laufzeiten und Leistungen der Gruppen sind im Anhang 2 aufgelistet.

Details zur Auswahl einzelner Parameter sind im Dokument «Bewertungsverfahren für den Vergleich von Energiemanagementsystemen. Erarbeitung des Bewertungsverfahrens. Vertiefungsarbeit 2» zu finden [19].

3.2.5. Wärmepumpe mit Warmwasser- und Energiespeicher

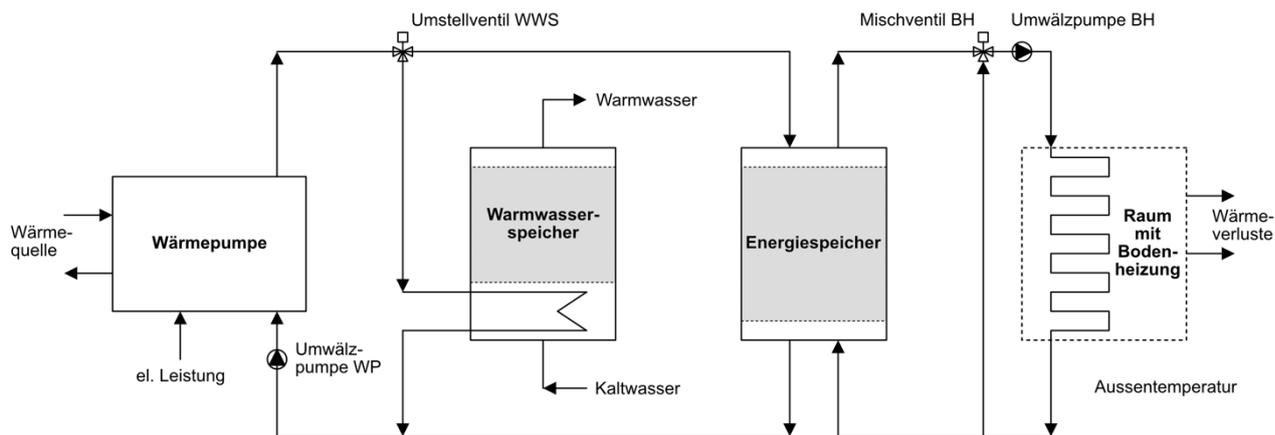


Abbildung 11: Heizsystem

Das Heizsystem besteht aus einer Wärmepumpe, einem Warmwasserspeicher, einem Energiespeicher und der Fussbodenheizung im Raum. Quelle: Hochschule Luzern

Das Heizsystem setzt sich aus einer Wärmepumpe (WP), einem Warmwasserspeicher (WWS), einem Energiespeicher (ES) und der Fussbodenheizung (BH) zusammen. Als Grundlage für das Modell dient die Sole-Wasser-Wärmepumpe WPF 07 von Stiebel Eltron AG.

Die Wärmepumpe hat die zwei Betriebsarten Warmwasserbetrieb und Heizbetrieb. Im Warmwasserbetrieb wird der Warmwasserspeicher aufgeladen. Im Heizbetrieb wird der Energiespeicher aufgeladen. Der Warmwasserbetrieb hat immer Vorrang vor dem Heizbetrieb. Wenn der Warmwasserspeicher leer ist, wird das Umstellventil vom Energiespeicher auf den Warmwasserspeicher umgestellt. Dies geschieht unabhängig davon, ob der Energiespeicher vollgeladen ist oder nicht.

Im Warmwasserbetrieb gilt

$$\Phi_{WP} = \Phi_{WWS,65} \text{ und } T_{VL,WP} = T_{VL,WWS} \quad (3.2)$$

Im Heizbetrieb gilt

$$\Phi_{WP} = \Phi_{ES1,35} \text{ und } T_{VL,WP} = T_{VL,ES1} \quad (3.3)$$

Warmwasserbetrieb

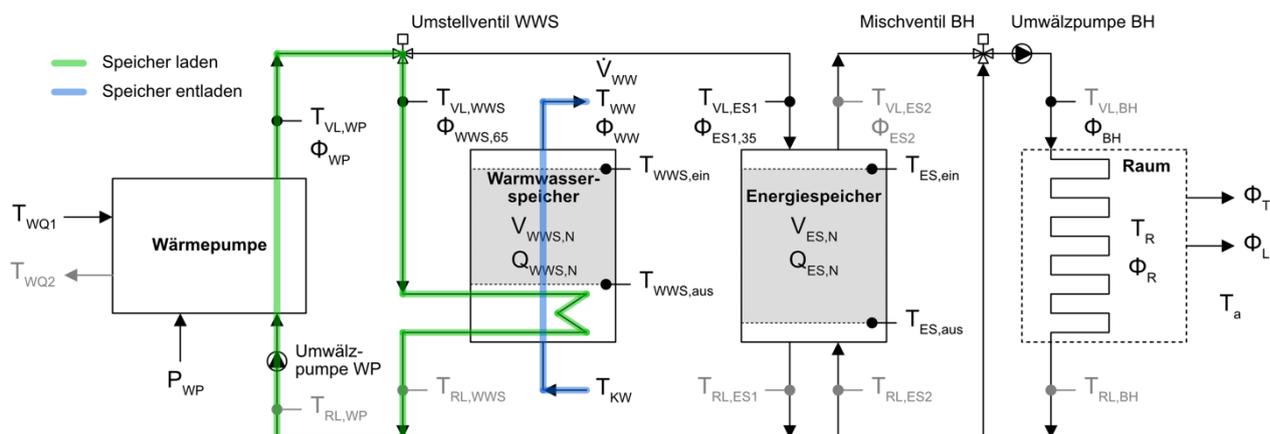


Abbildung 12: Heizsystem im Warmwasserbetrieb

Im Warmwasserbetrieb wird der Warmwasserspeicher geladen (grüner Kreislauf) und entladen (blauer Kreislauf). Quelle: Hochschule Luzern

Der Warmwasserspeicher hat ein Gesamtvolumen und ein Nutzvolumen. Für das Modell wird nur das Nutzvolumen benötigt. Dieses Volumen $V_{WWS,N}$ bestimmt die Energiemenge $Q_{WWS,N}$, die geladen bzw. entladen wird.

Im Speicher sind zwei Temperatursensoren eingebaut. Der obere Sensor bestimmt, wann der Speicher leer ist und die Ladung gestartet werden muss. Die Temperatur im Speicher nimmt von oben nach unten ab. Deshalb wird oben das warme Wasser entnommen und unten das Kalte nachgefüllt.

Wenn der Speicher entladen wird, steigt das kalte Wasser nach oben. Sobald der obere Sensor seine Grenztemperatur $T_{WWS,ein}$ misst, wird das Umstellventil auf den Warmwasserspeicher umgestellt, die Wärmepumpe stellt auf Warmwasserbetrieb um und der Speicher wird geladen. Nun sinkt das warme Wasser bis der untere Sensor seine Grenztemperatur $T_{WWS,aus}$ erreicht und der Warmwasserbetrieb wird beendet.

Wann der Warmwasserspeicher geladen werden muss, ist von der Warmwasserentnahme abhängig. Diese erfolgt gemäss der statistischen Verteilung der SIA 385/2, Kapitel 4.2 [22]. Darin ist angegeben, zu welcher Tageszeit wieviel Warmwasser (60°) entnommen wird. Es sind jeweils die durchschnittlichen Stundenwerte aufgeführt. Dies entspricht einem Volumenstrom in Liter pro Stunde.

Anhand der Warmwasserentnahme, die den Volumenstrom des Warmwassers \dot{V}_{WW} ergibt, der Dichte ρ_W und der spezifischen Wärmekapazität c_W von Wasser und der Warm- und Kaltwassertemperatur kann die Entladeleistung Φ_{WW} des Speichers berechnet werden.

$$\Phi_{WW}(t) = \dot{V}_{WW}(t) * \rho_W * c_W * (T_{WW} - T_{KW}) \quad (3.4)$$

Aus der Wärmeenergie $Q_{WWS,N}$ des Speichers und der Entladeleistung Φ_{WW} ergibt sich die Entladezeit $\Delta t_{WWS,Entlade}$.

$$\Delta t_{WWS,Entlade}(t) = \frac{Q_{WWS,N}}{\Phi_{WW}(t)} \quad (3.5)$$

Geladen wird der Warmwasserspeicher mit der Wärmeleistung $\Phi_{WWS,65}$. Diese wird bei einer Vorlauftemperatur von 65°C und einer Eintrittstemperatur der Wärmequelle von 0°C von der Wärmepumpe erzeugt. Beim Laden wird die zeitgleiche Entladung durch Warmwasserentnahme mit der Entladeleistung Φ_{WW} mitberücksichtigt.

Die Ladezeit $\Delta t_{WWS,Lade}$ wird anhand folgender Formel berechnet.

$$\Delta t_{WWS,Lade}(t) = \frac{Q_{WWS,N}}{\Phi_{WWS,65} - \Phi_{WW}(t)} \quad (3.6)$$

Heizbetrieb

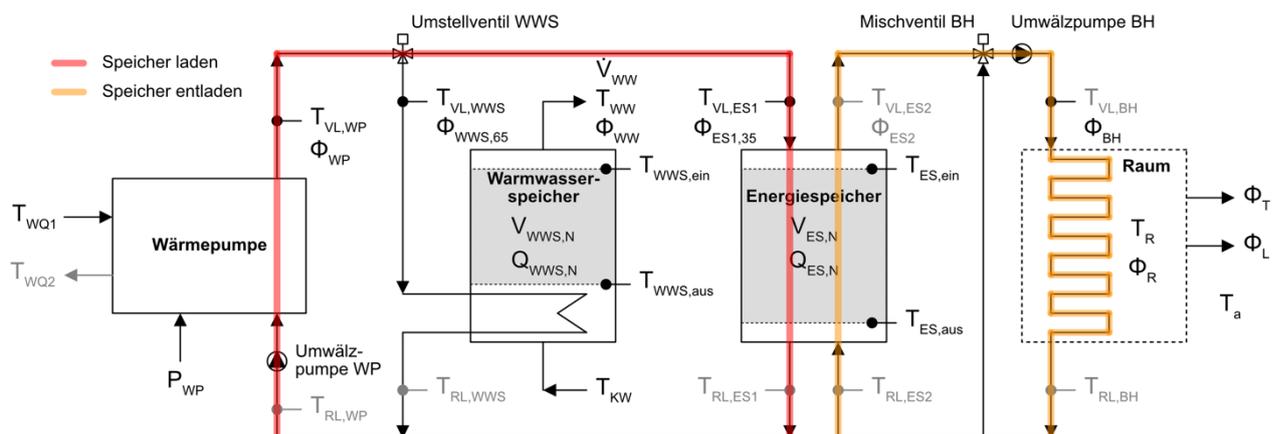


Abbildung 13: Heizsystem im Heizbetrieb

Im Heizbetrieb wird der Energiespeicher geladen (roter Kreislauf) und über die Bodenheizung wieder entladen (oranger Kreislauf). Quelle: Hochschule Luzern

Der Heizbetrieb startet, wenn die Aussentemperatur T_a unter der Heizgrenze von 12°C liegt und sofern sich das Heizsystem nicht im Warmwasserbetrieb befindet.

Der Energiespeicher funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie der Warmwasserspeicher. Er hat ein Nutzvolumen $V_{ES,N}$ und zwei Temperatursensoren $T_{ES,ein}$ und $T_{ES,aus}$. Daraus ergibt sich die Energiemenge $Q_{ES,N}$, die geladen bzw. entladen wird.

Während der Entladung wird die Energiemenge $Q_{ES,N}$ über die Fussbodenheizung in den Raum geführt. Die Heizlast des Raumes Φ_R bestimmt die Heizleistung der Fussbodenheizung Φ_{BH} . Es gilt

$$\Phi_R(t) = \Phi_{BH}(t) \quad (3.7)$$

Die Heizlast des Raumes Φ_R wird nach SIA 384.201, Kapitel 8.3 berechnet [23]. Sie entspricht den Wärmeverlusten des Gebäudes, welche sich aus den Transmissions- Φ_T und Luftwärmeverlusten Φ_L zusammensetzen. Das Gebäude wird in diesem Modell vereinfachend als einen Raum angesehen.

$$\Phi_R(t) = \Phi_T(t) + \Phi_L(t) \quad (3.8)$$

Die Transmissionswärmeverluste berechnen sich aus der Raum- und Aussentemperatur sowie den Flächen und U-Werten von Wänden und Fenstern [23].

$$\Phi_T(t) = (T_R - T_a(t)) * (A_W * U_W + A_F * U_F) \quad (3.9)$$

Die Luftwärmeverluste ergeben sich aus dem Raumvolumen V_R , der Luftwechselrate n_R , der Dichte ρ_L und der spezifischen Wärmekapazität c_L von Luft und der Raum- und Aussentemperatur. Als Raumvolumen wird das gesamte Gebäudevolumen angenommen [23].

$$\Phi_L(t) = V_R * n_R * \rho_L * c_L * (T_R - T_a(t)) \quad (3.10)$$

Mit der thermischen Leistung für die Bodenheizung Φ_{BH} und der Energiemenge des Speichers $Q_{ES,N}$ kann die benötigte Entladezeit $\Delta t_{ES,Entlade}$ berechnet werden.

$$\Delta t_{ES,Entlade}(t) = \frac{Q_{ES,N}}{\Phi_{BH}(t)} \quad (3.11)$$

Geladen wird der Energiespeicher mit der konstanten thermische Leistung $\Phi_{ES1,35}$, welche die Wärmepumpe bei einer Vorlauftemperatur von 35°C und einer Eintrittstemperatur der Wärmequelle von 0°C produziert.

Zusammen mit der Wärmeenergie $Q_{ES,N}$ des Speichers kann die Ladezeit $\Delta t_{ES,Lade}$ berechnet werden. Die zeitgleiche Entladung durch die Bodenheizung mit der Entladeleistung Φ_{BH} wird ebenfalls berücksichtigt.

$$\Delta t_{ES,Lade}(t) = \frac{Q_{ES,N}}{\Phi_{ES1,35} - \Phi_{BH}(t)} \quad (3.12)$$

Für das Bewertungsverfahren wird schlussendlich die elektrische Leistung der Wärmepumpe P_{WP} benötigt. Diese ist von der Eintrittstemperatur der Wärmequelle und der Vorlauftemperatur abhängig. Die Eintrittstemperatur wird als konstant angenommen und die Vorlauftemperatur wird innerhalb der Betriebsart ebenfalls als konstant angenommen. Somit ergibt sich eine elektrische Leistung für den Warmwasserbetrieb und eine für den Heizbetrieb.

Mit den beschriebenen Formeln können die Ladung und Entladung der beiden Speicher modelliert werden und somit auch die Zeiten, in denen die Wärmepumpe eingeschaltet ist.

Bei diesem Modell werden die Verluste der beiden Speicher nicht berücksichtigt.

Einflussnahme des EMS

Das EMS kann den SG Ready Kontakt der Wärmepumpe ansteuern. Die Wärmepumpe schaltet dann in einen erhöhten Betrieb. Das bedeutet, dass die Ausschalttemperaturen der beiden Speicher um 5 K erhöht werden. Dadurch kann mehr Energie gespeichert werden. Wenn das EMS den SG Ready Kontakt wieder öffnet, werden die Ausschalttemperaturen wieder auf die ursprünglichen Werte zurückgesetzt.

Die ausführlichen Formeln sowie die Parameter zum Modell der Wärmepumpe sind im Anhang 2 aufgeführt.

Details zur Auswahl einzelner Parameter sind im Dokument «Bewertungsverfahren für den Vergleich von Energiemanagementsystemen. Erarbeitung des Bewertungsverfahrens. Vertiefungsarbeit 2» zu finden [19].

3.2.6. Geschirrspüler

Das Modell des Geschirrspülers wurde anhand einer Messung im Forschungshaus GEE Live bestimmt. Gemessen wurde das Modell Adora SL GS55SLGHVi von V-ZUG. Dieses Produkt entspricht dem aktuellen Stand der Technik.

Für das Modell wird nur das Standardprogramm des Geschirrspülers verwendet. Die anderen Programme werden nicht berücksichtigt. Die Gesamtlaufzeit des Standardprogramms beträgt 4 h 31 Min.

Das Lastprofil der Messung wurde vereinfacht und in fünf Phasen unterteilt. Jede Phase ist durch eine fixe Leistung und Zeitdauer definiert. In Abbildung 14 ist das gemessene und das modellierte Lastprofil des Geschirrspülers dargestellt.

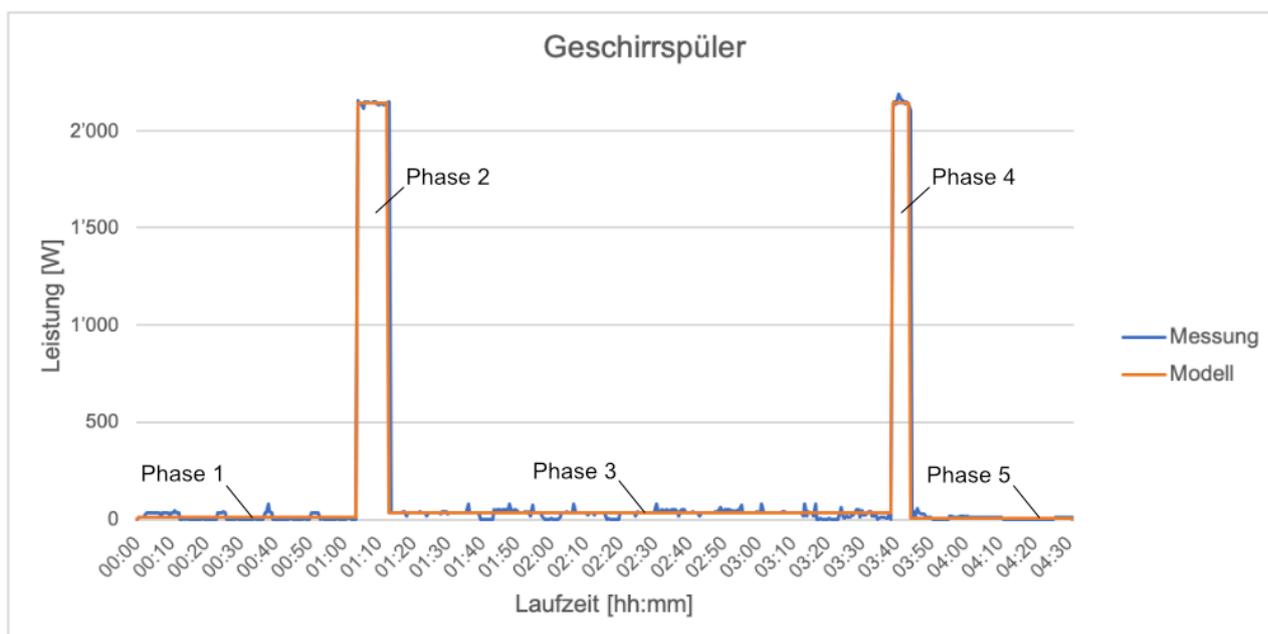


Abbildung 14: Lastprofil Geschirrspüler

In Phase 1 wird das Geschirr vorgespült. In Phase 2 wird das Wasser aufgeheizt und in Phase 3 wird das Geschirr damit gewaschen. In Phase 4 wird die Luft zum Trocken aufgeheizt und während Phase 5 wird das Geschirr getrocknet. Quelle: Hochschule Luzern

Mit dem Modell kann in jedem Zeitschritt die benötigte elektrische Leistung des Geschirrspülers P_{GS} anhand des Lastprofils ermittelt werden.

Einflussnahme des EMS

Das EMS erhält täglich ein Zeitfenster, in dem es den Geschirrspüler starten kann. Zusätzlich wird eine Zeit vorgegeben, wann der Geschirrspüler spätestens gestartet werden muss, auch wenn kein Überschuss vorhanden ist.

Die Modellparameter zum Geschirrspüler sind im Anhang 2 ausführlich aufgelistet.

3.2.7. Waschmaschine

Die Waschmaschine wurde anhand des Modells Adora SL WAASLHi von V-ZUG nachgebildet. Dieses Produkt ist im GEE Live vorhanden und entspricht dem aktuellen Stand der Technik. Im GEE Live wurde je eine Messung der beiden Standardprogramme «Baumwolle 60°» und «Baumwolle 40°» mit gleicher Füllmenge durchgeführt. Die Messresultate zeigen zwei übereinstimmende Lastprofile. Dies bestätigen auch die Angaben im Datenblatt. Die benötigte Energie beträgt für beide Waschgänge je 0.64 kWh [24]. Deshalb wird im Bewertungsverfahren nicht zwischen 60°- und 40°-Waschgängen unterschieden, sondern es gibt ein Standard-Lastprofil für die Waschmaschine. Die Gesamtlaufzeit des Standardprogramms beträgt 3 h 32 Min.

Das gemessene Lastprofil wurde vereinfacht und in sieben Phasen unterteilt. Jede Phase ist durch eine fixe Leistung und Zeitdauer definiert. In Abbildung 15 ist das gemessene und das modellierte Lastprofil der Waschmaschine dargestellt.

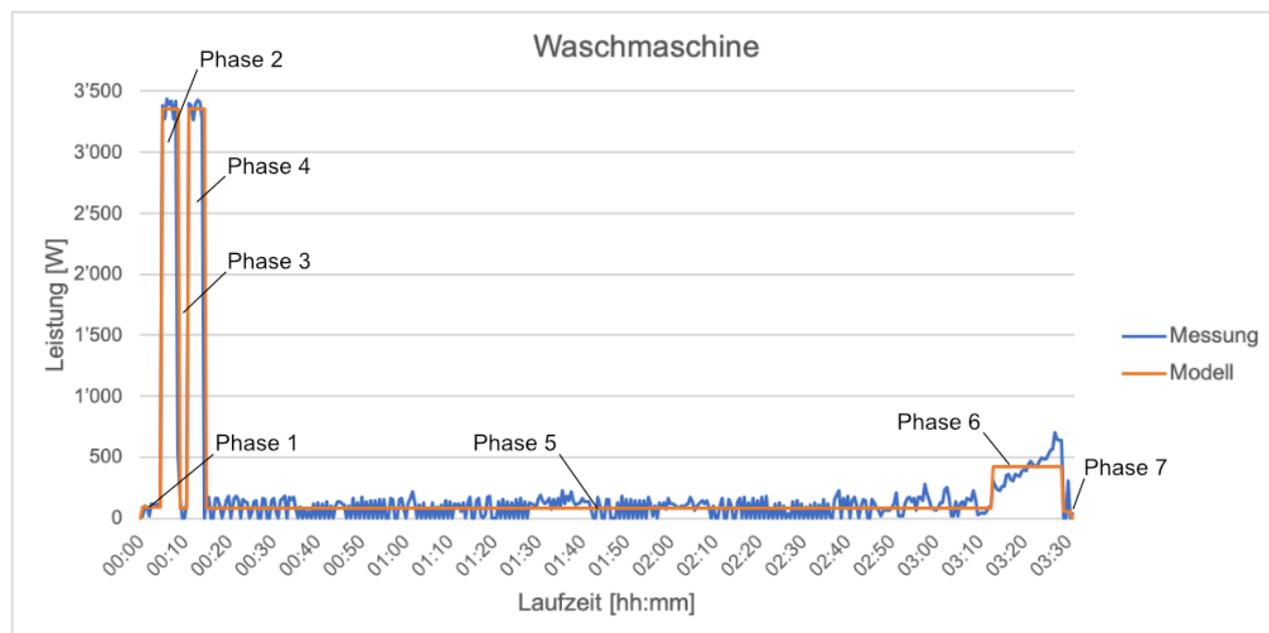


Abbildung 15: Lastprofil Waschmaschine

Gleich zu Beginn heizt die Waschmaschine das Wasser auf (Phase 2 und 4). Darauf folgt eine lange Phase mit niedriger Leistung (Phase 5). Gegen Ende des Programmes wird die Wäsche geschleudert (Phase 6).

Quelle: Hochschule Luzern

Mit dem Modell kann in jedem Zeitschritt die benötigte elektrische Leistung der Waschmaschine P_{WM} anhand des Lastprofils ermittelt werden.

Einflussnahme des EMS

Das EMS erhält täglich ein Zeitfenster, in dem es die Waschmaschine starten kann. Zusätzlich wird eine Zeit vorgegeben, wann die Waschmaschine spätestens gestartet werden muss, auch wenn kein Überschuss vorhanden ist.

Die Modellparameter zur Waschmaschine sind im Anhang 2 ausführlich aufgelistet.

3.2.8. Tumbler

Das Modell Adora TS WTATSWPHi von V-ZUG dient als Grundlage für das Lastprofil des Tumblers. Dieses Produkt wurde ausgewählt, weil es im GEE Live eingebaut ist und es dem Stand der Technik entspricht. Gemessen wurde das Standard-Baumwollprogramm «Standardprogramm». Die Gesamtlaufzeit des Standardprogramms beträgt 58 Min. Das Lastprofil der Messung wurde vereinfacht und auf eine konstante Leistung reduziert.

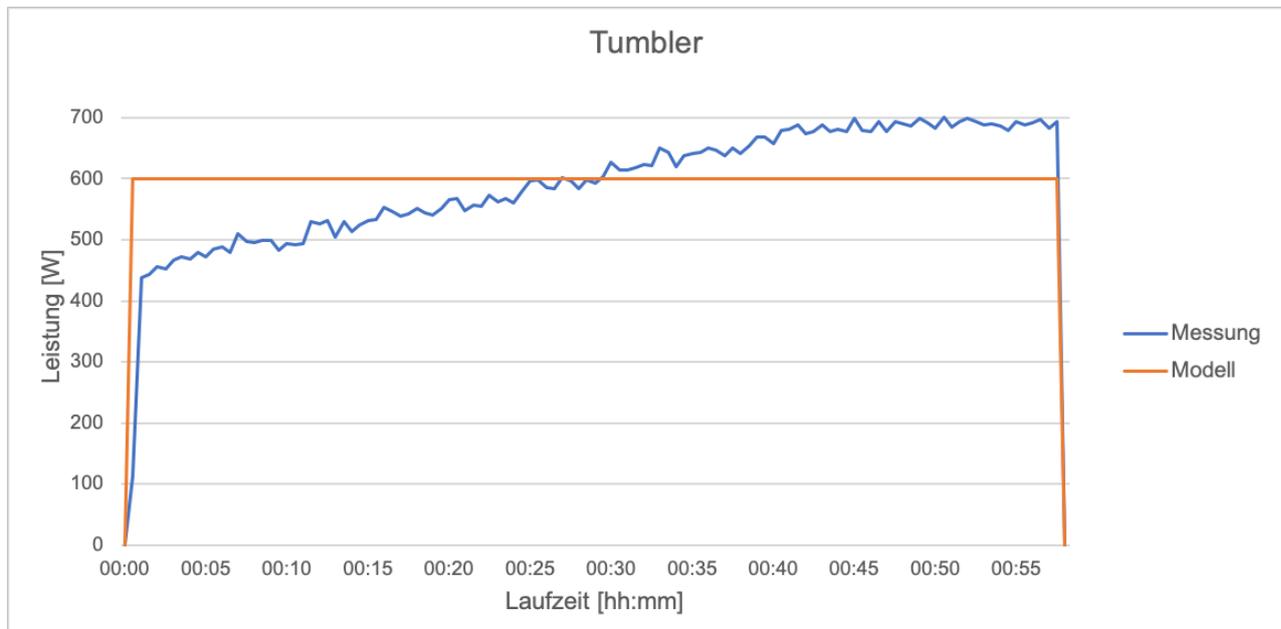


Abbildung 16: Lastprofil Tumbler

Im gemessenen Lastprofil steigt die Leistung kontinuierlich an. Im Modell wird das Lastprofil vereinfacht als Rechteck abgebildet. Quelle: Hochschule Luzern

Mit dem Modell kann in jedem Zeitschritt die benötigte elektrische Leistung des Tumblers P_{TU} anhand des Lastprofils ermittelt werden.

Einflussnahme des EMS

Das EMS erhält täglich ein Zeitfenster, in dem es den Tumbler starten kann. Zusätzlich wird eine Zeit vorgegeben, wann der Tumbler spätestens gestartet werden muss, auch wenn kein Überschuss vorhanden ist.

Die Modellparameter zum Tumbler sind im Anhang 2 ausführlich aufgelistet.

3.2.9. Ladestation Elektroauto

Für das Modell wird die Ladestation Keba p30x verwendet. Dieses Produkt wird von EMS wie z. B. SMARTFOX PRO, Solar Manager, SOLARWATT EnergyManager, oder Solar-Log Base und weiteren unterstützt. Der maximale Ladestrom der Ladestation beträgt 32 A. Bei einem 3-phasigen Anschluss ergibt das eine Ladeleistung von 22 kW [25].

Als Elektroauto wurde das Model 3 von Tesla ausgewählt. Im Jahr 2019 war es das meistverkaufte Elektroauto in der Schweiz [26]. Geladen werden kann es mit maximal 11 kW. In der Ausführung Standard Range Plus hat der Tesla eine Akkukapazität K_{Nenn} von 53 kWh und gemäss WLTP einen Verbrauch von 14.3 kWh/100 km [27]

Das Elektroauto wird hauptsächlich von der Mutter genutzt. Ihre An- und Abwesenheiten bestimmen wann und wie lange das Auto geladen werden kann. Die gefahrenen Strecken geben die verbrauchte Kapazität vor.

Bei einem rein elektrisch angetriebenen Auto werden heute Lithium-Ionen-Akkus eingebaut [28]. Die Akkus werden mit dem CCCV-Ladeverfahren (CCCV = Constant Current, Constant Voltage) geladen.

Der Ladevorgang ist in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase wird der Akku mit einem konstanten Strom geladen. Mit steigender Kapazität erhöhen sich der Innenwiderstand und die Akkuspannung. Sobald die maximale Ladespannung erreicht wird, schaltet der Ladevorgang auf die zweite Phase um. Nun bleibt die Spannung konstant. Bei voller werdendem Akku führt das zu einem sinkenden Ladestrom. Wenn die vom Akku vorgegebene Grenze unterschritten wird, ist der Akku vollgeladen [28].

Der Ladevorgang wird vom Batterie-Management-System des Elektroautos überwacht und es bestimmt den Ablauf und den Ladezustand (SOC = State of Charge) [28].

Der Wechsel von Phase 1 zu Phase 2 findet nicht immer zum gleichen Zeitpunkt bzw. Ladezustand statt. Er ist von der Batterietemperatur und der Ladeleistung abhängig [29].

Das Ladeverfahren wird im Modell stark vereinfacht abgebildet. In der ersten Phase wird das Elektroauto mit einer konstanten Ladeleistung P_{Car} geladen, bis zum Ladezustand $\text{SOC} = 80\%$. Die Ladeleistung entspricht hier der maximal zulässigen Ladeleistung des Elektroautos.

Danach startet die 2. Phase. Hier sinkt die Ladeleistung linear, bis der Akku vollgeladen ist. Das Modell des Ladevorgangs ist in Abbildung 17 dargestellt.

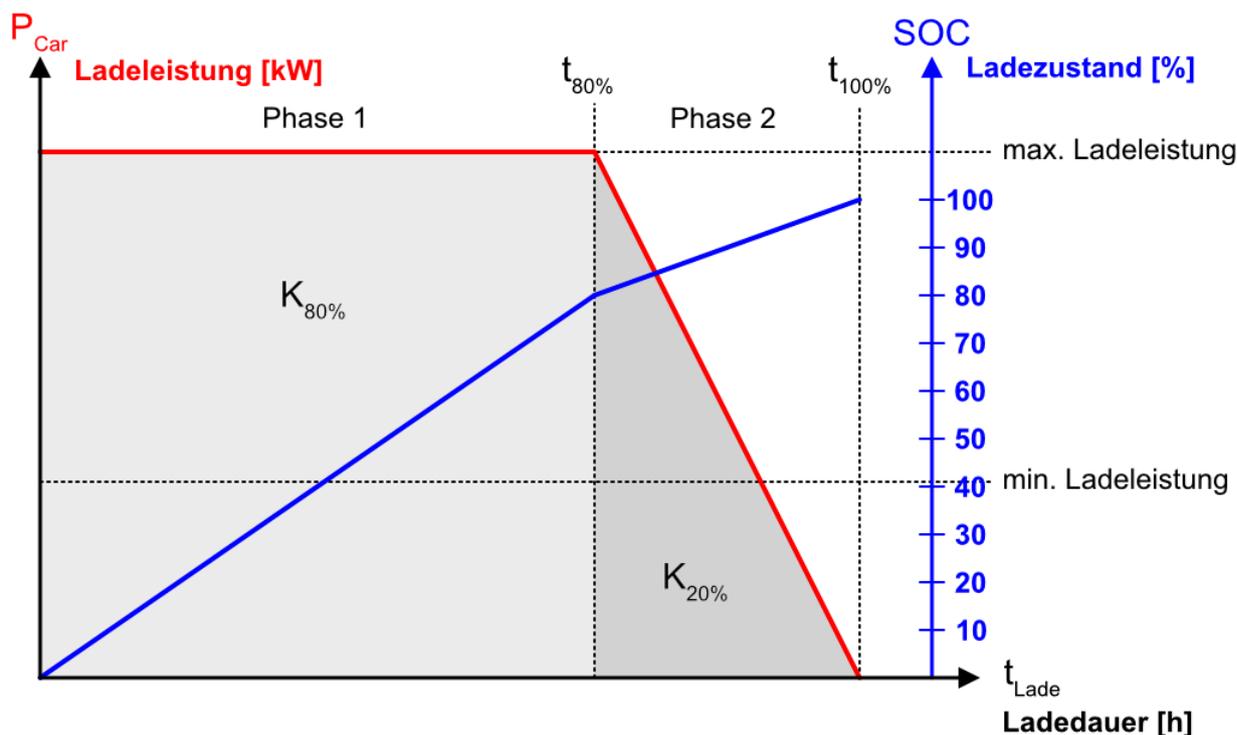


Abbildung 17: Ladevorgang ohne EMS

Die Abbildung zeigt einen kompletten Ladevorgang gemäss Modell. In Phase 1 wird das Elektroauto mit konstanter Leistung geladen. In Phase 2 sinkt die Leistung kontinuierlich, bis das Auto vollgeladen ist. Die grauen Flächen unter der roten Kurve entsprechen der Batteriekapazitäten (80% und 20% der Gesamtkapazität). Quelle: Hochschule Luzern

Einflussnahme des EMS

Das EMS gibt der Ladestation vor, mit welchem Ladestrom das Auto geladen werden soll. Die Ladung startet aber erst, wenn die Ladeleistung P_{Car} die minimale Ladeleistung erreicht hat. In der SN EN 61851-1 ist eine minimale Stromaufnahme vom Fahrzeug von 6 A pro Phase vorgeschrieben. Bei einem dreiphasigen Anschluss ergibt das eine minimale Ladeleistung von 4.1 kW [30].

Die Ladekurve verläuft nun nicht mehr linear, sondern nach Vorgabe des EMS.

In Abbildung 18 ist dargestellt, wie so eine Ladekurve aussehen könnte.

In Phase 1 wird das Auto nach den Vorgaben des EMS geladen, sofern sie über der minimalen Ladeleistung liegt. In Phase 2 sinkt die Ladeleistung linear und die Vorgabe des EMS wird nur übernommen, wenn sie unterhalb der linearen Ladeleistung liegt (violette Linie). Wenn die Vorgabe des EMS übernommen wird, dann dauert Phase 2 länger (grüne Linie).

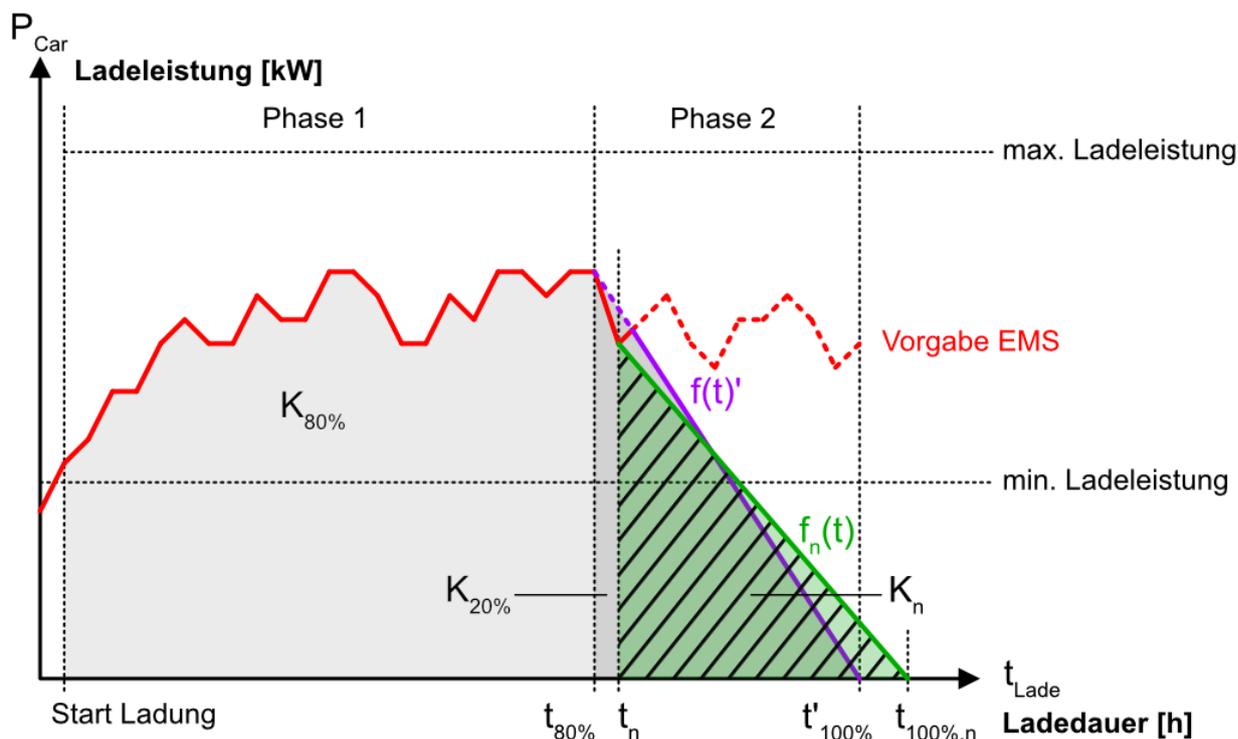


Abbildung 18: Ladevorgang mit EMS

Diese Abbildung zeigt, wie ein kompletter Ladevorgang mit einem EMS aussehen könnte. In der ersten Phase bestimmt das EMS die Ladeleistung, diese muss über der minimalen Ladeleistung liegen, damit das Auto geladen wird. In Phase 2 kann das EMS die Ladeleistung nur bestimmen, wenn sie unterhalb der berechneten violetten Kurve liegt. Tritt dieser Fall ein, dauert die Ladung länger und die Kurve muss neu berechnet werden. Das ergibt dann die grüne Kurve. Dieses Vorgehen wiederholt sich, bis das Elektroauto vollgeladen ist. Quelle: Hochschule Luzern

Das EMS kommuniziert über UDP mit der Ladestation. Aber weder die Ladestation noch das EMS kennen den aktuellen Ladestand SOC des Autos. Deshalb muss die Ladestation jede Nacht freigegeben werden. Dann kann das Elektroauto bei Niedertarif vollgeladen werden, falls es am Tag nicht gereicht hat.

Mit dem Modell kann in jedem Zeitschritt die benötigte elektrische Leistung der Ladestation P_{Car} berechnet werden.

Die ausführlichen Formeln sowie die Parameter zum Modell der Ladestation Elektroauto sind im Anhang 2 aufgeführt.

Details zur Auswahl einzelner Parameter sind im Dokument «Bewertungsverfahren für den Vergleich von Energiemanagementsystemen. Erarbeitung des Bewertungsverfahrens. Vertiefungsarbeit 2» zu finden [19].

3.3. Prüfmethode

Das EFH mit der PV-Anlage und seinen Verbrauchern wird in der Software simuliert. Das EMS wird als reales Gerät in die Simulation miteingebunden. Das EMS und die Simulation kommunizieren, wie in Abbildung 19 dargestellt, über die digitalen Ein- und Ausgänge einer I/O Karte (I/O = Input/Output) und über Ethernet miteinander. Die Simulation sendet Zählerwerte an das EMS. Das EMS verarbeitet die erhaltenen Informationen und gibt Schaltbefehle heraus. Diese werden wiederum von der Simulation übernommen und die entsprechenden Verbraucher werden in der Simulation eingeschaltet. Diese Methode wird als «Hardware in the Loop» (HiL) bezeichnet.

Das EMS ist als reales Gerät eingebunden und normal in Betrieb. Deswegen kann nicht einfach die Simulation durchgerechnet werden und man hat das Resultat, sondern die Prüfung muss in Echtzeit ablaufen.

Diese Prüfmethode bietet mehrere Vorteile. Der Wichtigste ist, dass die Prüfung reproduzierbar ist und immer wieder mit den gleichen Bedingungen wiederholt werden kann. Auch können einzelne Parameter einfach verändert und die Auswirkungen beobachtet werden. Zudem muss nicht ein ganzes Haus mit allen Komponenten aufgebaut werden. Das wäre einerseits aufwändig und andererseits teuer.

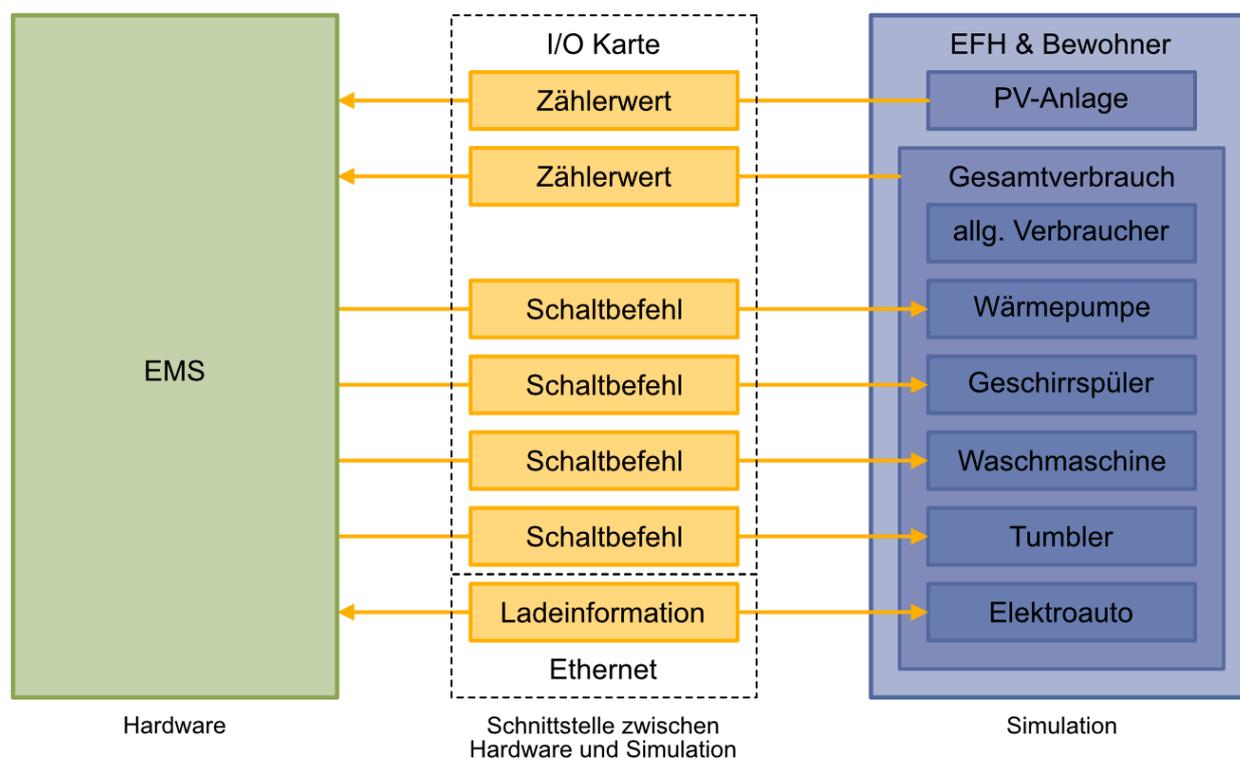


Abbildung 19: Prüfmethode «Hardware in the Loop»

Das EMS wird als «Hardware in the Loop» in das Prüfsystem eingebunden. Über seine Ein- und Ausgänge wird das EMS an die I/O Karte angeschlossen. Mit der Simulationssoftware werden die restlichen Komponenten des Prüfaufbaus simuliert. Quelle: Hochschule Luzern

3.4. Referenzablauf

Im Referenzablauf wird die Prüfung ohne ein EMS durchgeführt. Das bedeutet, der Ablauf wird vorab bestimmt und ändert sich nicht anhand des Überschusses der PV-Anlage. Die Haushaltsgeräte Geschirrspüler, Waschmaschine und Tumbler starten zu festgelegten Zeiten. Das Elektroauto wird mit maximaler Ladeleistung geladen, sobald es zu Hause steht. Und die Wärmepumpe läuft anhand der vordefinierten Aussentemperaturen. Im Sinne der Eigenverbrauchsoptimierung laufen die Haushaltsgeräte am Tag, während die PV-Anlage Energie produziert, und nicht während der Niedertarifzeit in der Nacht. Die Resultate des Referenzablaufs können bei der Bewertung als neutrale Grundlage verwendet werden.

3.5. Prüfdauer

Für eine Prüfung mit wetterabhängigen Komponenten (PV-Anlage, Heizsystem) ist es naheliegend, ein ganzes Kalenderjahr abzubilden. So hat man alle Jahreszeiten miteinbezogen. Da aber dieses Prüfverfahren in Echtzeit abläuft, würde die Prüfung eines einzelnen EMS ein ganzes Jahr dauern. Das wäre nicht praktikabel.

Damit trotzdem alle Jahreszeiten berücksichtigt werden, gibt es drei Teilprüfungen, eine für den Winter, eine für die Übergangszeit und eine für den Sommer. Der Frühling und der Herbst werden zu einer Jahreszeit zusammengefasst, weil davon ausgegangen wird, dass sie in Bezug auf PV-Erzeugung und Heizbedarf gleich sind. Jeder dieser Teile dauert eine Woche und ist eine in sich abgeschlossene Prüfung. Das heisst, für jeden Teil gelten neue Startbedingungen und es gibt ein Teilresultat. Die Prüfdauer für ein EMS beträgt somit drei Wochen. Die Startbedingungen sind im Anhang für die einzelnen Komponenten definiert.

Jede Teilprüfung startet am Montag um 00:00 Uhr und endet sieben Tage später am Sonntag um 23:59 Uhr



Abbildung 20: Schematische Darstellung der Prüfdauer

Das Prüfverfahren besteht aus drei Teilprüfungen. Jeder Teil repräsentiert eine Jahreszeit, wobei der Frühling und der Herbst als eine Jahreszeit betrachtet werden. Eine Teilprüfung dauert sieben Tage. Quelle: Hochschule Luzern

Ob diese Prüfdauer sinnvoll ist, konnte noch nicht beurteilt werden, da das Bewertungsverfahren nicht ausführlich getestet werden konnte. Die Gründe dazu werden in Kapitel 5 beschrieben.

3.6. Bewertung

Die Bewertung setzt sich aus den vier Grössen Eigenverbrauchsanteil, Autarkiegrad, Energiekosten und Systemkosten zusammen. Diese vier Werte werden separat aufgeführt und nicht zu einem Gesamtergebnis zusammengefügt. Der Eigenverbrauchsanteil, der Autarkiegrad und die Energiekosten werden pro Teilprüfung gemessen bzw. berechnet und dann je zu einem Gesamtergebnis zusammengerechnet. Dieses Gesamtergebnis wird gewichtet.

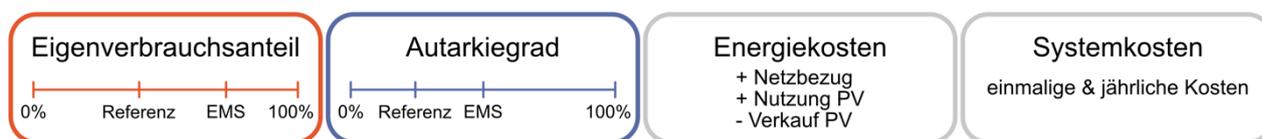


Abbildung 21: Zusammensetzung Bewertung

Die Bewertung setzt sich aus den vier Grössen Eigenverbrauchsanteil, Autarkiegrad, Energiekosten und Systemkosten zusammen. Diese vier Werte werden separat aufgeführt und nicht zu einem Gesamtergebnis zusammengefügt. Quelle: Hochschule Luzern

Gewichtung der Teilresultate

Die drei Teilprüfungen repräsentieren die drei Jahreszeiten Winter, Übergangszeit (Frühling und Herbst) und Sommer. Nun stellt sich die Frage, welche und wie viele Monate werden von der jeweiligen Jahreszeit repräsentiert. Denn anhand dieser Anzahl Monate erfolgt die Gewichtung der Teilresultate für das Gesamtergebnis.

Die zwölf Monate müssen also den drei Jahreszeiten zugeordnet werden. Dafür gibt es verschiedene Ansätze.

Zuordnung nach meteorologischen Jahreszeiten

Bei den meteorologischen Jahreszeiten dauert jede Jahreszeit 3 Monate (Frühling und Herbst separat). Das bedeutet je 3 Monate Sommer und Winter und 6 Monate Übergangszeit. Dadurch wird die Übergangszeit sehr stark gewichtet.

Zuordnung nach Aussentemperatur

Hier wird von jedem Monat der Monatsmittelwert der Aussentemperatur aufgelistet und folgendermassen zugeordnet:

- Winter: $\leq 5^{\circ}\text{C}$
- Übergang: $> 5^{\circ}\text{C}$ und $< 15^{\circ}\text{C}$
- Sommer: $\geq 15^{\circ}\text{C}$

Zuordnung nach Anteilen unter der Heizgrenze

Hier wird von jedem Monat berechnet, wie gross der Anteil der Werte ist, die $\leq 12^{\circ}\text{C}$ sind. Die Zuordnung erfolgt nach folgenden Kriterien:

- Winter: $\geq 90\%$
- Übergang: $> 25\%$ und $< 90\%$
- Sommer: $\leq 25\%$

Zuordnung nach Einstrahlung

Hier wird der Monatsmittelwert der Einstrahlung berechnet und gemäss diesen Merkmalen zugeordnet:

Winter: $\leq 100 \text{ W/m}^2$
 Übergang: $> 100 \text{ W/m}^2$ und $< 200 \text{ W/m}^2$
 Sommer: $\geq 200 \text{ W/m}^2$

Die Zuordnung nach diesen vier Ansätzen wurde in Tabelle 1 vorgenommen und farblich gekennzeichnet. Die Temperatur- und Einstrahlungswerte stammen aus den Meteodaten für den Standort Zürich Kloten.

Tabelle 1: Zuordnung Jahreszeiten. Quelle: [31]

Monat	meteorologischen Jahreszeiten	Temperatur Mittelwert [°C]	Temperatur Anteil $\leq 12^\circ\text{C}$	Einstrahlung Mittelwert [W/m ²]
Januar	Winter	1.1°C	99.9%	39.7 W/m ²
Februar	Winter	1.7°C	98.4%	75.0 W/m ²
März	Frühling	5.7°C	90.1%	126.5 W/m ²
April	Frühling	9.7°C	68.2%	178.5 W/m ²
Mai	Frühling	14.0°C	35.8%	207.5 W/m ²
Juni	Sommer	17.9°C	14.7%	229.2 W/m ²
Juli	Sommer	19.4°C	7.3%	223.2 W/m ²
August	Sommer	18.8°C	8.3%	195.4 W/m ²
September	Herbst	14.3°C	33.4%	144.9 W/m ²
Oktober	Herbst	10.1°C	64.9%	82.3 W/m ²
November	Herbst	4.9°C	96.2%	45.9 W/m ²
Dezember	Winter	1.9°C	99.6%	32.0 W/m ²
Ergebnis	3 W + 6 Ü + 3 S	4 W + 5 Ü + 3 S	5 W + 4 Ü + 3 S	5 W + 4 Ü + 3 S

Legende: Winter (W) Übergang (Ü) Sommer (S)

Für die Zuordnung der Jahreszeiten gibt es nicht eine richtige Lösung. Es ist davon abhängig, worauf man seinen Schwerpunkt legt.

In dieser Arbeit wird die Zuordnung nach der Einstrahlung verwendet. In diesem Bewertungsverfahren geht es um die Eigenverbrauchsoptimierung der PV-Anlage und deren Energieproduktion. Darauf hat die Einstrahlung den grössten Einfluss.



Abbildung 22: Zuordnung der Jahreszeiten

Jeder Monat wird gemäss seiner mittleren Einstrahlung zu einer Jahreszeit zugeordnet. Die Anzahl Monate pro Jahreszeit bestimmen die Gewichtung der Teilresultate. Quelle: Hochschule Luzern

Eigenverbrauchsanteil

Die Aufgabe eines EMS, gemäss Definition in dieser Arbeit, ist es, den Eigenverbrauch zu optimieren. Das heisst, möglichst viel von der Energie, die mit der PV-Anlage produziert wird, soll im Gebäude verbraucht werden. Und möglichst wenig von dieser Energie soll ins Netz zurückgespiessen werden.

Wie gut ein EMS diese Aufgabe löst, kann anhand des Eigenverbrauchsanteil (EVA) gemessen werden. Der Eigenverbrauchsanteil ist wie folgt definiert [2]:

$$\text{Eigenverbrauchsanteil} = \frac{\text{Eigenverbrauch [kWh]}}{\text{Produktion [kWh]}} \quad (3.13)$$

Der Eigenverbrauch wird durch die Differenz von Produktion und Rückspeisung ermittelt.

$$\text{Eigenverbrauch [kWh]} = \text{Produktion [kWh]} - \text{Rückspeisung [kWh]} \quad (3.14)$$

Diese Formel kann vereinfacht werden, je nachdem ob gerade Unter- oder Überproduktion herrscht.

Bei Unterproduktion ist die Produktion kleiner als der Gesamtverbrauch. Das bedeutet die gesamte Produktion wird verbraucht und nichts ins Netz zurückgespiessen. Die Rückspeisung ist gleich 0. Im Fall von Unterproduktion gilt

$$\text{Eigenverbrauch [kWh]} = \text{Produktion [kWh]} \quad (3.15)$$

Bei Überproduktion ist die Produktion grösser als der Gesamtverbrauch. Das bedeutet der gesamte Verbrauch kann mit der eigenen Produktion gedeckt werden und die überschüssige Energie wird ins Netz zurückgespiessen. Im Fall von Überproduktion gilt

$$\text{Eigenverbrauch [kWh]} = \text{Gesamtverbrauch [kWh]} \quad (3.16)$$

Mit der Angabe des Eigenverbrauchsanteils wird indirekt auch angegeben, wie gross der Anteil der Rückspeisung ist. Die beiden Anteile ergeben zusammen 100%, was der PV-Produktion entspricht.

Die drei Teilresultate des Eigenverbrauchsanteils werden aufgelistet, gewichtet und der arithmetische Mittelwert wird gebildet. Daneben werden die Anteile vom Eigenverbrauch und der Rückspeisung als Balken dargestellt, die zusammen 100% ergeben.

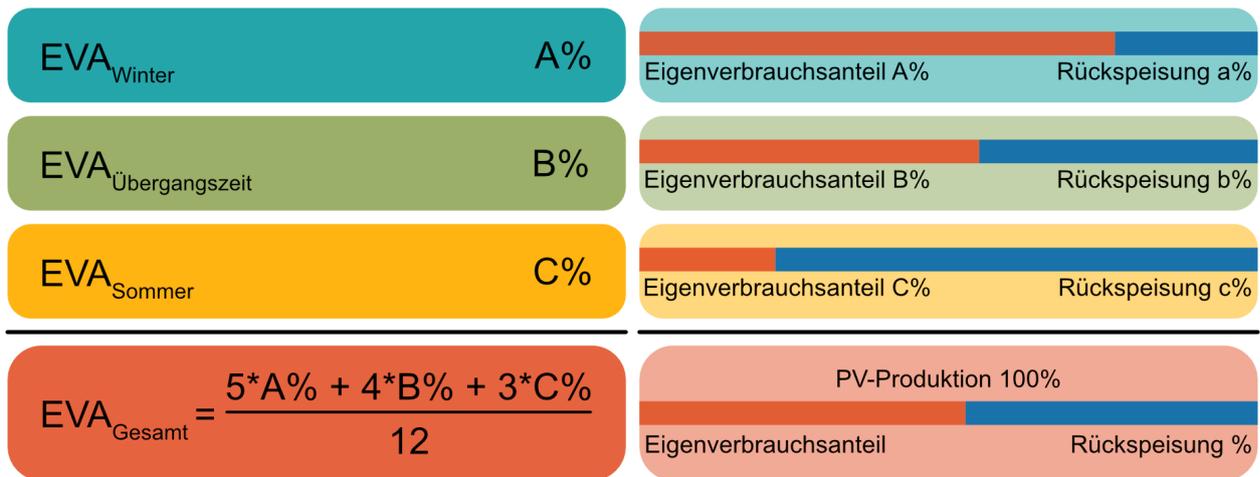


Abbildung 23: Bewertung Eigenverbrauchsanteil
Links werden die drei Teilresultate angegeben und es wird ein gewichteter arithmetischer Mittelwert gebildet. Rechts im Bild sind die Anteile vom Eigenverbrauch und der Rückspeisung als Balken dargestellt, die zusammen 100% ergeben. Quelle: Hochschule Luzern

Autarkiegrad

Der Autarkiegrad ist eine weitere Grösse, die im Zusammenhang mit Photovoltaik oft verwendet wird. Beim Autarkiegrad wird der Eigenverbrauch ins Verhältnis zum Gesamtverbrauch gesetzt und gibt den Grad der Unabhängigkeit vom öffentlichen Stromnetz an. Der Autarkiegrad gibt an, wie viel vom Gesamtverbrauch mit eigener PV-Energie abgedeckt werden konnte. Der Autarkiegrad ist wie folgt definiert [2]:

$$\text{Autarkiegrad} = \frac{\text{Eigenverbrauch [kWh]}}{\text{Gesamtverbrauch [kWh]}} \quad (3.17)$$

Durch die Angabe des Autarkiegrades wird indirekt auch angegeben, wie gross der Anteil des Netzbezuges ist. Die beiden Anteile ergeben zusammen 100%, was dem Gesamtverbrauch entspricht.

Die drei Teilresultate des Autarkiegrades werden aufgelistet, gewichtet und der arithmetische Mittelwert wird gebildet. Daneben werden die Anteile vom Autarkiegrad und dem Netzbezug als Balken dargestellt, die zusammen 100% ergeben.

Der Netzbezug wird zusätzlich in Bezug während Hoch- oder Niedertarif aufgeteilt. Die Tarifzeiten sind vom Netzbetreiber abhängig. Da sich das EFH in diesem Bewertungsverfahren in Zürich Kloten befindet, werden die Tarifzeiten von den Industriellen Betrieben Kloten genommen. Der Hochtarif gilt Montag bis Freitag von 07:00 – 21:00 Uhr und am Samstag von 07:00 – 13:00 Uhr. Zu den übrigen Zeiten gilt der Niedertarif [32].

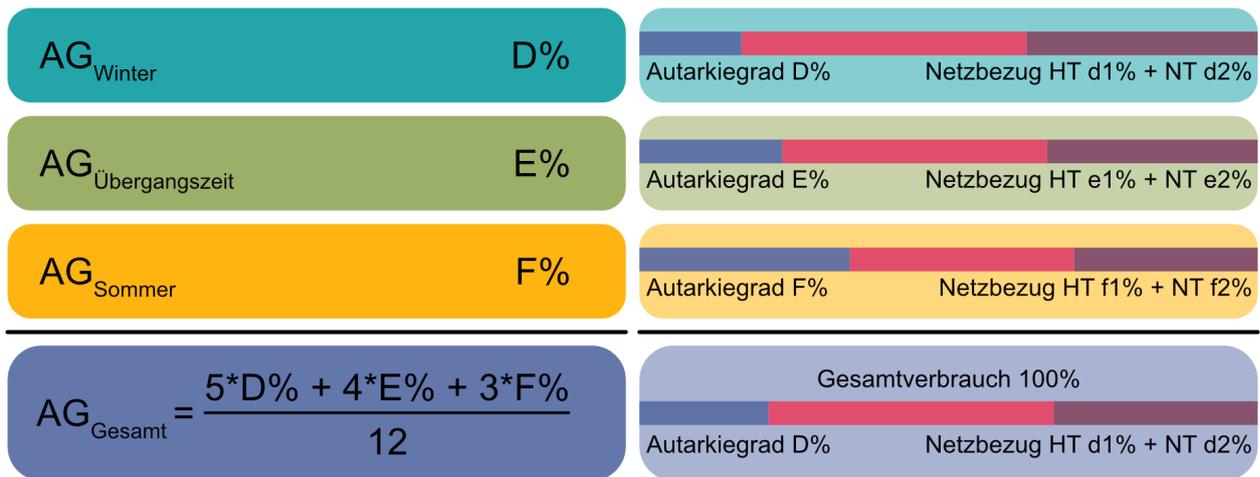


Abbildung 24: Bewertung Autarkiegrad

Links werden die drei Teilresultate angegeben und es wird ein gewichteter arithmetischer Mittelwert gebildet. Rechts im Bild sind die Anteile vom Autarkiegrad und dem Netzbezug als Balken dargestellt, die zusammen 100% ergeben. Der Netzbezug ist zusätzlich nach Hoch- und Niedertarif aufgeteilt. Quelle: Hochschule Luzern

Energiekosten

Die Energiekosten umfassen die Kosten, die für die Energie während einer Woche anfallen würden. Das beinhaltet die Kosten für den Netzbezug während Hoch- und Niedertarifzeiten, die Kosten für die selbst genutzte PV-Energie und den Ertrag für die verkaufte PV-Energie (entspricht Rückspeisung).

Tabelle 2: Energiekosten. Quelle: [32] [33]

Tarif	Energiemenge	Preis	Energiekosten
Netzbezug Hochtarif	E_{NetzHT} in kWh	22.13 Rp./kWh	K_{NetzHT} in CHF
Netzbezug Niedertarif	E_{NetzNT} in kWh	19.27 Rp./kWh	K_{NetzNT} in CHF
Nutzung PV-Energie	E_{EV} in kWh	16.7 Rp./kWh	K_{EV} in CHF
Verkauf PV-Energie	$E_{\text{Rück}}$ in kWh	5.75 Rp./kWh	$K_{\text{Rück}}$ in CHF

Zur Berechnung der Energiekosten werden die Energiemenge mit dem zugehörigen Preis multipliziert. Die Kosten für den Netzbezug und die Nutzung der PV-Energie werden addiert. Davon werden dann die eingenommenen Kosten für die Rückspeisung subtrahiert. Diese Berechnung wird für jede Teilprüfung separat durchgeführt. Der Zeitraum beträgt jeweils 1 Woche.

Kosten Netzbezug Hochtarif	+ K_{NetzHT}	CHF
Kosten Netzbezug Niedertarif	+ K_{NetzNT}	CHF
Kosten Nutzung PV-Energie	+ K_{EV}	CHF
Verkauf PV-Energie	- $K_{\text{Rück}}$	CHF
<hr/>		
Energiekosten Teilprüfung	K_{Energie}	CHF

Abbildung 25: Berechnung Energiekosten

Die Kosten für den Netzbezug und die Nutzung der PV-Anlage werden addiert. Der Ertrag aus dem Verkauf von PV-Energie wird subtrahiert. Das ergibt die gesamten Energiekosten einer Teilprüfung (Zeitraum 1 Woche). Quelle: Hochschule Luzern

Wie beim Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad werden diese Kosten in jeder Teilprüfung berechnet. Aus den Teilresultaten wird ebenfalls ein gewichteter arithmetischer Mittelwert gebildet.

Energiekosten Winter	$K_{\text{Energie,W}}$	CHF
Energiekosten Übergangszeit	$K_{\text{Energie,Ü}}$	CHF
Energiekosten Sommer	$K_{\text{Energie,S}}$	CHF
<hr/>		
$K_{\text{Energie,ges}}$	$\frac{5 \cdot K_{\text{Energie,W}} + 4 \cdot K_{\text{Energie,Ü}} + 3 \cdot K_{\text{Energie,S}}}{12}$	CHF

Abbildung 26: Bewertung Energiekosten

Die Energiekosten der drei Teilprüfungen werden gewichtet und der arithmetische Mittelwert wird gebildet. Quelle: Hochschule Luzern

Die drei Bewertungen nach Eigenverbrauchsanteil, Autarkiegrad und Energiekosten werden auch für den Referenzablauf vorgenommen. Anhand der Resultate können die EMS dann untereinander oder mit dem Referenzablauf verglichen werden.

Beim Vergleich mit dem Referenzablauf kann einerseits geprüft werden, ob ein EMS seinen Zweck erfüllt. Da das EMS den Eigenverbrauch erhöhen soll, sollte sein Eigenverbrauchsanteil höher sein als derjenige der Referenz. Andererseits sieht man beim Vergleich der beiden Resultate, wie viel besser ein EMS abschneidet als die Referenz.

Systemkosten

Der Hersteller eines geprüften EMS wird für eine Offerte angefragt. Er soll alle Produkte, Software, Lizenzen und jährlichen Kosten offerieren, die für den Prüfaufbau mit seinem EMS notwendig sind. Dazu zählen das Steuergerät, Zusatzgeräte mit Schaltkontakten oder auch Zähler. Die Kosten für die Installation, die Inbetriebnahme und Kleinmaterial (Klemmen, Drähte, Schrauben usw.) werden nicht berücksichtigt.

Der Preis des Herstellers wird dann als Zusatzinformation zu den anderen Resultaten hinzugefügt. Es wird auch angegeben, wann der Preis angefragt wurde.

Bei den Systemkosten handelt es sich lediglich um einen Richtwert. Falls man sich dieses System beschaffen möchte, muss man sich beim Hersteller nach dem aktuellen und auf sein Projekt passenden Preis erkundigen.

Die EMS sollen nicht in erster Linie nach dem Preis bewertet werden, aber wenn zwei EMS gleich auf sind, liefert es einen weiteren Entscheidungsfaktor.

Kosten Hardware	h CHF
Kosten Software	s CHF
Kosten Lizenzen	l CHF
<hr/>	
einmalige Kosten	$h \text{ CHF} + s \text{ CHF} + l \text{ CHF}$
jährliche Kosten	u CHF/a

Abbildung 27: Zusammensetzung Bewertung Preis

Der Hersteller wird für die einmaligen und jährlichen Kosten seines EMS angefragt. Die einmaligen Kosten setzen sich aus den Kosten für Hardware, Software und Lizenzen zusammen. Quelle: Hochschule Luzern

4. Prüfaufbau

Im Kapitel 3 wurde das Bewertungsverfahren auf einer theoretischen Ebene beschrieben. In diesem Kapitel geht es nun um die konkrete Umsetzung der Methode. Es wird beschrieben, welche Hard- und Software verwendet wird und mit welchen Schnittstellen diese beiden verbunden werden. Es resultiert ein Prüfaufbau, der es ermöglicht, unterschiedliche EMS einzubauen und zu testen.

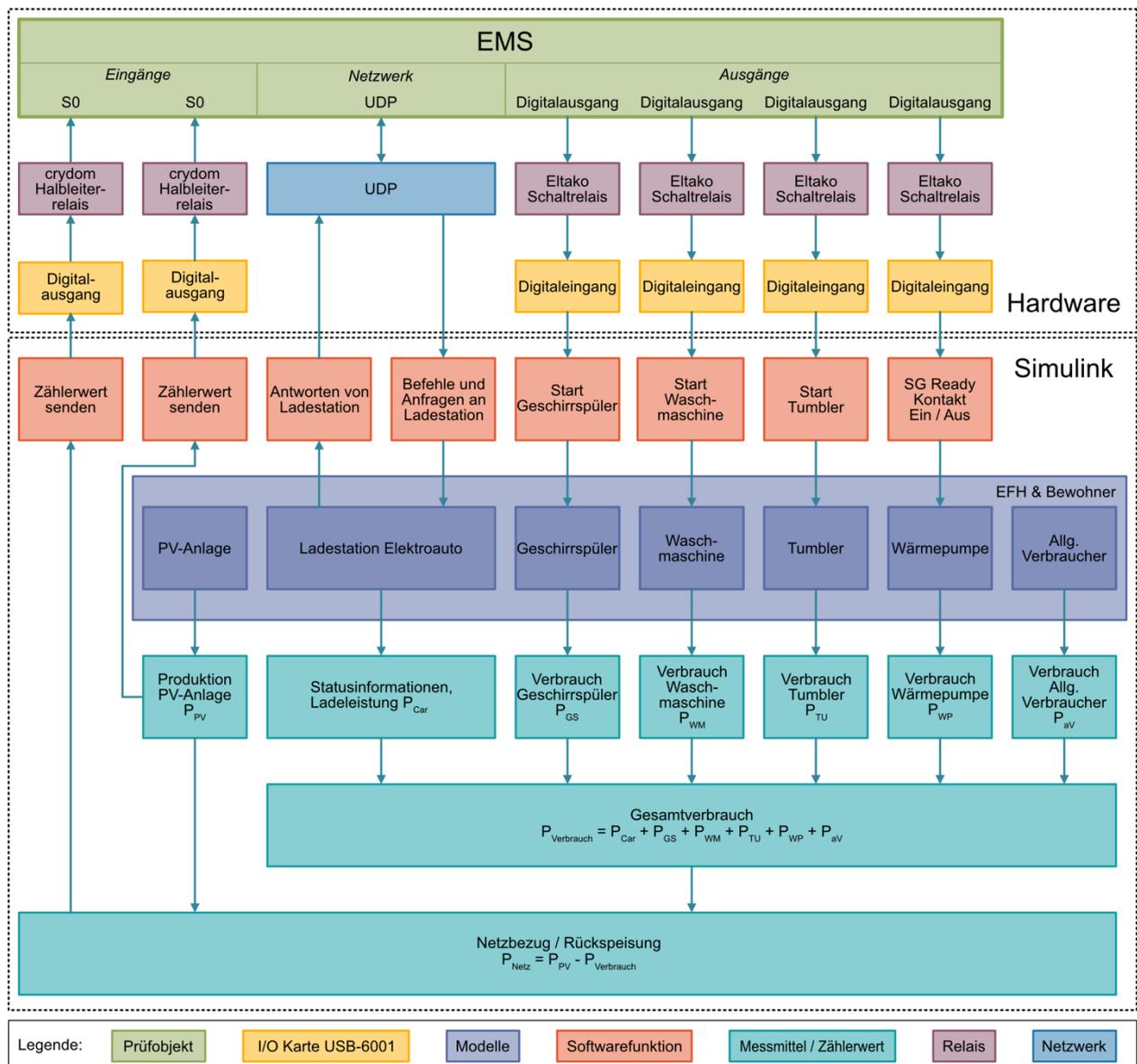


Abbildung 28: Blockschema Prüfaufbau mit Produkten

Dieses Blockschema zeigt den gesamten Prüfaufbau mit den Produkten, die für die Umsetzung benötigt werden. Die Pfeile zeigen den Informationsverlauf. Im grünen Block ist das Prüfbjekt mit seinen Schnittstellen abgebildet. Die UDP-Schnittstelle wird mit dem Netzwerk verbunden (blau). Die übrigen Schnittstellen werden mit den Schnittstellen der I/O Karte verbunden (gelbe Blöcke). Dazwischen werden aber jeweils ein Halbleiter- oder ein Schaltrelais geschaltet (weinrote Blöcke). Die Modelle sind in den violetten Blöcken eingezeichnet. In den türkisenen Blöcken stehen die Zählerwerte, die berechnet werden. Die roten Blöcke stehen für Schritte, die die Software ausführt. Quelle: Hochschule Luzern

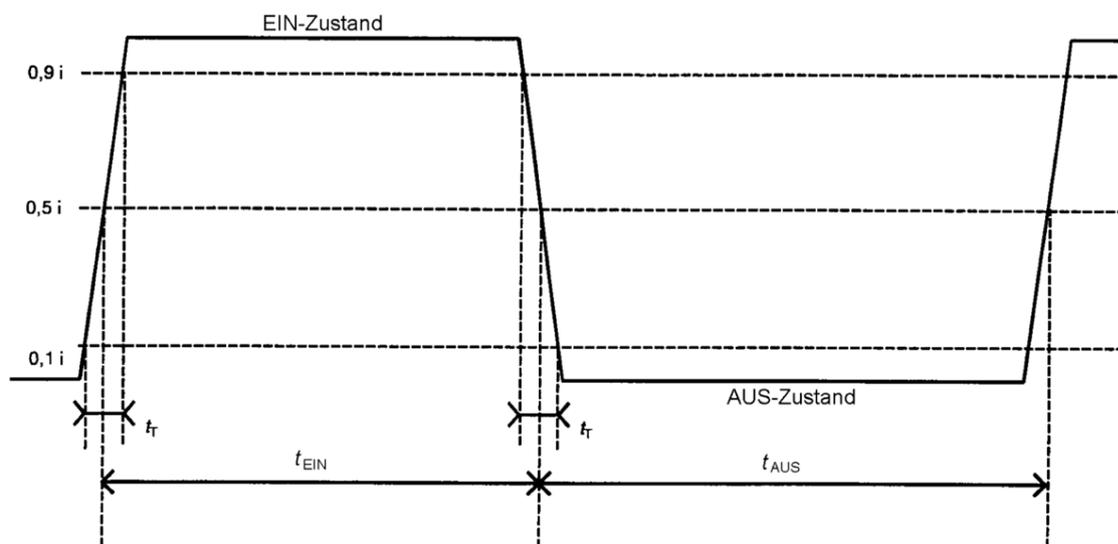
4.1. Schnittstellen

4.1.1. S0

Die S0-Schnittstelle wird genutzt, um die Zählerwerte von der Simulation an das EMS zu senden. In der Norm SN EN 62053-31 ist die S0-Schnittstelle definiert [34].

Der Zähler misst die Energie und sendet einen Impuls, sobald ein vorgegebener Energiewert erreicht wird. Ein üblicher Impulswert ist 1000 imp/kWh. Das bedeutet, dass jedes Mal, wenn 1 Wh verbraucht wird, ein Impuls gesendet wird. Wenn z. B. während einer Stunde eine Leistung von 1000 W bezogen wird, dann ergibt das 1 kWh und dafür werden 1000 Impulse gesendet. Das ergibt dann alle 3.6 s einen Impuls. Aus dem Zeitabstand zwischen zwei Impulsen kann die aktuelle Leistung berechnet werden.

Die Norm gibt vor, dass ein Impuls mindestens 30 ms lang sein muss und dass auch die Zeit bis zum nächsten Impuls mindestens 30 ms betragen muss.



Anforderungen: $t_{EIN} \geq 30 \text{ ms}$
 $t_{AUS} \geq 30 \text{ ms}$
 $t_T \leq 5 \text{ ms}$

Abbildung 29: S0-Impuls

Der S0-Impuls setzt sich aus einem EIN- und AUS-Zustand zusammen. Jeder Zustand muss mindestens 30 ms andauern. Üblicherweise werden 1000 Impulse pro kWh gesendet. Quelle: [34]

Die Versorgungsspannung für die S0-Impulse muss von einem externen Gerät stammen. Das heisst, das Gerät, das die Impulse empfängt, ist die Spannungsquelle und nicht das Gerät, das die Impulse sendet. Für den Prüfaufbau bedeutet dies, dass das EMS die Versorgungsspannung zur Verfügung stellen muss und dass die gesendeten S0-Signale spannungsfrei sein müssen [34].

4.1.2. RS485

RS485 wird, wie S0, zur Übermittlung von Zählerwerten genutzt. Anders als bei S0 werden bei RS485 Daten und nicht nur Impulse übertragen. Da das Übertragen von Impulsen weniger komplex ist, wurde zuerst die S0-Schnittstelle umgesetzt. Die RS485-Schnittstelle wurde nicht umgesetzt. Das war im Rahmen dieser Arbeit zeitlich nicht möglich.

4.1.3. UDP

Mit dem User Datagram Protocol (UDP) kommuniziert das EMS mit der Ladestation bzw. mit der Simulationssoftware. Die Kommunikation geht in beide Richtungen. Das EMS sowie die Simulationssoftware sind jeweils Sender und Empfänger von UDP-Paketen.

UDP ist ein Transport-Protokoll, das über das Netzwerk versendet wird. Es arbeitet verbindungslos. Das heisst, der Absender versendet seine Pakete, erhält aber keine Bestätigung, wenn sie angekommen sind. Das macht die Kommunikation zwar unsicher, sie ist dafür aber einfacher und schneller [35].

Damit im Prüfaufbau die Kommunikation über UDP möglich ist, müssen sich das EMS und der PC mit der Simulationssoftware im selben Netzwerk befinden.

4.2. Hardware

4.2.1. I/O Karte

National Instruments bietet eine grosse Auswahl an I/O Karten. Man findet für praktisch jede Anwendung und jedes Budget das richtige Produkt. Die I/O Karte für das Bewertungsverfahren benötigt mindestens zwei digitale Ausgänge für die S0-Zähler «PV-Produktion» und «Netzbezug / Rückspeisung». Diese digitalen Ausgänge müssen mindestens im Takt von 30 ms schalten, da dies für die S0-Schnittstelle gefordert ist.

Für die Relais der geschalteten Verbraucher Geschirrspüler, Waschmaschine, Tumbler und Wärmepumpe werden vier digitale Eingänge benötigt. Bei diesen ist es ausreichend, wenn sie im Sekundentakt schalten können. Denn die Verbraucher werden nicht so oft ein- und ausgeschaltet.

Diese Eigenschaften wurden in der Karte USB-6001 gefunden. Die Karte verfügt über 13 digitale Ein- bzw. Ausgänge (wählbar) und wird mittels USB an den Computer angeschlossen. Zusätzlich bietet sie 8 analoge Eingänge und 2 analoge Ausgänge [36].



Abbildung 30: USB-6001
Produktbild der ausgewählten I/O Karte
USB-6001 von National Instruments.
Quelle: [59]

4.2.2. Schaltrelais

Die EMS schalten die Verbraucher über digitale Ausgänge oder eingebaute Relais. Die Ausgangsspannungen und Schaltleistungen sind da sehr unterschiedlich. Beim SMART-FOX PRO z. B. liegt die Ausgangsspannung bei 250 V AC [37], beim EKZ einfachSolar hingegen bei nur 24 V DC [38]. Um diese Differenzen auszugleichen, wird pro Verbraucher ein Schaltrelais zwischen das EMS und die I/O Karte geschaltet.

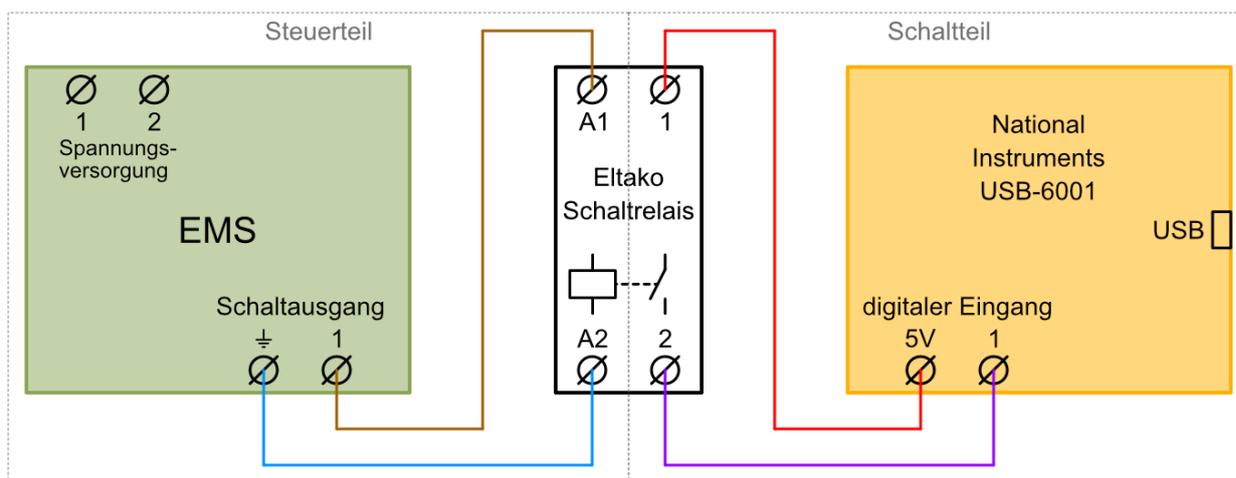


Abbildung 31: Schaltrelais

Das Schaltrelais (in der Mitte) wird vom Schaltausgang des EMS angesteuert. Der Relaiskontakt wird geschlossen, wenn eine Steuerspannung anliegt. Dadurch wird auch der digitale Eingang der I/O Karte geschlossen. Quelle: Hochschule Luzern

Der Schaltausgang des EMS wird auf die Steuerkontakte A1 und A2 des Schaltrelais geführt. Das Schaltrelais kann mit einer universalen Steuerspannung von 8 – 230 V arbeiten [39]. Das bedeutet, es funktioniert mit Gleichstrom (DC) oder Wechselstrom (AC). Wenn eine Steuerspannung anliegt, also der EMS-Kontakt geschlossen ist, wird der Relaiskontakt geschlossen und somit auch der digitale Eingang an der I/O Karte.

Das Schaltrelais arbeitet potenzialfrei. Das heisst, dass zwischen Steuer- und Schaltteil keine elektrisch leitende Verbindung besteht. Das ermöglicht es, verschiedene EMS mit unterschiedlichen Ausgangsspannungen in den Prüfaufbau einzubauen, ohne dass sich das Spannungsniveau für die I/O Karte verändert.

Für den Prüfaufbau wird das Produkt ER12DX-UC von Eltako GmbH verwendet. Pro Verbraucher wird ein Schaltrelais eingebaut, das ergibt für den Prüfaufbau vier Stück.



Abbildung 32: Eltako ER12DX-UC Produktbild des ausgewählten Schaltrelais ER12DX-UC von Eltako. Quelle: [60]

4.2.3. Halbleiterrelais

In der Norm SN EN 62053-31 ist für die S0-Schnittstelle definiert, dass die Versorgungsspannung für die Impulsausgabe von einem externen Gerät stammen muss [34]. Da die Zähler simuliert und die S0-Impulse über die I/O Karte ausgegeben werden, ist das EMS das externe Gerät und liefert die Versorgungsspannung.

Die S0-Impulse werden über die digitalen Ausgänge der I/O Karte gesendet und diese geben eine Spannung von 3.3 V DC aus. Die S0-Signale sollten aber spannungsfrei sein. Um das zu erreichen wird ein Halbleiterrelais zwischen die I/O Karte und das EMS geschaltet.

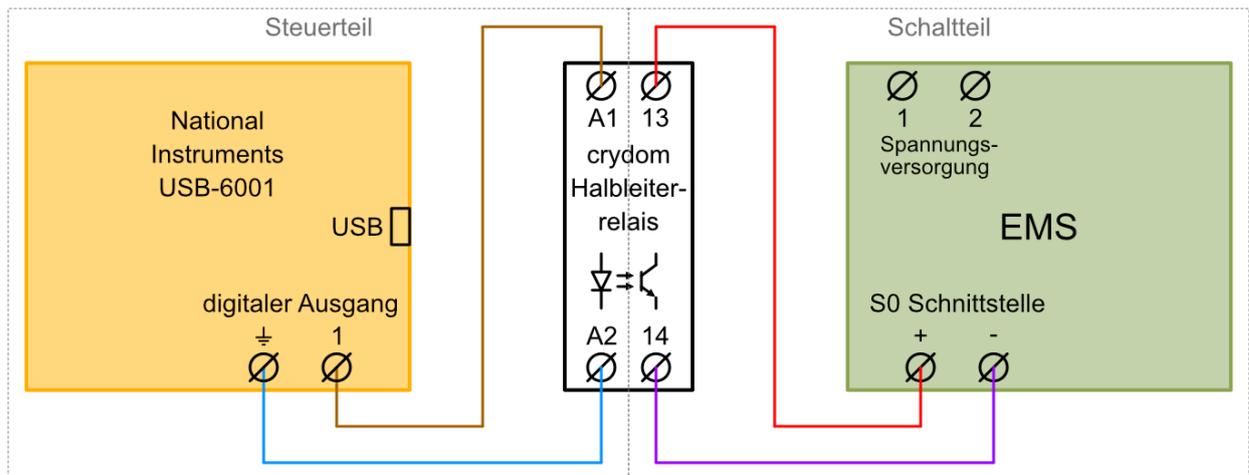


Abbildung 33: Halbleiterrelais

Das Halbleiterrelais (in der Mitte) wird vom digitalen Ausgang der I/O Karte angesteuert. Der Relaiskontakt wird geschlossen, wenn eine Steuerspannung anliegt. Dadurch wird auch der S0-Eingang am EMS geschlossen. Quelle: Hochschule Luzern

Der digitale Ausgang steuert das Halbleiterrelais über die Kontakte A1 und A2 an. Der Kontakt 13-14 schliesst sich und das EMS empfängt den S0-Impuls.

Wie das Schaltrelais ist auch das Halbleiterrelais galvanisch getrennt. Das Halbleiterrelais ist aber im Gegensatz zum Schaltrelais kein mechanisches Relais, sondern ein Elektronisches ohne bewegte Bauteile. Dadurch kann das Halbleiterrelais schneller und öfter geschaltet werden [40].

Für den Prüfaufbau wird das Produkt DRA-CN024D05 von Crydom Inc. verwendet. Jeder simulierte S0-Zähler benötigt sein eigenes Halbleiterrelais. Bei sechs Zählern ergibt das sechs Halbleiterrelais.



Abbildung 34: Crydom CN024D05
Produktbild des ausgewählten Halbleiterrelais CN024D05 von Crydom. Quelle: [61]

4.3. Software

4.3.1. Software für Meteodaten

Die Meteodaten Aussentemperatur und Einstrahlung Ost und West werden von der Software Meteonorm von der Schweizer Firma Meteotest AG bezogen.

In dieser Arbeit werden die Klimaperioden 2000 – 2019 für die Temperatur und 1996 – 2015 für die Einstrahlung verwendet. Die Daten basieren auf einer Kombination von zuverlässigen Datenquellen (Satellitendaten und Wetterstationen) und hochwertigen Berechnungsmodellen [41].

Pro Jahreszeit wurden sieben aufeinanderfolgende Tage ausgewählt, die die jeweilige Jahreszeit gut repräsentieren.

Im Anhang 5 sind ausgewählten Meteodaten in Diagrammen dargestellt.

4.3.2. Auswahl Simulationssoftware

Mit der Simulationssoftware müssen die Modelle der PV-Anlage und der Verbraucher im EFH umgesetzt werden können. Zusätzlich braucht sie eine Schnittstelle zur Hardware und sie muss externe Signale verarbeiten können, also senden und empfangen. Zur Auswahl standen drei Möglichkeiten: Simulink, LabVIEW und Python.

Um Simulink zu nutzen, wird die Hauptsoftware MATLAB benötigt. MATLAB ist eine Software von The MathWorks, Inc. für numerische Mathematik mit besonderen Stärken in der Vektor- und Matrizenrechnung. Simulink bietet eine grafische Oberfläche zur Modellierung und Simulation von physikalischen Systemen. Die Funktionen der Software können mit zahlreichen Toolboxen erweitert werden [42]. So gibt es auch eine Toolbox für die Schnittstelle zu I/O Karten von National Instruments.

Die Software LabVIEW stammt von National Instruments Corporation. LabVIEW bietet ebenfalls einen grafischen Programmieransatz und die Möglichkeit Hardware in die Simulation miteinzubinden [43].

Python ist im Gegensatz zu Simulink und LabVIEW eine textbasierte Programmiersprache. Python basiert auf einem offenen, gemeinschaftsbasiertem Entwicklungsmodell.

Für diese Master-Thesis wurde Simulink als Simulationssoftware ausgewählt. Da für keine der drei Möglichkeiten Vorkenntnisse vorhanden sind, ist der Einstieg mit einer grafischen Programmiersprache einfacher. Für Simulink sprechen ebenfalls die mathematischen Funktionen die MATLAB bietet. Der Nachteil ist, dass die Softwareintegration der I/O Karte von National Instruments nicht einwandfrei funktioniert, wie festgestellt werden musste.

4.3.3. Simulations- und Echtzeit

Die Simulationszeit ist die Zeitspanne, die simuliert wird. Das bedeutet aber nicht, dass die Durchführung der Simulation auch so lange dauert. Wenn z. B. eine Simulationszeit von 10 s eingegeben wird, dann werden 10 s simuliert. Die Simulation wird aber so schnell durchgeführt, wie es dem Computer möglich ist. Bei einem einfachen System dauert die Simulation dieser 10 s vielleicht nur 2 s. Ist das System komplex dauert es z. B. 15 s. In Simulink wird die Simulationszeit in Sekunden angegeben.

Wenn eine Simulation in Echtzeit durchgeführt wird, dann wird für 1 s der Simulationszeit auch 1 s in der Realität für die Durchführung benötigt. Damit dies funktioniert, müssen der Rechencomputer und die Schnittstellen zur Hardware genügend schnell sein und alles in einem Simulationsschritt rechnen bzw. ausführen können, was erforderlich ist. Zudem muss das Zeitsystem der Simulation ständig mit der realen Zeit abgeglichen werden.

Für das Bewertungsverfahren wird eine Ausführung der Simulation in Echtzeit wegen den S0-Signalen benötigt. Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, wird bei S0 ein Zählerwert mit der Anzahl Impulsen und den zeitlichen Abständen zwischen den Impulsen übermittelt. Ist der zeitliche Abstand grösser oder kleiner als berechnet, so empfängt das EMS einen falschen Zählerwert und das kann die gesamte Eigenverbrauchsoptimierung verfälschen. Zudem wäre es möglich, dass bei einer zweiten Durchführung mit einem anderen EMS die S0-Signale mit anderen zeitlichen Abständen versendet werden. Somit hätten die beiden EMS nicht die gleichen Bedingungen und das Bewertungsverfahren wäre nicht reproduzierbar.

4.3.4. Aufbau Simulation

In Simulink stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, mit denen die Modelle umgesetzt werden können. Nachfolgend werden sie mit Beispielen beschrieben.

Funktionsblöcke, Subsysteme, Modellparameter und die Ausgabe von Resultaten werden in allen Modellen verwendet.

Die Methoden für die Umsetzung von fest vorgegebenen Lastprofilen, mathematischen Funktionen und Betriebszuständen werden in einzelnen Modellen angewendet. In Tabelle 3 sind die Modelle den Methoden zugeordnet. Einige Modelle benötigen mehrere Methoden.

Tabelle 3: Zuordnung der Modelle zur Methode

vorgegebenes Lastprofil	mathematische Funktion	Betriebszustände
- allgemeine Verbraucher	- PV - Wärmepumpe	- Wärmepumpe - Geschirrspüler - Waschmaschine - Tumbler - Ladestation Elektroauto

Funktionsblöcke und Subsysteme

In Simulink wird ein System in Form eines Signalflussplanes aufgebaut. Dazu werden Funktionsblöcke mit Verbindungslinien miteinander verknüpft. Ein Funktionsblock verfügt über ein oder mehrere Ein- und Ausgänge. Eine Ausnahme bilden hier u.a. die Quellen- und Senke-Blöcke, sie haben nur Aus- bzw. Eingänge. Die Quelle ist der Ausgangspunkt eines Signals und die Senke ist der Endpunkt.

In Abbildung 35 ist ein einfaches System mit einer Quelle, einer Funktion und einer Senke dargestellt.

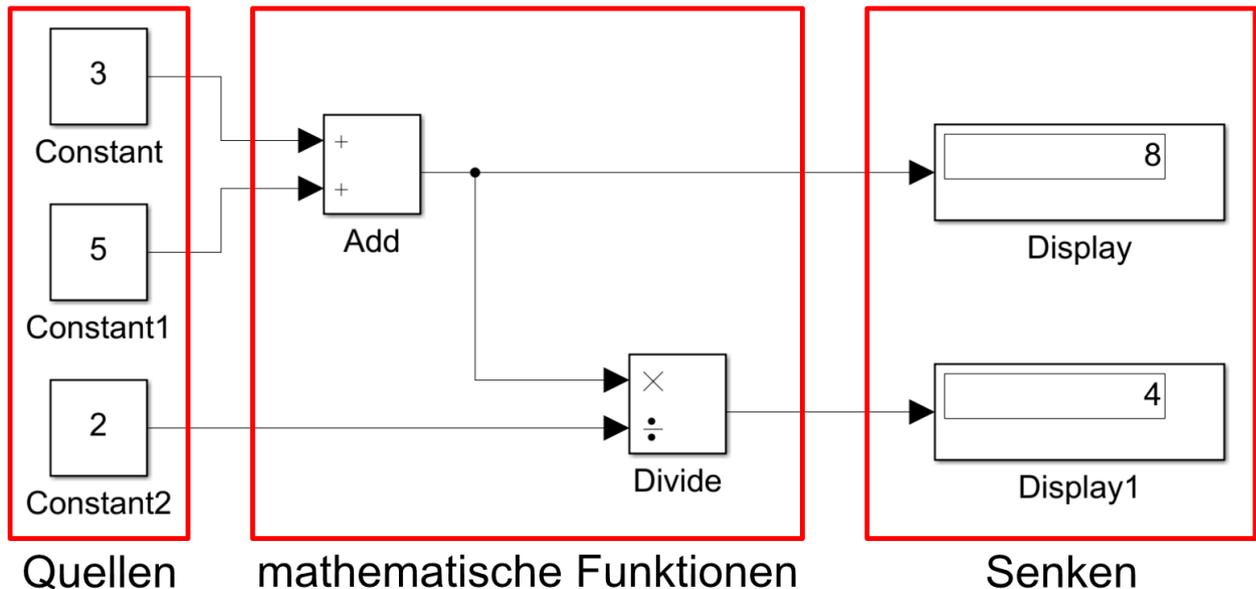


Abbildung 35: Beispielsystem Simulink

In dieser Abbildung ist ein einfaches System dargestellt. Links befinden sich die Konstanten als Quellen. In der Mitte sind zwei Blöcke mit den mathematischen Funktionen der Addition und Division. In den Displays rechts werden die Resultate angezeigt, dies sind die Senken. Quelle: Hochschule Luzern

Bei grösseren Systemen, wie beim Bewertungsverfahren, wird es unübersichtlich, wenn der Aufbau nicht strukturiert ist. In Simulink gibt es dafür die Möglichkeit einer Hierarchiebildung. Einzelne Teile können zu einem Subsystem gemacht werden. In der Hauptebene erscheint das erstellte Subsystem dann als ein einziger Funktionsblock. Durch Doppelklick auf diesen Funktionsblock gelangt man eine Ebene tiefer in das Subsystem und sieht dort wieder alle Funktionsblöcke.

Im Beispiel aus Abbildung 35 wurde nun ein Subsystem gebildet. In Abbildung 36 ist die Hauptebene mit dem Funktionsblock des Subsystems ist ersichtlich und auch das geöffnete Subsystem, das nun eine Unterebene bildet.

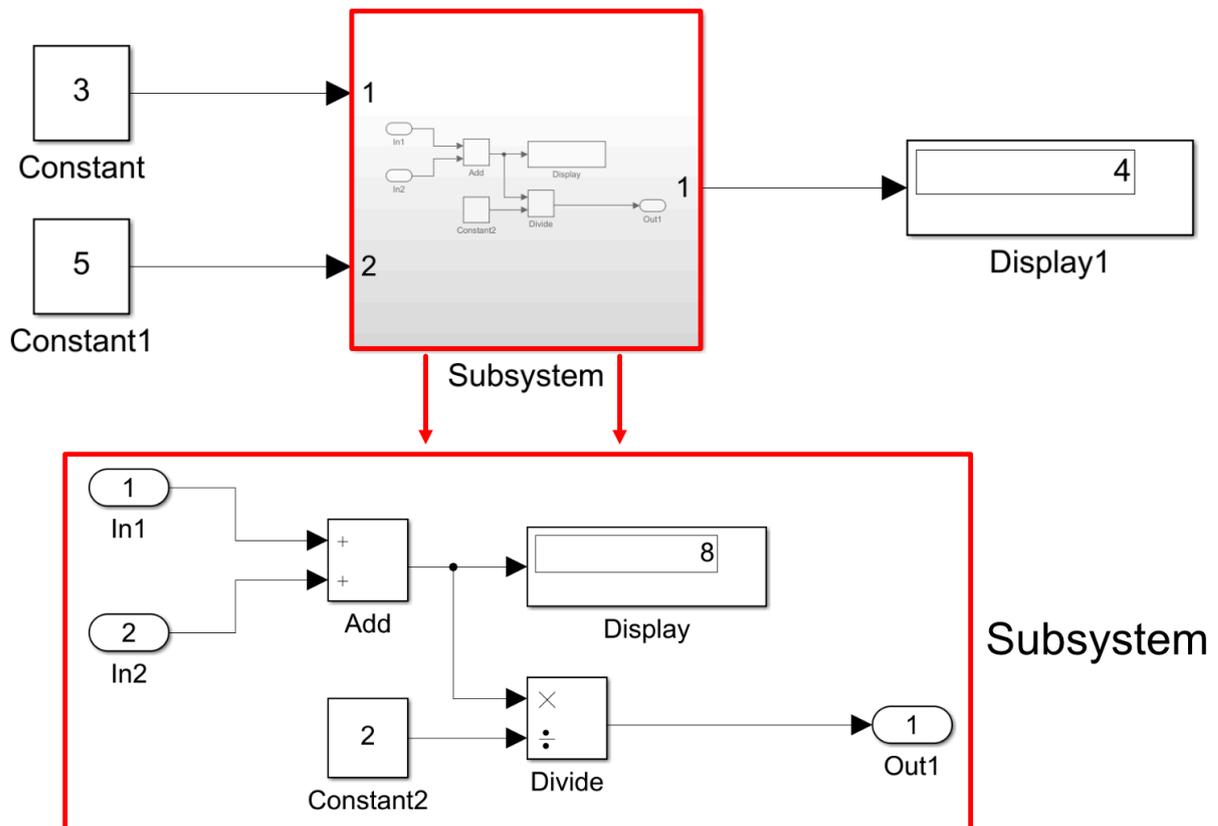


Abbildung 36: Simulink Beispiel mit Subsystem

Mit einem Subsystem kann in Simulink eine Unterebene gebildet werden. Dies hilft, Übersicht in ein komplexes System zu bringen. Quelle: Hochschule Luzern

Im Simulationssystem des Bewertungsverfahrens wurden ebenfalls Subsysteme verwendet. In der Hauptebene sind dadurch nur noch die Funktionsblöcke der einzelnen Subsysteme und die Anzeige der aktuellen Simulationszeit und Leistungen ersichtlich (Abbildung 37). Die rot eingerahmten Subsysteme werden im Referenzablauf nicht benötigt. Diese drei Subsysteme werden für die Schnittstellen benötigt.



Abbildung 37: Gesamtüberblick Simulation
Dieses Bild zeigt die oberste Ebene der Simulation mit den Subsystemen. Die rot eingerahmten Systeme werden im Referenzablauf nicht benötigt. Links werden während der Simulation die aktuellen Werte angezeigt. Quelle: Hochschule Luzern

Modellparameter

Für die Simulation werden drei Typen von Modellparametern benötigt. Das sind die konstanten Parameter, die zeitabhängigen Parameter und die Laufzeiten.

Die konstanten Parameter sind einzelne Werte, die sich während der Simulation nicht ändern, z. B. die Anzahl Module der PV-Anlage.

Die zeitabhängigen Parameter enthalten eine Reihe von Werten. Pro Zeitschritt gibt es einen Wert. Dazu zählen die Aussentemperatur, die Einstrahlung auf die nach Osten gerichteten PV-Module, die Einstrahlung auf die nach Westen gerichteten PV-Module und die Warmwasserentnahme.

Die Laufzeiten sind Zeitfenster, in denen ein Verbraucher, z. B. der Backofen, eingeschaltet ist oder z. B. das Elektroauto an der Ladestation eingesteckt ist.

Für jeden dieser drei Typen wurde eine Excel-Datei erstellt, in der die einzelnen Parameter gespeichert sind und abgeändert werden können.

Die Excel-Dateien werden von MATLAB ausgelesen, mit einigen Parametern werden Berechnungen angestellt und alle notwendigen Parameter werden dann als Variablen in den Arbeitsbereich gespeichert. Von dort werden die Variablen zu Beginn der Simulation von Simulink abgeholt.

Ausgabe von Resultaten

Mit den Blöcken «Goto» und «From» können Signale an eine beliebige Stelle im System geführt werden, ohne dass sie mit einer Verbindungslinie verbunden sind. Das macht ein System einiges übersichtlicher.

Der Block «Display» zeigt den aktuellen Wert während der Simulation. Der Block «Scope» zeichnet die Werte auf einer Zeitachse auf und erstellt ein Diagramm. Beides sind gute Hilfsmittel, um die Simulation überwachen und nachvollziehen zu können.

Mit dem Block «To File» kann eine Zeitreihe abgespeichert und mit MATLAB weiterverarbeitet werden.

Alle diese Blöcke werden in der Simulation oft verwendet.

Vorgegebenes Lastprofil

Bei den allgemeinen Verbrauchern ist das Lastprofil fest vorgegeben, weder die Laufzeiten noch die Leistungen der einzelnen Verbrauchergruppen ändern sich.

Dieses Modell wird umgesetzt, indem zwei Modellparameter mit Bedingungen aneinandergeknüpft werden. Wenn die Laufzeit einer Verbrauchergruppe eine 1 ausgibt, dann wird die Leistung dieser Verbrauchergruppe weitergegeben, ansonsten bleibt die Leistung auf 0. Diese Kombination wird für jede Verbrauchergruppe durchgeführt. Die einzelnen Leistungen der Gruppen werden dann addiert und ergeben die Gesamtleistung der allgemeinen Verbraucher. In Abbildung 38 ist ein Ausschnitt des Modells dargestellt.

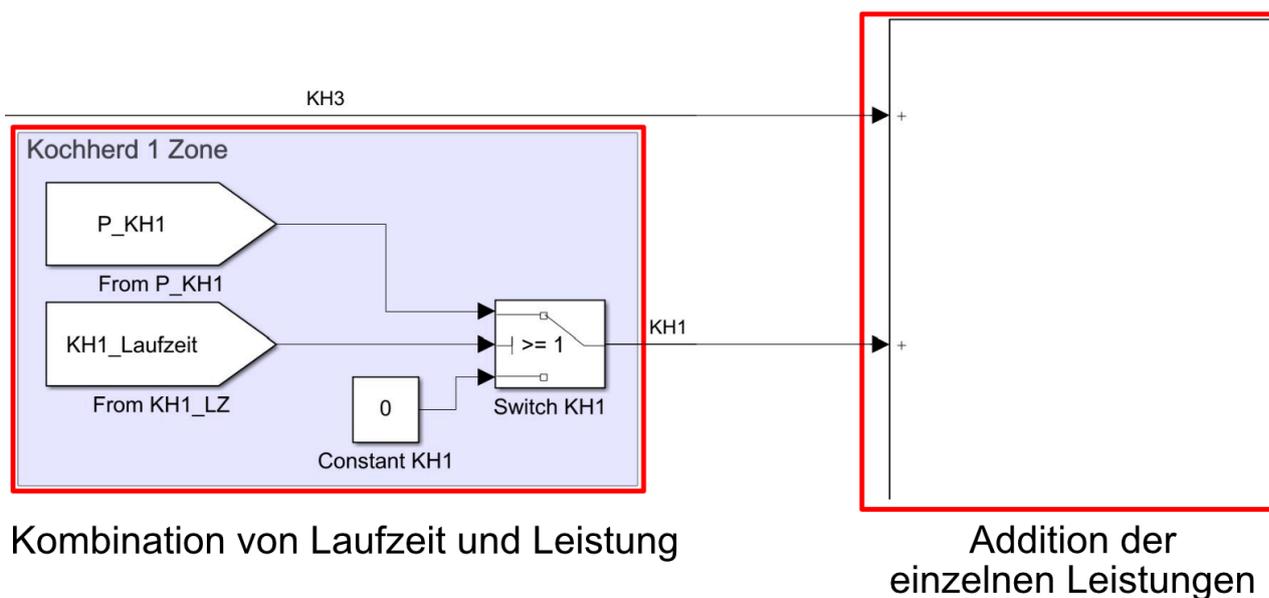


Abbildung 38: Ausschnitt Simulink Modell allgemeine Verbraucher

Mit dem Switch wird geprüft, ob die Laufzeit den Wert 1 oder 0 hat. Bei 1 schaltet der Switch den oberen Eingang, die Leistung, durch. Bei 0 wird der untere Eingang, die Konstante 0, weitergegeben. Quelle: Hochschule Luzern

Mathematische Funktion

Mathematische Berechnungen können in Simulink aus einzelnen Funktionsblöcken zusammengesetzt werden, so wie in Abbildung 35. Das funktioniert bei kurzen und einfachen Berechnungen gut. Bei grösseren Formeln wird diese Methode unübersichtlich und das Risiko für Fehler steigt. Da ist es sinnvoller den Block «MATLAB Function» zu verwenden. Damit wird eine Verknüpfung zu MATLAB ins Simulink-System eingebettet.

Im Modell der PV-Anlage werden mit der «MATLAB Function» z. B. die DC-Ausgangsleistung berechnet. In Abbildung 39 ist der Block «MATLAB Function» abgebildet. Auf der linken Seite befinden sich die Eingänge, dort sind die Parameter angeschlossen. Einige dieser Parameter sind konstant, andere sind zeitabhängig. Rechts werden die Resultate der Berechnungen herausgegeben.

Mit einem Doppelklick auf den Block «MATLAB Function» öffnet sich das MATLAB-Fenster und die Funktionen können bearbeitet werden. Dies ist in Abbildung 40 ersichtlich.

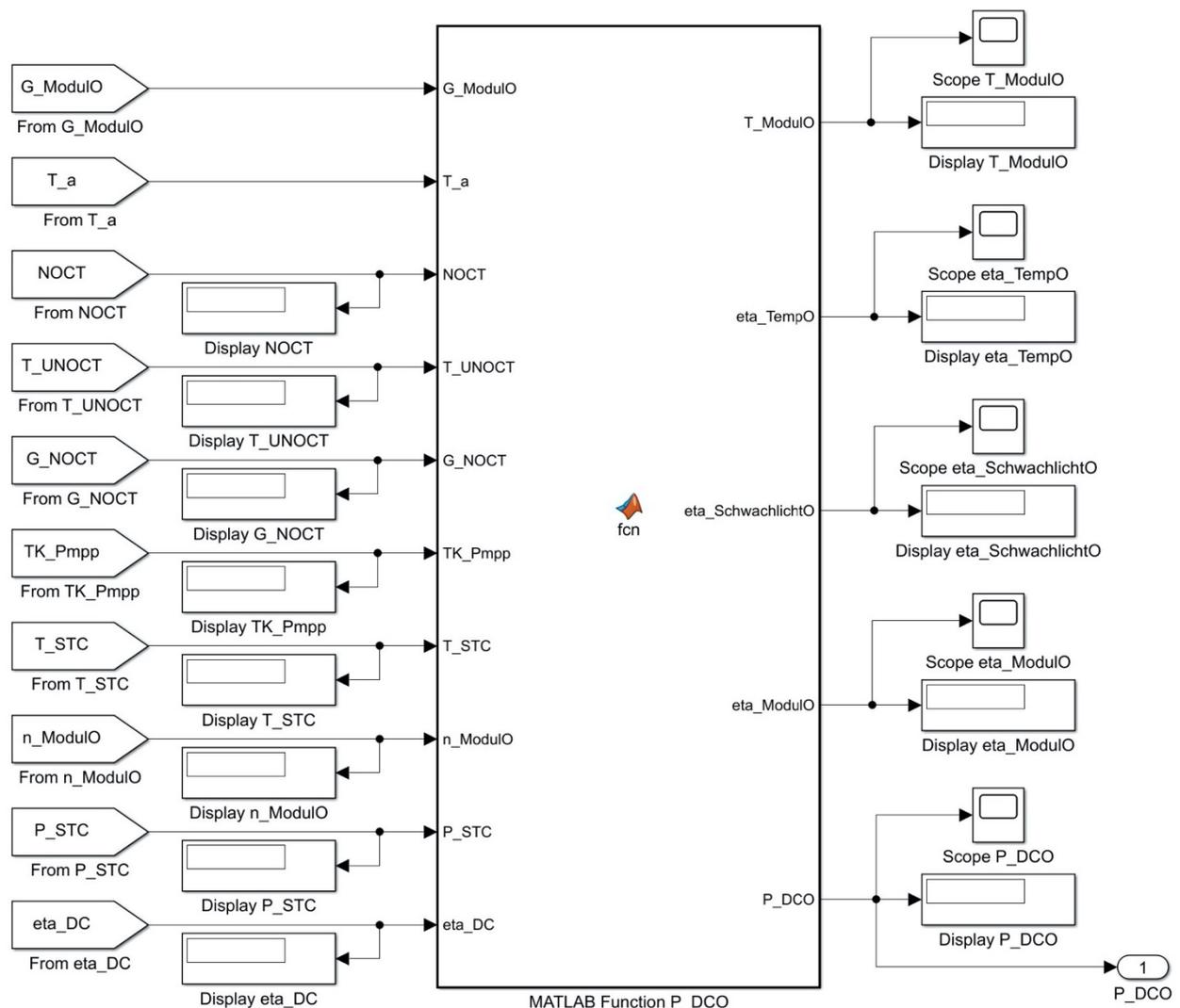


Abbildung 39: Ausschnitt Simulink Modell PV-Anlage

Mit dem Block «MATLAB Function» können Berechnungen ausgeführt werden. Links werden die Eingangsparameter in den Block geführt. Rechts werden die Resultate herausgegeben. Hier ist ein Beispiel aus dem Modell der PV-Anlage abgebildet. Quelle: Hochschule Luzern

```

1  function [T_Modulo, eta_TempO, eta_SchwachlichtO, eta_Modulo, P_DCO]...
2  = fcn(G_Modulo, T_a, NOCT, T_UNOCT, G_NOCT, TK_Pmpp, T_STC, n_Modulo, P_STC, eta_DC)
3
4  % Modultemperatur Ost [°C]
5  T_Modulo = T_a + (NOCT - T_UNOCT) * G_Modulo / G_NOCT
6
7  % Temperaturwirkungsgrad Ost [%]
8  eta_TempO = 100 + TK_Pmpp * (T_Modulo - T_STC)
9
10 % Schwachlichtwirkungsgrad Ost [%]
11 eta_SchwachlichtO = -8 * 10^-5 * G_Modulo^2 + 0.12 * G_Modulo + 60
12
13 % Modulwirkungsgrad Ost [-]
14 eta_Modulo = eta_TempO / 100 * eta_SchwachlichtO / 100
15
16 % DC-Ausgangsleistung Ost [W]
17 P_DCO = n_Modulo * P_STC / 1000 * G_Modulo * eta_Modulo * eta_DC
18

```

Abbildung 40: MATLAB Code zur MATLAB Function

Dieser MATLAB Code erscheint, wenn man den Block «MATLAB Function» aus der oberen Abbildung öffnet. Hier können die Berechnungsformeln eingegeben werden. Quelle: Hochschule Luzern

Betriebszustände

Die Stateflow Chart wird genutzt, wenn ein System mehrere Betriebszustände hat, die zeitlich nacheinander eintreten. Beim Geschirrspüler z. B. ist dies der Fall. Sein Lastprofil ist in fünf Phasen unterteilt, die jeweils anhand einer Leistung und einer Zeitdauer definiert sind. Jede dieser Phasen kann als Betriebszustand betrachtet werden.

In Abbildung 41 ist das Modell vom Geschirrspüler abgebildet. Die Stateflow Chart hat ein Eingangssignal (GS_ein) und ein Ausgangssignal (P_GS).

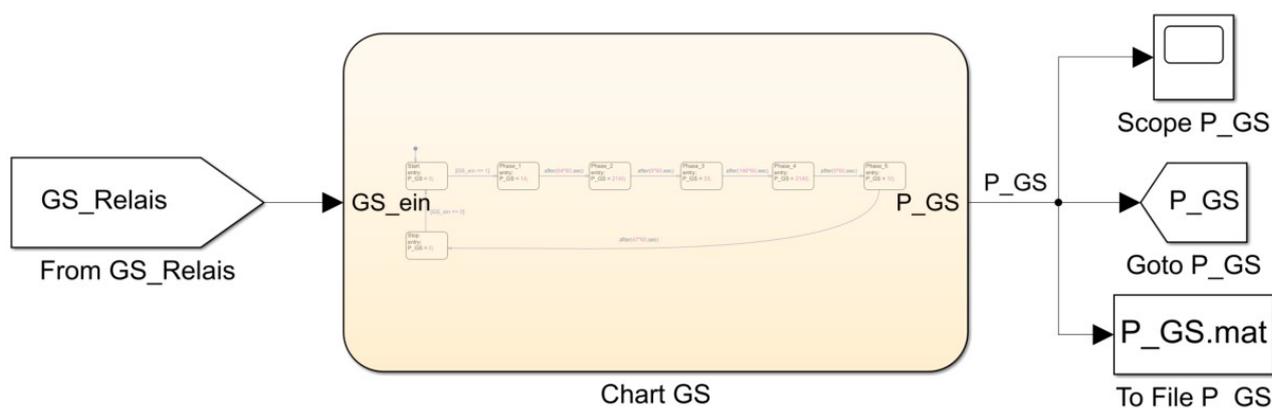


Abbildung 41: Simulink Modell Geschirrspüler

Das Modell des Geschirrspülers besteht aus einer Stateflow Chart mit einem Eingang und einem Ausgang. Quelle: Hochschule Luzern

Die Details der Stateflow Chart sind in Abbildung 42 ersichtlich. Zu Beginn der Simulation ist der erste Betriebszustand «Start» aktiv. Beim Eintritt in diesen Zustand wird die Leistung des Geschirrspülers $P_{GS} = 0$ gesetzt. Der Zustand wird erst wieder verlassen, wenn die Bedingung des Zustandsübergangs erfüllt ist. Beim Zustand «Start» muss $GS_{ein} = 0$ sein. Das heisst, wenn der Geschirrspüler den Einschaltbefehl vom EMS erhält, wird in den nächsten Zustand «Phase_1» gewechselt und somit wird der Geschirrspüler in der Simulation gestartet. Der Zustand «Phase_1» bildet die erste Phase des Lastprofils ab. Die Leistung P_{GS} wechselt auf 14 W. Als Bedingung für den Zustandsübergang zur nächsten Phase ist hier eine Zeitdauer vorgegeben. Nach Ablauf dieser Zeitdauer wird Phase 2 aktiv. So wird das gesamte Lastprofil durchlaufen und zusammengesetzt. Nach Abschluss des simulierten Spülgangs folgt der Zustand «Stop». Dieser wird benötigt, damit der Spülgang nicht gleich wieder von vorne beginnt, falls der Einschaltbefehl vom EMS immer noch anliegt, also $GS_{ein} = 1$ ist.

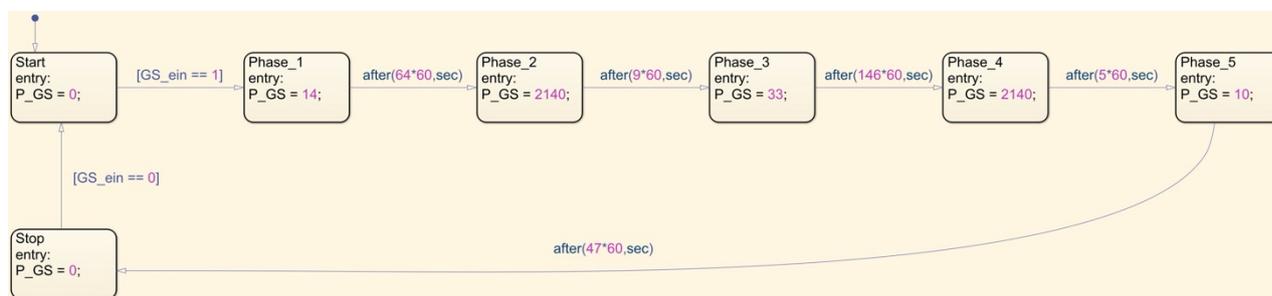


Abbildung 42: Stateflow Chart Geschirrspüler

Dies ist der Inhalt der Stateflow Chart GS aus der oberen Abbildung. Jede Phase des Lastprofils wird mit einem Zustand umgesetzt. In der Simulation wird ein Zustand nach dem anderen durchlaufen und so wird das Lastprofil gebildet. Quelle: Hochschule Luzern

4.3.5. Umsetzung Schnittstellen

Ein/Aus

Die Ein/Aus Schaltbefehle werden vom EMS über das Schaltrelais an die I/O Karte gesendet. Da es sich um digitale Signale (1 oder 0) handelt, werden sie auf die digitalen Eingänge der I/O Karte geführt. Damit die Signale in Simulink eingelesen werden können, wird die «Data Acquisition Toolbox» benötigt.

Mit dem Block «Digital Input» können die Ein/Aus Signale empfangen und an die entsprechenden Modelle weitergegeben werden. Dies sind die Modelle der Wärmepumpe, des Geschirrspülers, der Waschmaschine und des Tumblers.

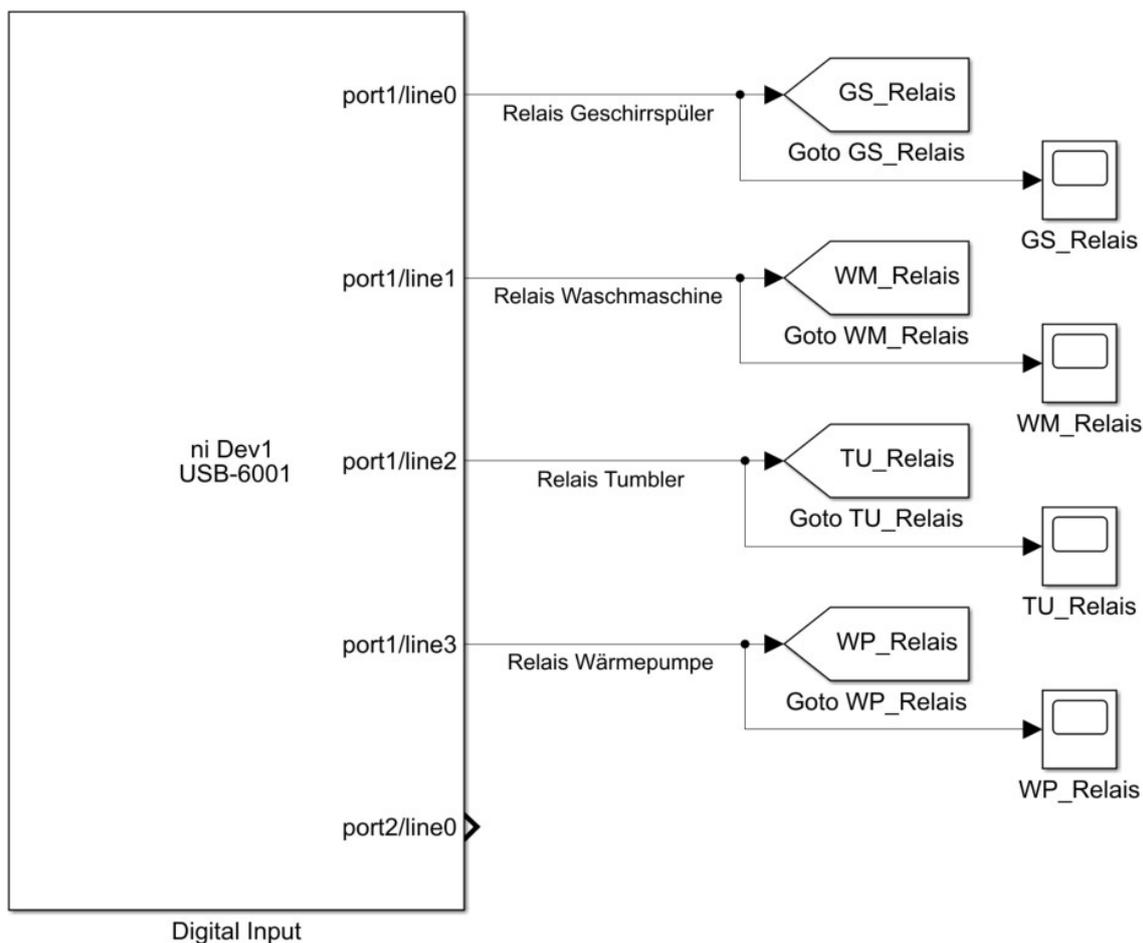


Abbildung 43: Digital Input I/O Karte

Die Ein/Aus Befehle des EMS werden mit dem Block «Digital Input» in Simulink empfangen und an die entsprechenden Modelle weitergegeben. Quelle: Hochschule Luzern

S0

Die S0-Signale werden von der I/O Karte über die Halbleiterrelais an das EMS gesendet. Bei den S0-Impulsen handelt es sich um digitale Signale (1 oder 0), deshalb werden die digitalen Ausgänge der I/O Karte verwendet. Mit dem Block «Digital Output» können die S0-Signale an die I/O Karte übergeben werden.

Die Zählerwerte (Energie), die mit S0 übermittelt werden, werden berechnet, indem das Integral der Leistung gebildet wird. Jedes Mal, wenn die Energie um 1 Wh ansteigt, wird ein Impuls ausgelöst. Der Impuls, bestehend aus EIN- und AUS-Zustand, wird mit einer Stateflow Chart generiert.

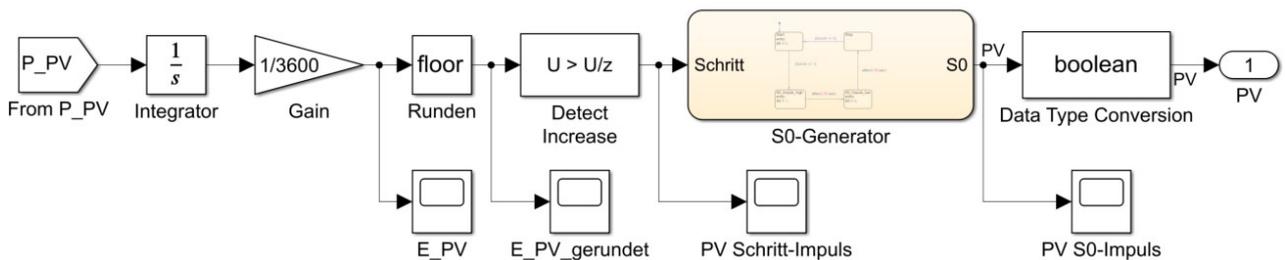


Abbildung 44: Berechnung S0-Impuls

Mit dem Integral der Leistung wird die Energie berechnet. Wenn die Energie um 1 Wh ansteigt wird ein S0-Impuls ausgelöst. Dieser wird mit einer Stateflow Chart generiert. Der Impuls wird dann an den «Digital Output» Block gesendet. Der Block ist hier nicht abgebildet, sondern nur der Übergabepunkt ganz rechts (PV). Quelle: Hochschule Luzern

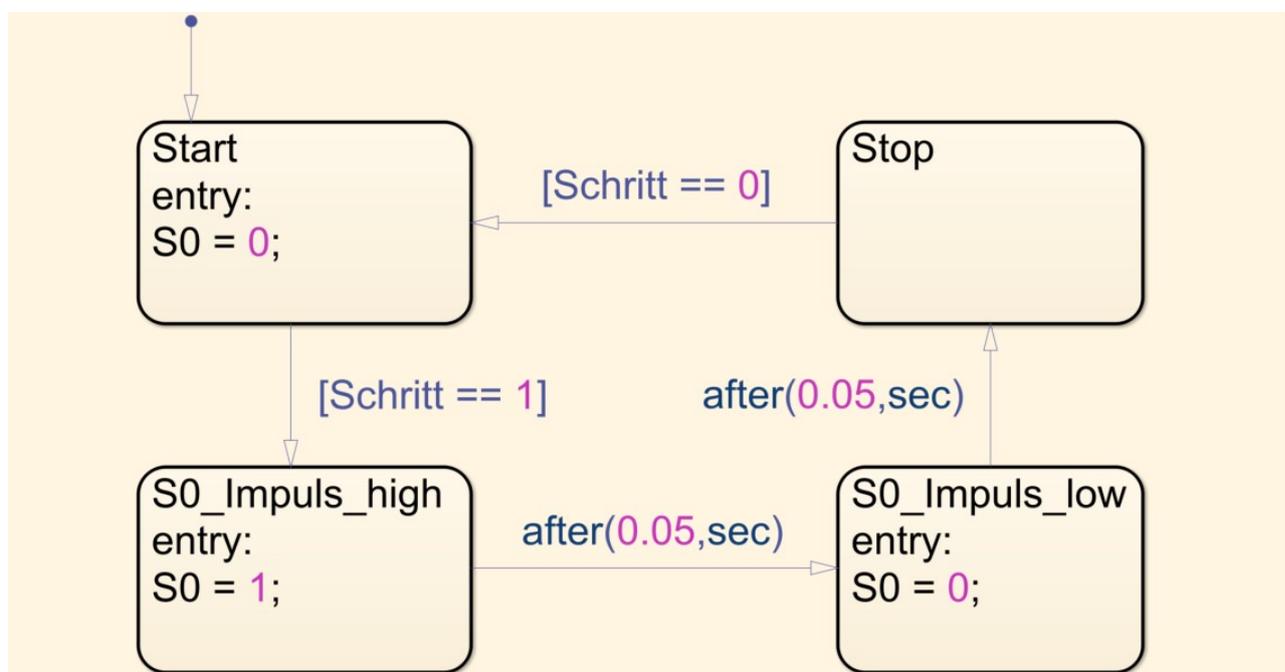


Abbildung 45: Generierung S0-Impuls

Hier ist der Inhalt der Stateflow Chart S0-Generator aus der obigen Abbildung ersichtlich. Wenn der Parameter Schritt = 1 ist, dann muss ein S0-Impuls generiert werden. Dies wird mit den zwei Zuständen S0_Impuls_high und S0_Impuls_low gemacht. Beide Zustände dauern jeweils 50 ms. Somit ist das S0-Signal etwas länger als die minimalen 30 ms. Quelle: Hochschule Luzern

UDP

Die UDP Pakete werden über eine Netzwerkverbindung vom EMS an die Simulation und umgekehrt gesendet. Um in Simulink UDP senden und empfangen zu können, wird die «Instrument Control Toolbox» benötigt.

Mit dem Block «UDP Receive» können UDP Pakete empfangen werden. In den Einstellungen des Blocks werden die lokale IP-Adresse und Portnummer (vom PC) und die IP-Adresse und Portnummer des EMS angegeben. Zusätzlich wird die Datengrösse der Pakete angegeben, die der Block dann ausgibt. Diese Grösse ist nicht flexibel. Das empfangene Signal wird erst herausgegeben, wenn die Datengrösse erreicht wird. Alles was diese Grösse übersteigt wird abgeschnitten. Wenn hingegen ein kleineres Paket ankommt, dann wird abgewartet bis ein weiteres Paket kommt und sie zusammen die notwendige Grösse erreichen. Die zwei Pakete werden dann aber als Eines rausgegeben.

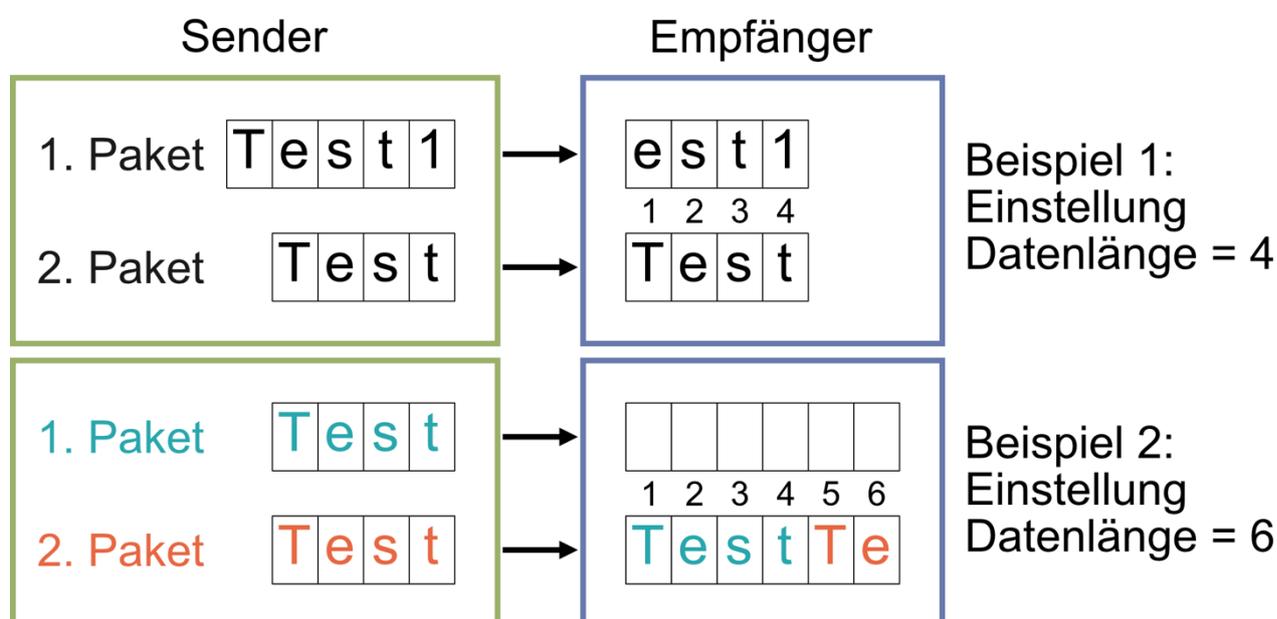


Abbildung 46: UDP Pakete

Im ersten Beispiel ist die Datenlänge vier eingestellt. Simulink gibt also nur vier Zeichen heraus. Das erste Paket hat aber 5 Zeichen. Es werden die letzten vier Zeichen in Simulink angezeigt und was übrig bleibt wird gelöscht. Das zweite Paket besteht aus 4 Zeichen und wird entsprechend ganz angezeigt.

In Beispiel 2 ist die Datenlänge auf 6 eingestellt. Das erste Paket hat nur 4 Zeichen. Das führt dazu, dass in Simulink zuerst gar nichts angezeigt wird. Das erste Paket wird aber zwischengespeichert. Wenn nun das zweite Paket ankommt, wird das erste Paket angezeigt und daran angehängt wird soviel vom zweiten Paket, dass die eingestellte Datenlänge erreicht wird. Quelle: Hochschule Luzern

Der Receive-Block hat zwei Ausgänge. Beim Ausgang «Data» werden die Daten in der eingestellten Grösse herausgegeben. Die letzten Daten bleiben so lange, bis sie durch neue ersetzt werden. Wenn zwei Pakete mit dem gleichen Inhalt hintereinander ankommen, dann ist an diesem Ausgang nicht ersichtlich, wann das Zweite ankam. Dafür gibt es aber den zweiten Ausgang «Status». Dieser sendet jedes Mal einen Impuls, wenn ein neues Paket empfangen wird.

Mit dem Block «UDP Send» können UDP Pakete versendet werden. Bei diesem Block werden ebenfalls die IP-Adresse und Portnummer vom PC und vom EMS sowie die Paketgrösse eingestellt. Hier ist es kein Problem, wenn das Signal, das versendet werden soll, in der Länge variiert. Wenn es kleiner ist als die eingestellte Paketgrösse, dann werden die leeren Stellen mit Nullen gefüllt. Die Paketgrösse muss aber genug gross eingestellt werden, sonst wird das Signal abgeschnitten.

Wie in Kapitel 3 beschrieben wurde, wird die Ladestation Keba p30x nachgebildet. Im Dokument «UDP Programmers Guide V 2.01» [44] von Keba ist beschrieben, wie die verschiedenen UDP Pakete aussehen, die von der Ladestation versendet werden. Anhand dessen können die Pakete in Simulink nachgebaut werden.

5. Ergebnisse

In Kapitel 4 wurde die Umsetzung der Methode aus Kapitel 3 beschrieben. Nun ist der Prüfaufbau soweit vorbereitet, dass ein EMS ausgesucht, eingebaut und getestet werden kann. Auch kann der Referenzablauf durchgeführt werden. Das heisst, die Simulation wird ohne die Beeinflussung durch ein EMS durchgeführt. Zudem werden in diesem Kapitel die Ergebnisse besprochen.

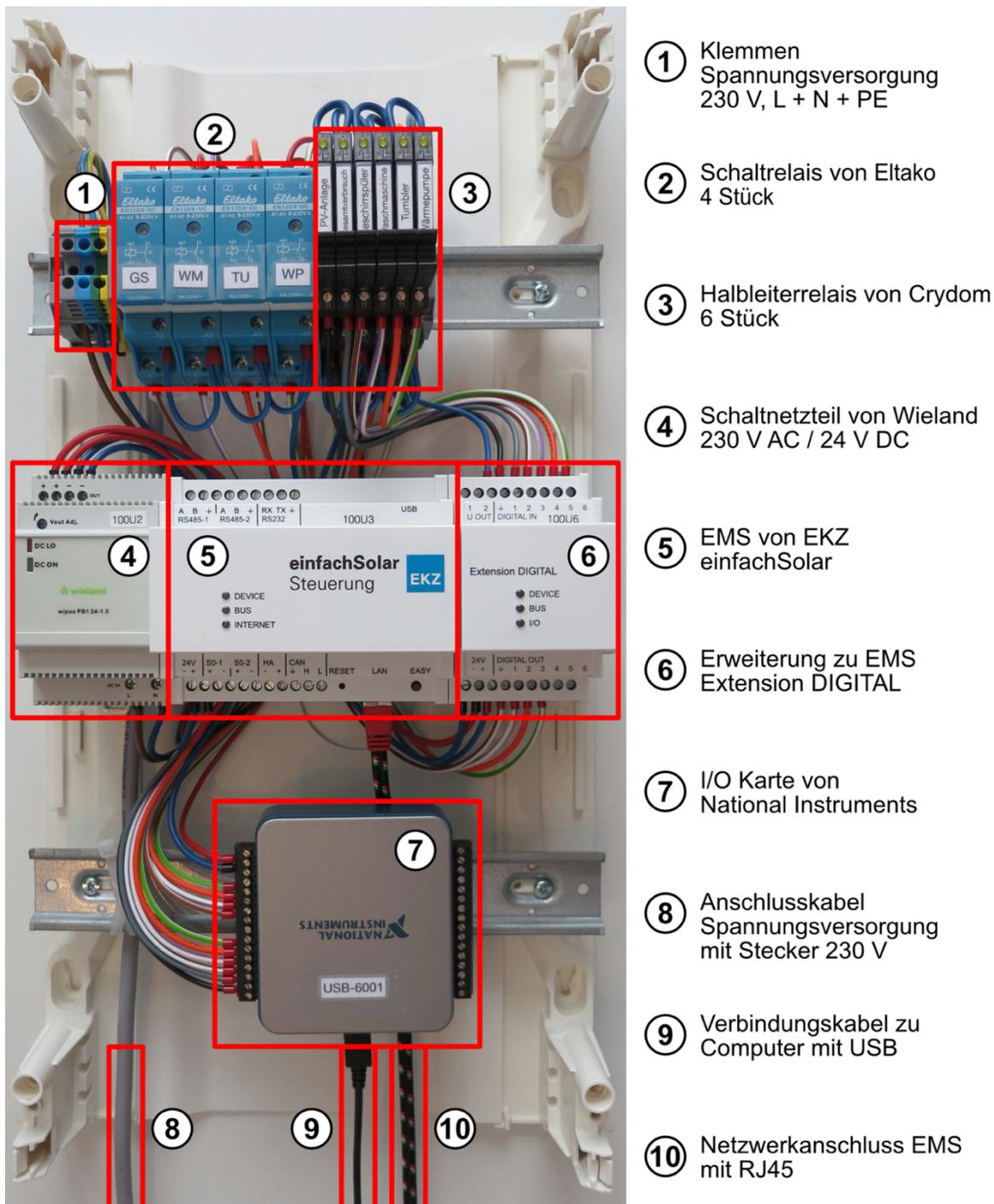


Abbildung 47: Realer Prüfaufbau

Dieses Foto zeigt den Prüfaufbau mit dem EMS von EKZ. Quelle: Hochschule Luzern

5.1. Tests mit EMS

5.1.1. Auswahl EMS

Im Forschungshaus GEE Live an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw sind mehrere EMS eingebaut. Aus diesen zur Verfügung stehenden Produkten wurde ausgewählt.

SMARTFOX PRO

Der SMARTFOX PRO wurde bereits in der Vertiefungsarbeit 1 angeschaut. Es ist ein schlichtes System, das alle notwendigen Eigenschaften besitzt und bestens für das EFH geeignet ist. Aus diesen Gründen wurde SMARTFOX PRO ausgewählt, um damit die Schnittstellen der Simulation zu testen und danach das Bewertungsverfahren damit durchzuführen.

Der SMARTFOX PRO und der SMARTFOX Meter wurden in den Prüfaufbau eingebaut und die S0-Schnittstelle wurde mit der I/O Karte verdrahtet.

Beim Test der S0-Schnittstelle musste dann aber festgestellt werden, dass der Netzbezug nicht über einen externen Zähler gemessen werden kann, sondern nur über den internen Stromwandleranschluss. Der Hersteller von SMARTFOX hat auf Anfrage bestätigt, dass dies nicht möglich sei [45].

Daraufhin wurde geprüft, ob es noch andere EMS mit dem gleichen Problem gibt. Es stellte sich heraus, dass SMARTFOX in diesem Fall eine Ausnahme bildet. SMARTFOX wurde aus diesem Grund zur Seite gelegt und ein anderes EMS wurde ausgewählt.



Abbildung 48: SMARTFOX PRO und SMARTFOX Meter
Produktbild vom EMS SMARTFOX PRO (links) und der Erweiterung SMARTFOX Meter (rechts). Quellen: [46] [47]

EKZ einfachSolar

Der EnergyManager von Solarwatt wird in der Schweiz von den Elektrizitätswerken des Kantons Zürichs (EKZ) unter dem Namen einfachSolar vertrieben. EinfachSolar ist für EFHs konzipiert und bietet alle benötigten Schnittstellen. Bei diesem EMS ist es notwendig, für jeden geschalteten Verbraucher einen Zähler anzuschliessen. Da aber zusammen mit der Extension DIGITAL bis zu acht S0-Zähler angeschlossen werden können, ist dies kein Problem.

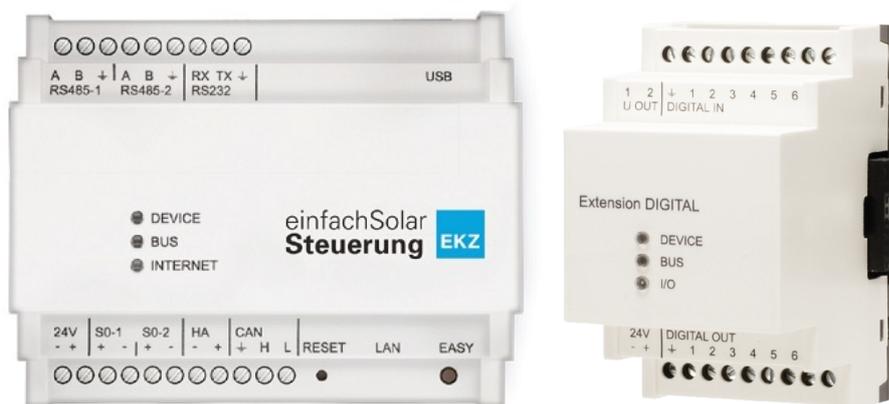


Abbildung 49: EKZ einfachSolar Steuerung und Extension DIGITAL
Produktbild vom EMS einfachSolar von EKZ (links) und der Erweiterung Extension DIGITAL (rechts).
Quellen: [48] [49]

Dieses EMS kann über das Webportal «einfachSolar» bedient werden. Dort können unter anderem die Messwerte angeschaut oder Einstellungen zu den schaltbaren Verbrauchern vorgenommen werden.

5.1.2. Tests der Schnittstellen

Ein/Aus

Im Webportal von EKZ können die schaltbaren Verbraucher manuell ein- und ausgeschaltet werden. Dies wurde mehrmals gemacht und die Reaktion des Schaltrelais und der digitalen Eingänge der Simulation wurden beobachtet. Wie erwartet wechselten sowohl das Schaltrelais als auch die Eingänge in der Simulation den Zustand. Die Ein/Aus Schnittstelle funktioniert wie geplant.

S0

Zum Überprüfen, welche Signale von der I/O Karte tatsächlich herausgegeben werden, wurde ein Oszilloskop verwendet. Damit wurde die Spannung am digitalen Ausgang aufgezeichnet und die Zeitdauer der Signale konnte ebenfalls überprüft werden.

Beim ersten Anlauf wurde nicht berücksichtigt, dass das S0-Signal spannungsfrei sein sollte (siehe Kapitel 4.1.1) und es wurde deshalb noch kein Halbleiterrelais verwendet.

Mit dem EMS von SMARTFOX hat dies funktioniert. Alle gesendeten Impulse wurden empfangen. Beim EMS einfachSolar von EKZ hat dies aber nicht funktioniert. EinfachSolar zeigte eine Fehlermeldung an und konnte die S0-Signale nicht empfangen.

Nach einigen Überlegungen und Nachforschungen wurde ein Halbleiterrelais eingebaut.

Damit funktionierte die Übertragung der S0-Impulse bei einfachSolar.

Nun wurde überprüft, ob die Signale auch zeitlich korrekt ausgegeben wurden. Denn bei S0 berechnet das EMS die aktuelle Leistung aus den Zeitabständen zwischen den Signalen.

Dazu wurde in der Simulation eine konstante Leistung eingestellt und dieser Zählerwert wurde mittels S0-Impulse an das EMS gesendet. In der Aufzeichnung im einfachSolar Portal schwankte die Leistung ständig.

Daraufhin wurde das S0-Signal am Digitalausgang nochmals mit dem Oszilloskop gemessen. Die Leistung in der Simulation wurde auf 3600 W eingestellt. Damit musste jeweils nach einer Sekunde ein Impuls gesendet werden. Der Impuls selber sollte 50 ms dauern.

Die Messungen zeigten aber, dass die Impulsausgabe schwankte. Mal betrug die Abstände zwischen den Impulsen 0.986 s und etwas später sogar 1.2 s.

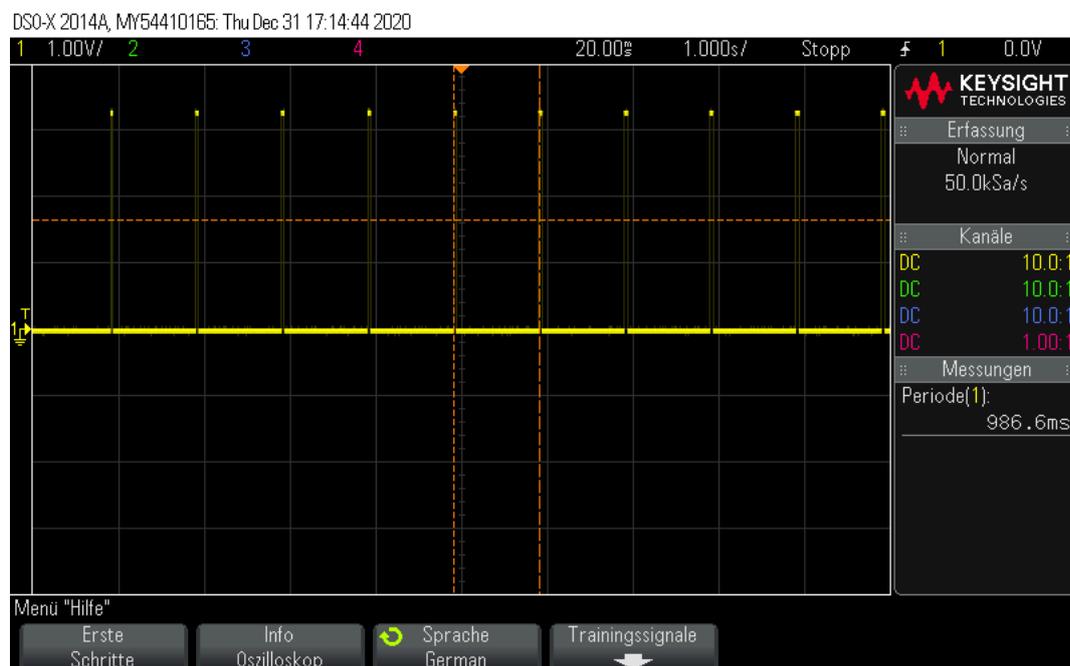


Abbildung 50: Oszilloskop

Das Bild vom Oszilloskop zeigt die gemessenen Impulse (gelb). Der gemessene Abstand (orange Hilfslinien) zwischen zwei Impulsen beträgt 0.986 s. Er sollte aber 1 s lang sein. In diesem Moment lief die Simulation zu schnell. Quelle: Hochschule Luzern

Daraus lässt sich schliessen, dass Simulink bei dem erforderlichen Rechenaufwand für die Simulation die Echtzeit nicht einhalten kann. Was dazu führt, dass die Simulation mal schneller und mal langsamer ist und somit die Impulsausgabe schwankt.

Beispiel: Leistung = 3600 W → 1 Impuls pro Sekunde

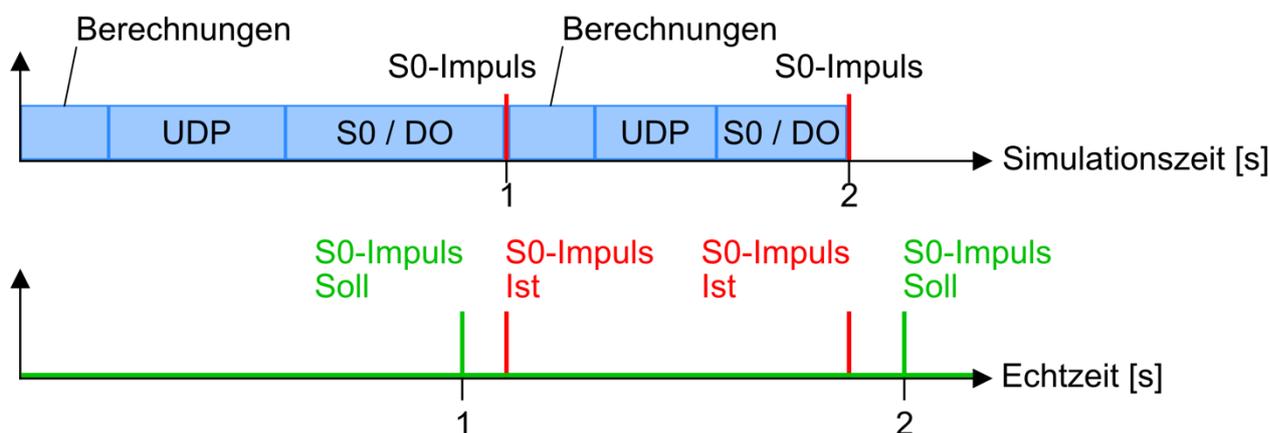


Abbildung 51: S0 Echtzeit

Auf dem unteren Zeitstrahl ist die Echtzeit abgebildet. Bei einer konstanten Leistung von 3600 W, sollte der digitale Ausgang der Karte jede Sekunde ein S0-Impuls ausgeben (grün). In der oberen Zeitachse ist die Simulationszeit abgebildet. Während einer Sekunde Simulationszeit führt Simulink Verschiedenes aus, z. B. Berechnungen, Senden und Empfangen von UDP-Paketen und das Berechnen und Versenden der S0-Impulse über die digitalen Ausgänge. Sobald diese Ausführungen beendet sind, wird ein S0-Impuls versendet (rot). Für die Simulation ist nun eine Sekunde verstrichen und sie geht zum nächsten Schritt über. Sie führt nun das aus, was in diesem Schritt benötigt wird. Wenn die zwei S0-Impulse von der Simulation in die Echtzeit übertragen werden (rot), dann wird ersichtlich, dass es nicht übereinstimmt. Das EMS empfängt die roten Impulse und berechnet daraus eine falsche Leistung. Es muss also gewährleistet werden können, dass die S0-Impulse zum richtigen Zeitpunkt (grün) gesendet werden. Quelle: Hochschule Luzern

Simulink bietet die Toolbox «Simulink Desktop Real-Time» an, die Echtzeitsimulationen ermöglicht. Der Block «Real-Time Synchronization» sorgt dafür, dass die Simulationszeit mit der Systemzeit des PCs (also Echtzeit) abgeglichen wird. Das ist aber nicht mit der I/O Karte USB-6001 kompatibel. Diese Karte ist nicht real-time fähig.

Die Digitalausgänge der I/O Karte USB-6001 können keine Signale zwischenspeichern. Sie werden jeweils gleich ausgegeben. Die Analogausgänge hingegen haben einen Speicher. Damit kann man eine Impulsfolge an die Karte senden. Diese wiederholt die Impulsfolge solange, bis sie eine Neue erhält. Dadurch wird der Rechenaufwand der Simulation verkleinert. Neu würde die Simulation anhand der aktuellen Leistung den Zeitabstand zwischen den Impulsen berechnen und eine entsprechende Impulsfolge an die Karte senden. Erst wenn sich die Leistung ändert, muss die Simulation eine Neuberechnung machen und die neuen Signale senden. Diese Theorie konnte mit der I/O Karte USB-6001 und Simulink nicht überprüft werden, da der Treiber für die Karte nicht korrekt funktionierte.

Für das Problem mit der S0-Schnittstelle gibt es verschiedene Lösungsansätze, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr verfolgt werden konnten.

- Verwendung von real-time Hardware, z. B. Speedgoat [50]
- Verwendung des Analogausgangs mit Speicher zusammen mit einer anderen Software als Simulink, z. B. mit LabVIEW
- S0 nicht umsetzen, dafür RS485. Da werden die Zählerwerte als Zahl gesendet und kleine zeitliche Schwankungen wirken sich nicht auf den Wert aus.

UDP

Beim Test der UDP-Schnittstelle wurde die Software «Wireshark» verwendet, um die empfangenen und gesendeten UDP-Pakete aufzuzeichnen [51].

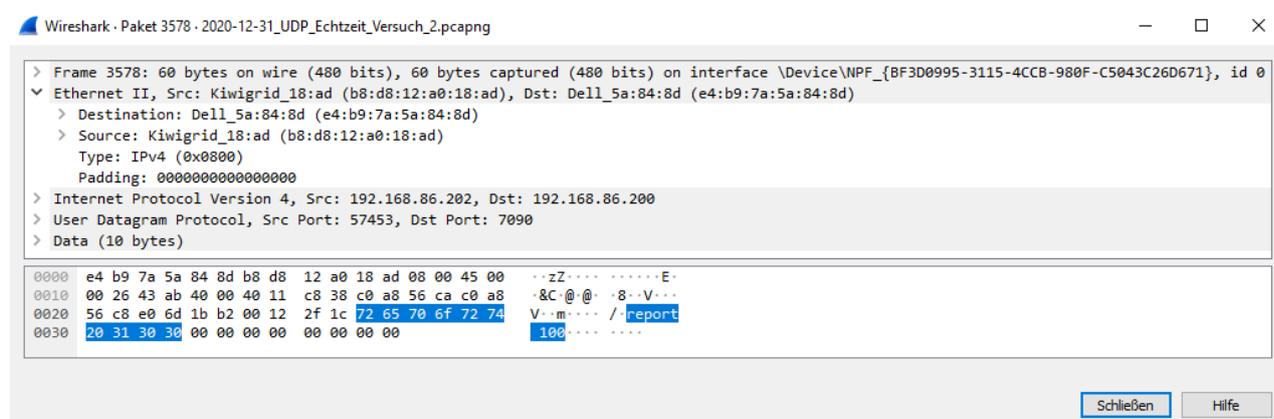


Abbildung 52: UDP-Paket in Wireshark

In diesem Ausschnitt aus Wireshark sind die Daten eines empfangenen UDP-Paketes zu sehen. Es handelt sich hier um den Befehl «report 100». Quelle: Hochschule Luzern

Die Kommunikation mit dem EMS einfachSolar hat grundsätzlich funktioniert. Das EMS konnte die von Simulink gesendeten Pakete empfangen und Simulink diejenigen vom EMS. Als Problem herausgestellt hat sich aber die Tatsache, dass Simulink nicht mit Paketen von variabler Länge umgehen kann (siehe Kapitel 4.3.5). Die Keba-Ladestation verwendet aber solche Pakete.

Um die Kommunikation mit der Ladestation aufzunehmen, sendet das EMS den Befehl «i» (Länge 1). Daraufhin antwortet die Ladestation und sendet die Angaben zu seiner Firmwareversion z. B. «Firmware»: «P30 v 3.9.12 (180109-164149)». Wenn das EMS diese Antwort erhält, kann es zum nächsten Schritt übergehen und den Befehl «report 1» (Länge 8) senden. Das erste Paket, das Simulink empfängt, hat die Länge 1. Das zweite Paket hat aber die Länge 8.

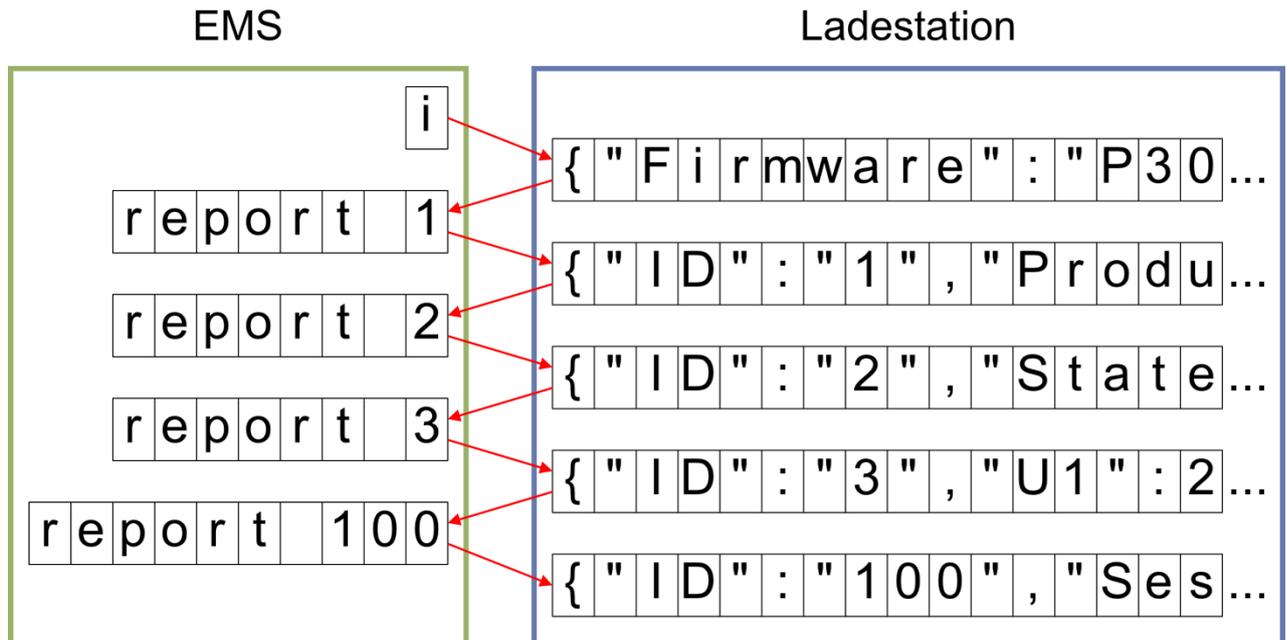


Abbildung 53: UDP Kommunikation Ladestation

In dieser Abbildung ist dargestellt, wie der Kommunikationsaufbau zwischen dem EMS und der Ladestation abläuft. Das EMS startet mit einem „i“. Darauf antwortet die Ladestation mit der Angabe seiner Firmware. Hier ist jeweils nur der Beginn der Antwort abgebildet. Als nächstes sendet das EMS „report 1“. Auch darauf antwortet die Ladestation wieder. So geht das hin und her. Quelle: Hochschule Luzern

Es wurde festgestellt, dass das EMS den Befehl «i» immer zweimal in Folge sendete. Die Paketlänge wurde auf 2 eingestellt und der Befehl «i» konnte empfangen werden. Vom Befehl «report 1» wurde nur «1» empfangen. Das reichte zu Beginn aber aus. Denn auf «report 1» folgten «report 2», «report 3» und «report 100». Die fünf Befehle konnten so unterschieden und die entsprechende Antwort gesendet werden. Die simulierte Ladestation wurde daraufhin vom EMS akzeptiert.

Nun sendete das EMS aber noch weitere Befehle wie z. B. «curr 6000». Mit diesem Befehl kann das EMS der Ladestation den Ladestrom vorgeben und damit den Eigenverbrauch optimieren. «curr 6000» bedeutet, dass die Ladestation mit 6000 mA also 6 A laden soll. Die Simulation muss also diesen Wert übernehmen und an das Modell der Ladestation senden, damit dort die Ladeleistung angepasst wird. Es reicht hier nicht aus, wenn nur die letzten zwei Zeichen des Befehls «curr 6000» empfangen werden. In diesem Fall wären diese sogar identisch mit «report 100». Da würde ebenfalls nur «00» empfangen werden. Für die Modellierung der Keba-Ladestation ist es folglich zwingend notwendig, dass die Simulationssoftware mit Paketen von variabler Länge umgehen kann. Das ist bei Simulink nicht der Fall. Ob es mit einer anderen Software, z. B. LabVIEW, möglich ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht getestet werden.

5.1.3. Test Bewertungsverfahren

Aufgrund der Probleme mit S0 und UDP konnte das Bewertungsverfahren nicht mit einem EMS getestet werden. Ohne Zählerwerte funktioniert das EMS nicht.

5.2. Referenzablauf

Der Referenzablauf des Bewertungsverfahrens konnte durchgeführt werden. Anhand dieser Simulation wurden die Modelle verifiziert. Es wird jeweils ein Tag oder Zyklus und ein Wochenverlauf gezeigt. Bei den Diagrammen mit dem Wochenverlauf ist die Y-Achse immer gleich skaliert (0 – 12'000 W). Dadurch wird ersichtlich, wie hoch die einzelne Leistung im Vergleich zu den anderen Modellen ist.

Die drei Teilprüfungen Winter, Übergangszeit und Sommer wurden nacheinander durchgeführt. Und die Bewertung wurde gemäss Kapitel 3.6 durchgeführt.

5.2.1. Verifizierung Modelle

PV-Anlage

In Abbildung 54 und Abbildung 55 ist jeweils der Sonntag von der Teilprüfung des Winters und der Übergangszeit abgebildet. Dargestellt ist die Leistung der PV-Anlage (rot) und die Einstrahlung der Ost- (blau) und Westseite (orange). Die Unterschiede zwischen dem Winter und der Übergangszeit sind deutlich erkennbar. Die Einstrahlung und die Leistung sind im Winter kleiner als in der Übergangszeit.

Auch gut zu erkennen ist, dass die Leistung von der Einstrahlung abhängig ist. Dies ist besonders gut zu erkennen bei einem starken Anstieg oder Einbruch der Einstrahlung.

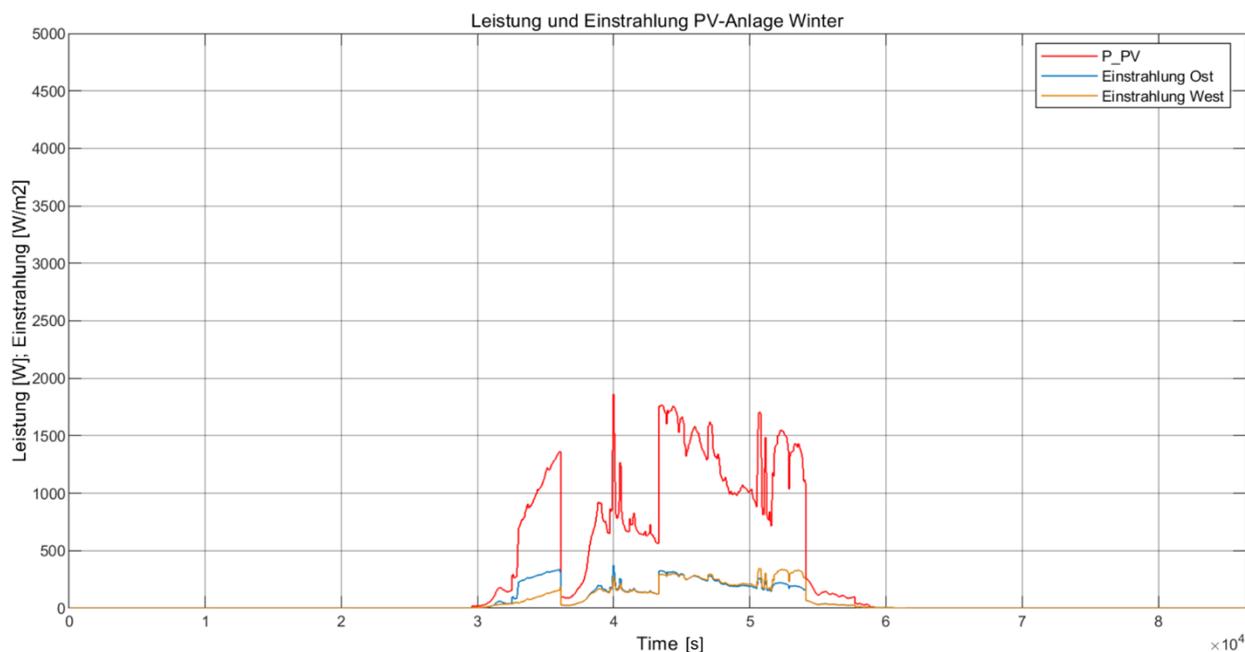


Abbildung 54: Leistung und Einstrahlung PV-Anlage, Sonntag, Winter

Im Diagramm sind vom Sonntag im Winter die Leistung der PV-Anlage (rot) und die Einstrahlung der Ost- (blau) und Westseite (orange) abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 24 h. Quelle: Hochschule Luzern

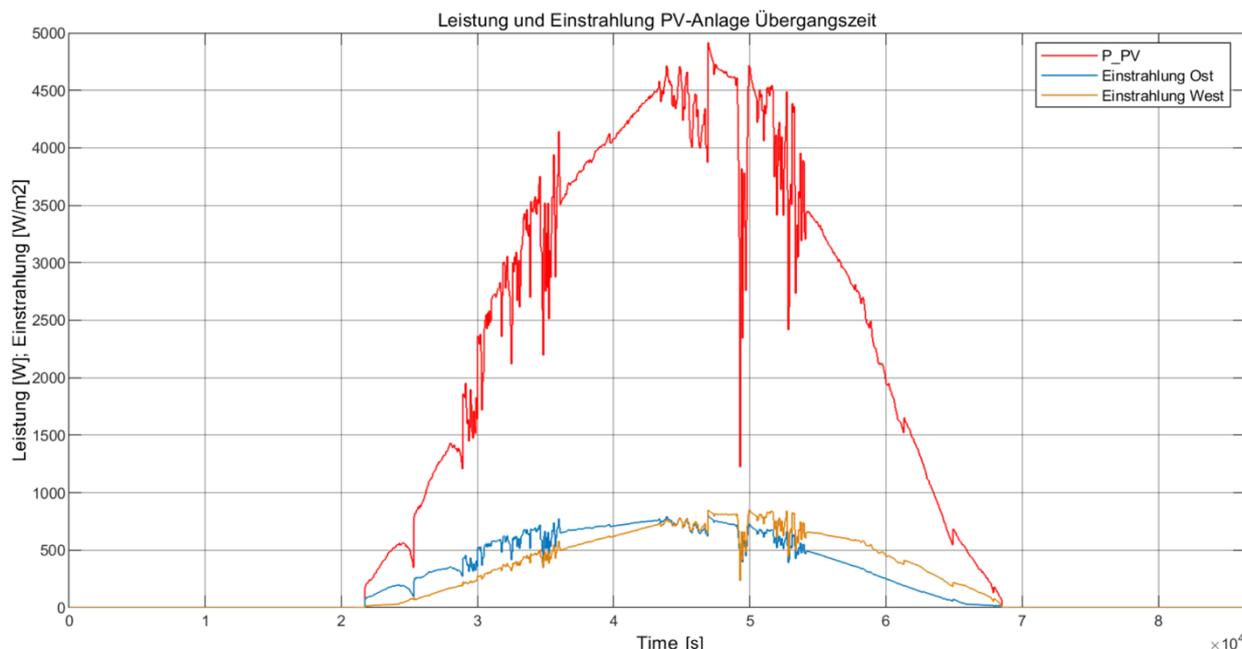


Abbildung 55: Leistung und Einstrahlung PV-Anlage, Sonntag, Übergangszeit
Im Diagramm sind vom Sonntag in der Übergangszeit die Leistung der PV-Anlage (rot) und die Einstrahlung der Ost- (blau) und Westseite (orange) abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 24 h. Quelle: Hochschule Luzern

In den folgenden Diagrammen (Abbildung 56, Abbildung 57 und Abbildung 58) ist jeweils eine Woche im Winter, in der Übergangszeit und im Sommer dargestellt. Damit diese Diagramme besser lesbar sind, wird nur die Leistung der PV-Anlage abgebildet, die Einstrahlung nicht.

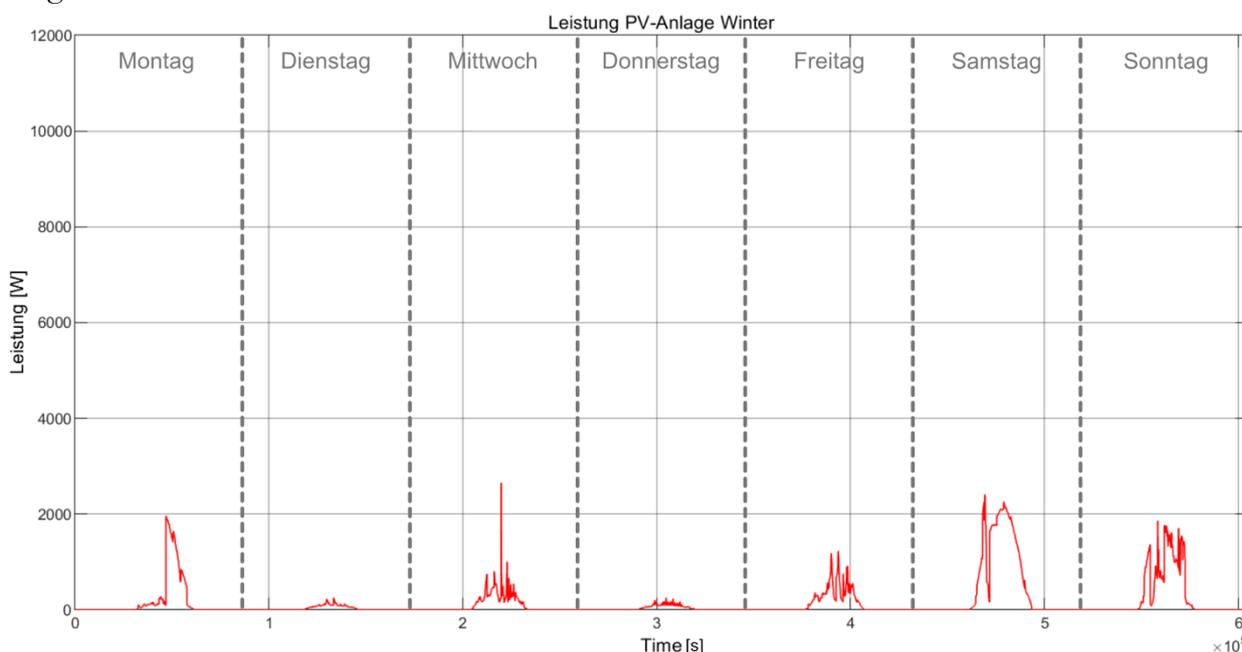


Abbildung 56: Leistung PV-Anlage, 1 Woche, Winter
Im Diagramm ist die Leistung der PV-Anlage im Winter abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

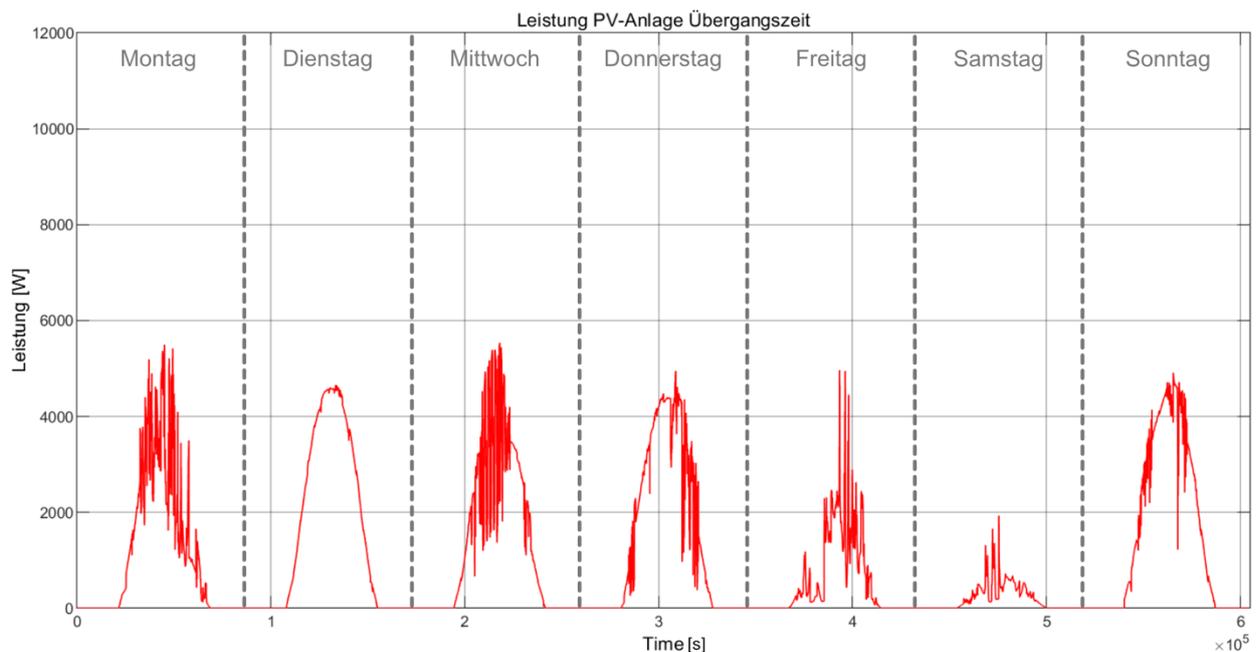


Abbildung 57: Leistung PV-Anlage, 1 Woche, Übergangszeit

Im Diagramm ist die Leistung der PV-Anlage in der Übergangszeit abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

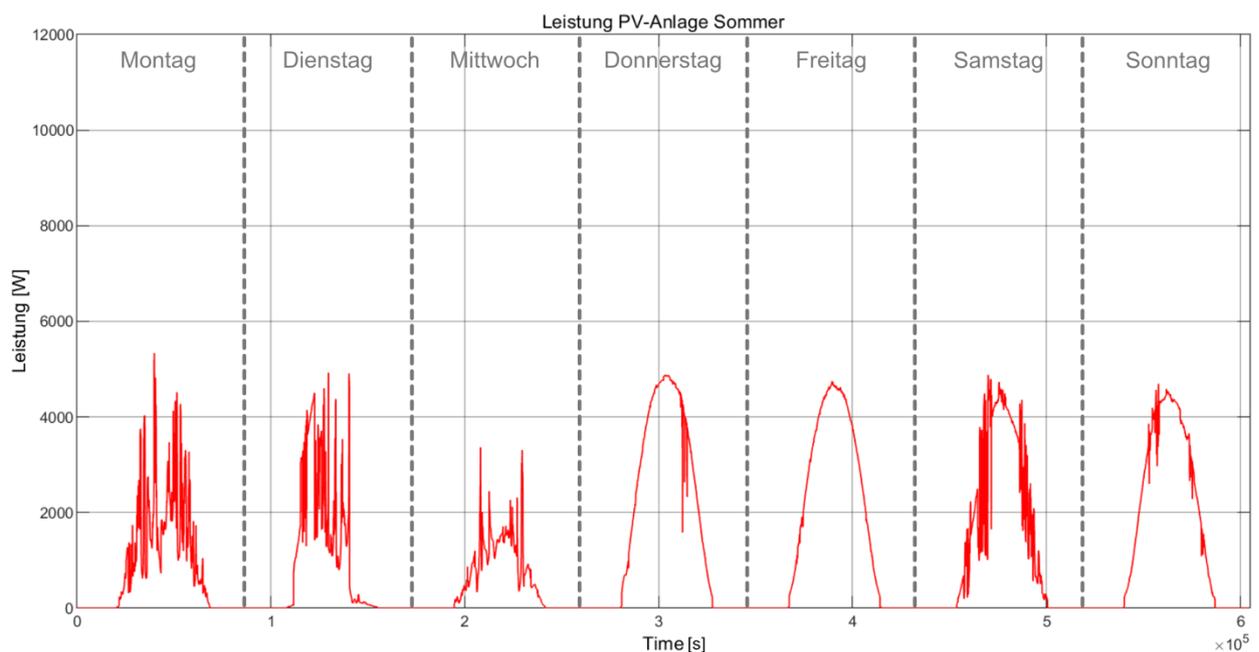


Abbildung 58: Leistung PV-Anlage, 1 Woche, Sommer

Im Diagramm ist die Leistung der PV-Anlage im Sommer abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

Das Modell der PV-Anlage kann nicht mit realen Daten verglichen werden, da diese nicht vorliegen. Aber diese Diagramme bilden das Modell so ab, wie es erwartet wurde.

Allgemeine Verbraucher

In Abbildung 59 ist das simulierte Lastprofil der allgemeinen Verbraucher (vom Sonntag) ersichtlich. Das simulierte Profil entspricht den Vorgaben des Modells.

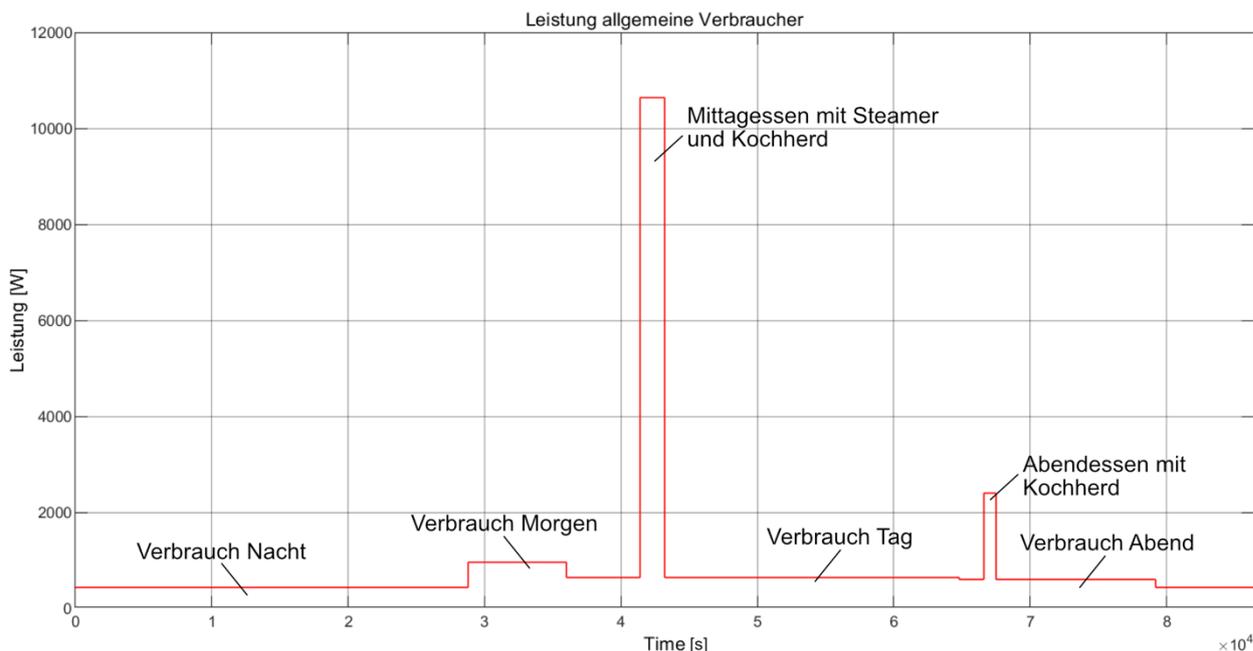


Abbildung 59: Leistung allgemeine Verbraucher, Sonntag
Im Diagramm ist die Leistung der allgemeinen Verbraucher an einem Sonntag abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 24 h. Quelle: Hochschule Luzern

Das Lastprofil während der ganzen Woche ist in Abbildung 60 dargestellt.

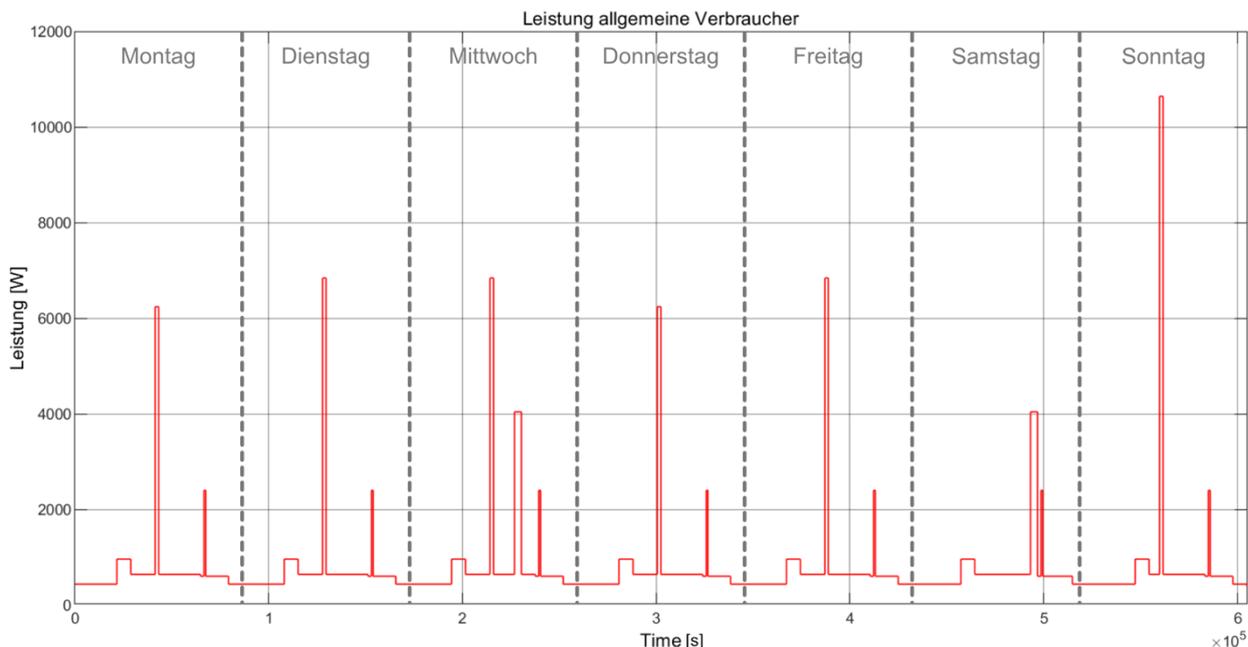


Abbildung 60: Leistung allgemeine Verbraucher, 1 Woche
Im Diagramm ist die Leistung der allgemeinen Verbraucher abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

Wärmepumpe mit Warmwasser- und Energiespeicher

In Abbildung 61 ist ein Entlade- und Ladezyklus des Warmwasserspeichers dargestellt. Eingezeichnet sind die Wärmeenergie des Warmwasserspeichers (grün) und die elektrische Leistung, die die Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb benötigt (rot).

Zu Beginn ist der Speicher vollgeladen. Die Entleerung erfolgt zuerst langsam, weil Nacht ist. Die grüne Kurve ist flach. Am Tag steigt der Warmwasserverbrauch und der Speicher wird schneller entleert. Da ist die Kurve steiler als vorher. Sobald der Speicher leer ist, wird die Wärmepumpe eingeschaltet. Die rote Kurve springt auf 3000 W und auch die grüne Kurve steigt wieder an, denn der Speicher wird geladen. Die Wärmepumpe schaltet nach 58 Minuten wieder ab, weil der Speicher dann voll ist. Nun beginnt der ganze Zyklus wieder von vorne.

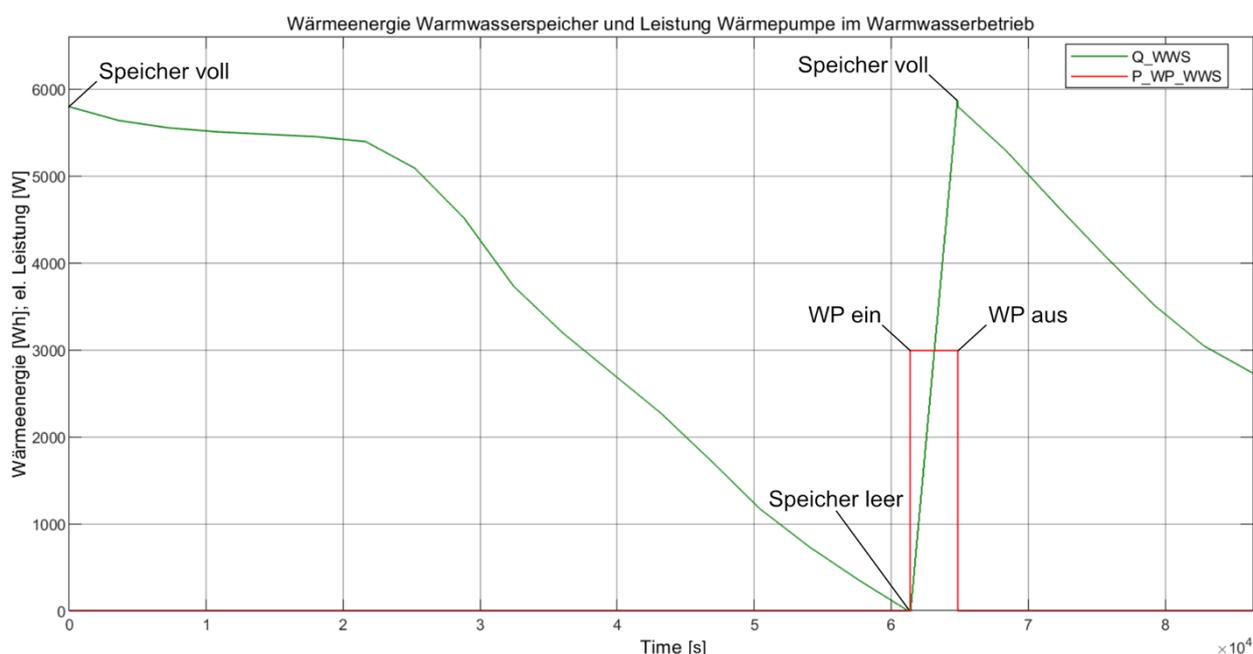


Abbildung 61: Wärmeenergie Warmwasserspeicher und el. Leistung Wärmepumpe

Im Diagramm ist die Wärmeenergie des Warmwasserspeichers (grün) und die Leistung der Wärmepumpe (rot) abgebildet. Zu sehen sind eine Entladung und eine Ladung des Speichers. Die Zeitspanne beträgt 24 h. Quelle: Hochschule Luzern

Zwei Entlade- und Ladezyklen des Energiespeichers sind in Abbildung 62 ersichtlich. Eingezeichnet sind die Wärmeenergie des Energiespeichers (grün) und die elektrische Leistung, die die Wärmepumpe im Heizbetrieb benötigt (rot).

Auch in diesem Diagramm ist der Speicher zu Beginn (Mitternacht) vollgeladen. Die erste Entladung erfolgt innerhalb von ca. 5 h. Darauf schaltet die Wärmepumpe im Heizbetrieb ein. Die Leistung ist niedriger als im Warmwasserbetrieb, weil die Vorlauftemperatur im Heizbetrieb niedriger ist. Nach ca. 2 h 20 Min ist der Speicher wieder geladen. Die zweite Entladung dauert knapp 14 h. Diese findet tagsüber statt und da ist die Aussentemperatur höher als in der Nacht. Die zweite Ladung dauert ca. 2 h. Sie ist kürzer als die Erste, weil auch hier die Aussentemperatur höher ist und dadurch die gleichzeitige Entladung des Speichers kleiner ist.

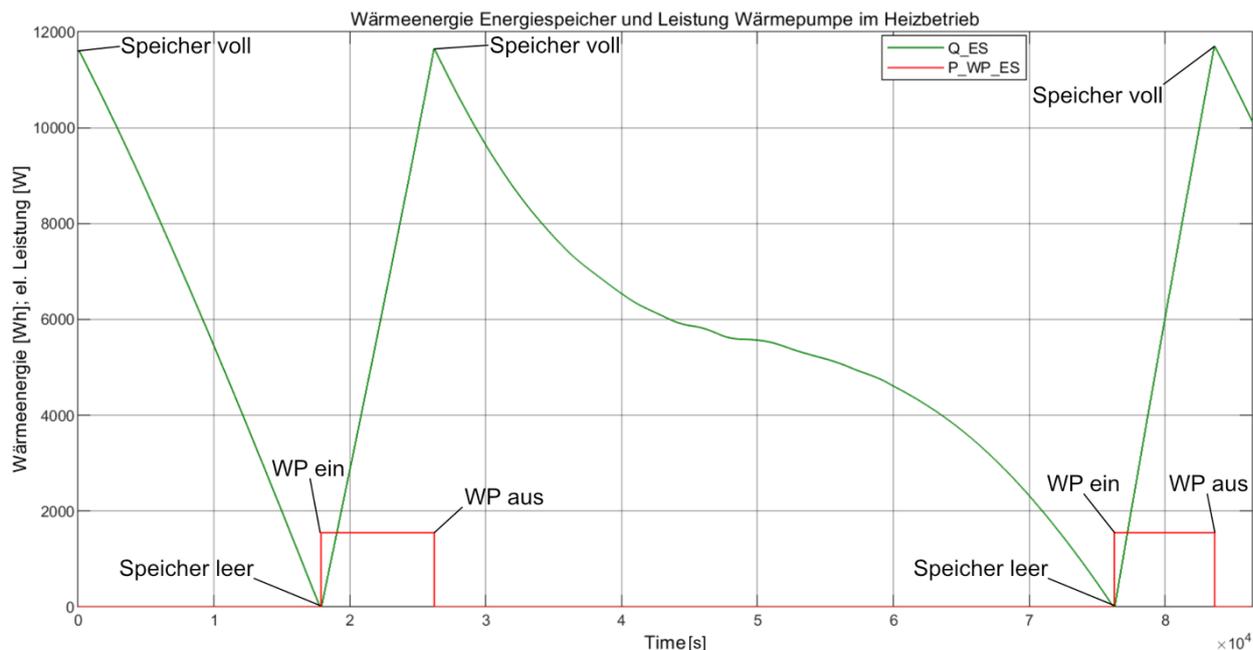


Abbildung 62: Wärmeenergie Energiespeicher und el. Leistung Wärmepumpe
Im Diagramm ist die Wärmeenergie des Energiespeichers (grün) und die Leistung der Wärmepumpe (rot) abgebildet. Zu sehen sind zwei Zyklen mit Entladung und Ladung des Speichers. Die Zeitspanne beträgt 24 h. Quelle: Hochschule Luzern

In den drei folgenden Diagrammen (Abbildung 63, Abbildung 64, Abbildung 65) ist die Gesamtleistung der Wärmepumpe während einer Woche für den Winter, die Übergangszeit und den Sommer abgebildet. Die Leistungen des Warmwasser- und Heizbetriebes sind nicht wie in den oberen Diagrammen separat aufgeführt, sondern zusammen als Gesamtleistung. Trotzdem ist der Unterschied zwischen den zwei Betriebsarten ersichtlich. Im Warmwasserbetrieb ist der Leistungsbezug der Wärmepumpe höher als im Heizbetrieb. Der Warmwasserbetrieb ist in allen drei Diagrammen identisch, weil er nicht von der Ausstemperatur abhängig ist, sondern nur vom Warmwasserbezug. Da wird in jeder Jahreszeit die gleiche Vorgabe nach SIA 385/2 [22] verwendet.

Im Heizbetrieb zeigen sich aber deutliche Unterschiede zwischen den Jahreszeiten. Im Winter schaltet die Wärmepumpe 4 - 6 mal am Tag ein. In der Übergangszeit sind es noch 1 - 3 mal und im Sommer schaltet der Heizbetrieb gar nicht ein.

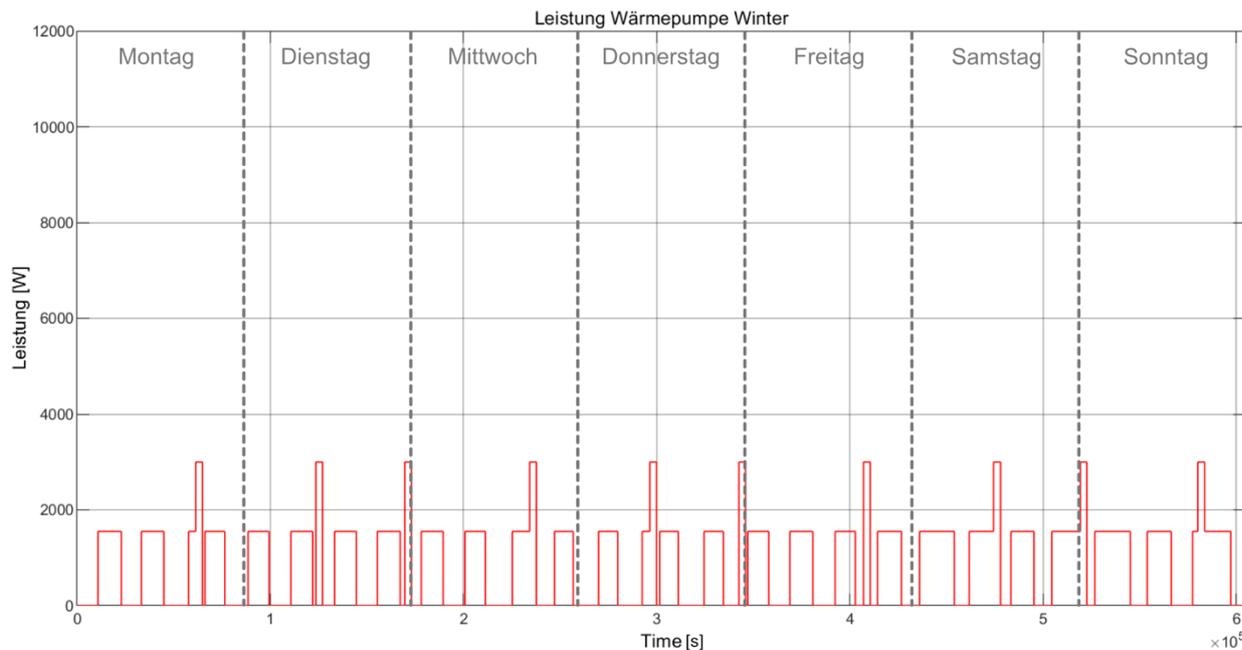


Abbildung 63: Leistung Wärmepumpe, 1 Woche, Winter
 Im Diagramm ist die Leistung der Wärmepumpe im Winter abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

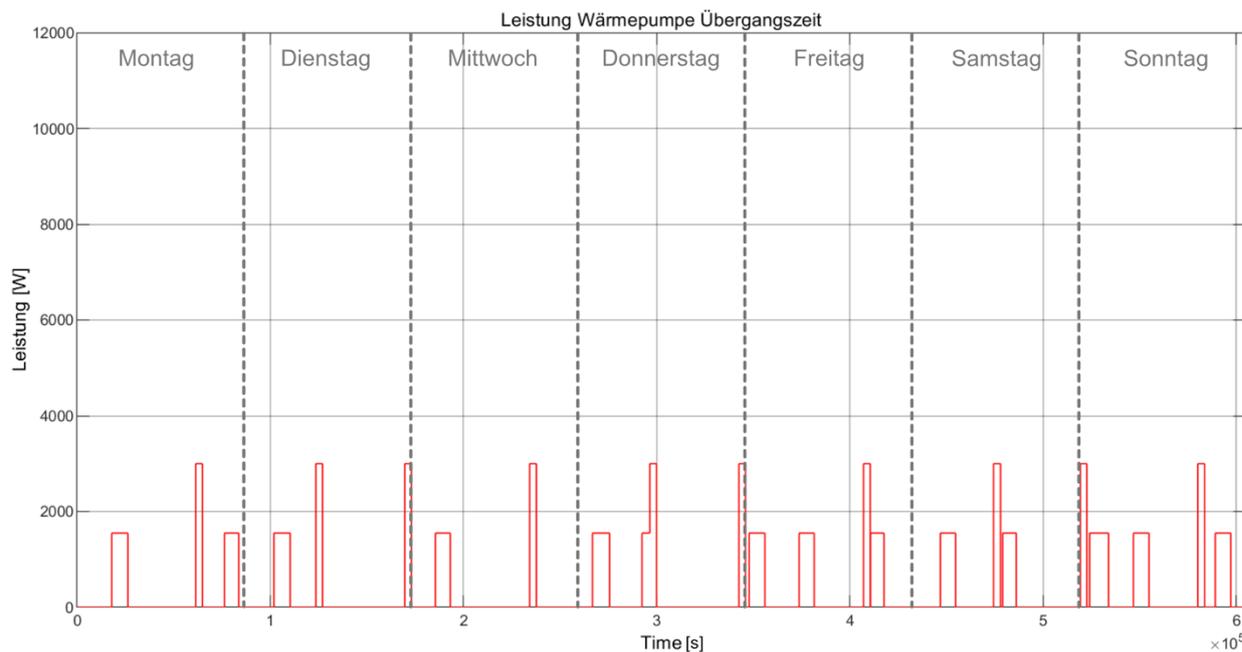


Abbildung 64: Leistung Wärmepumpe, 1 Woche, Übergangszeit
 Im Diagramm ist die Leistung der Wärmepumpe in der Übergangszeit abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

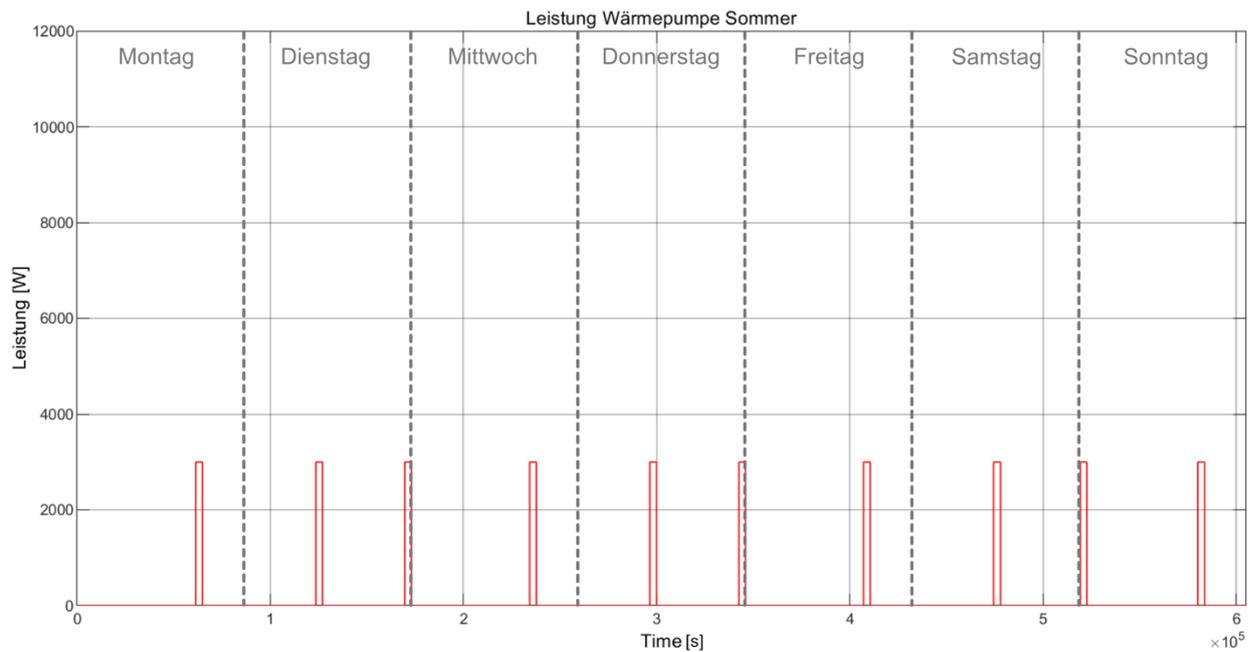


Abbildung 65: Leistung Wärmepumpe, 1 Woche, Sommer

Im Diagramm ist die Leistung der Wärmepumpe im Sommer abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

Geschirrspüler

In Abbildung 66 ist das Lastprofil des Geschirrspülers ersichtlich, das mit Simulink simuliert wurde. Das simulierte Profil entspricht den Vorgaben des Modells.

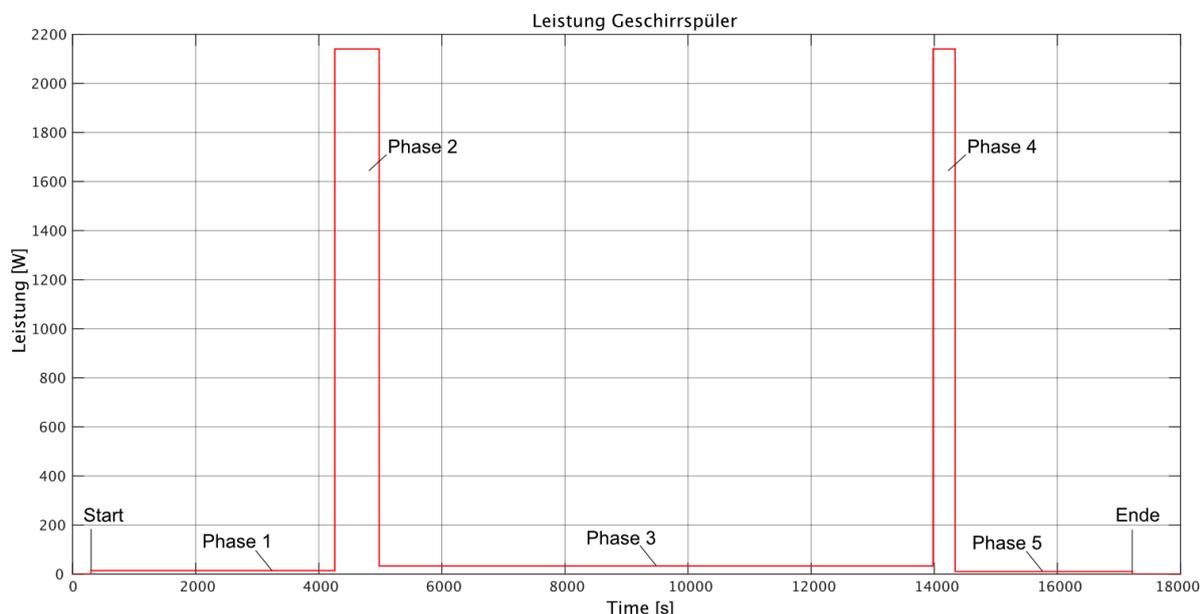


Abbildung 66: Leistung Geschirrspüler, 1 Durchgang Standardprogramm

Im Diagramm ist die Leistung des Geschirrspülers abgebildet. Zu sehen ist ein Durchgang des Standardprogramms. Die Zeitspanne beträgt 5 h. Quelle: Hochschule Luzern

Gemäss Modell wird der Geschirrspüler im Referenzablauf von Montag bis Samstag um 07:45 Uhr und am Sonntag um 09:00 Uhr gestartet. Das ist in Abbildung 67 ersichtlich.

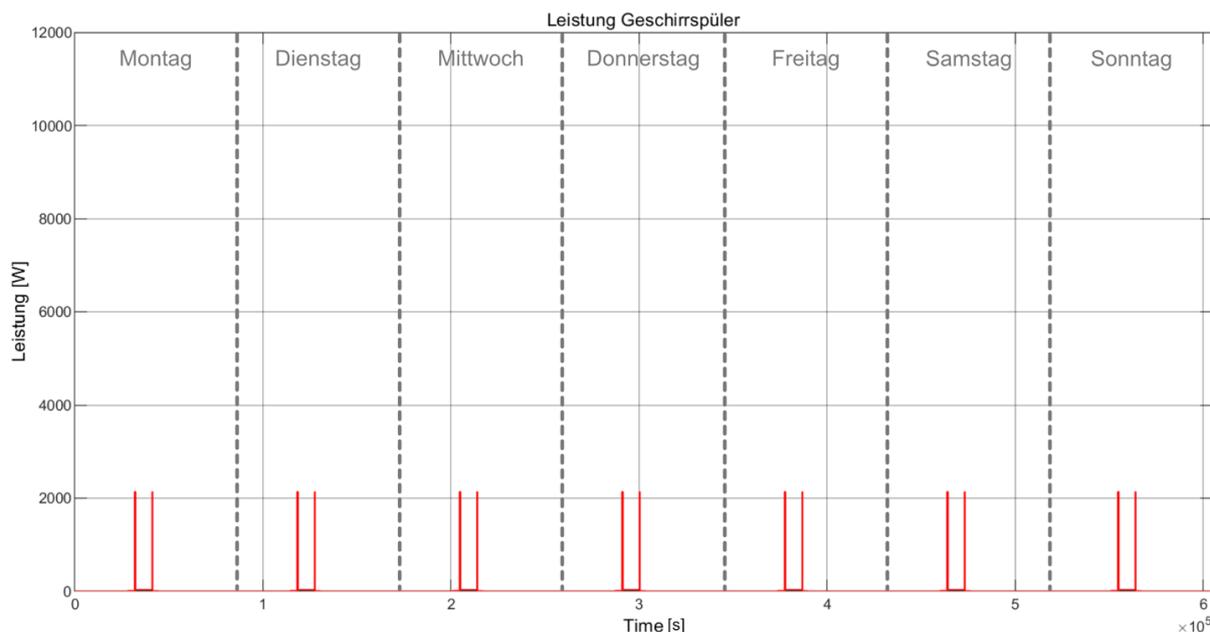


Abbildung 67: Leistung Geschirrspüler, 1 Woche

Im Diagramm ist die Leistung des Geschirrspülers abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

Waschmaschine

In Abbildung 68 ist das simulierte Lastprofil der Waschmaschine ersichtlich. Das simulierte Profil entspricht den Vorgaben des Modells.

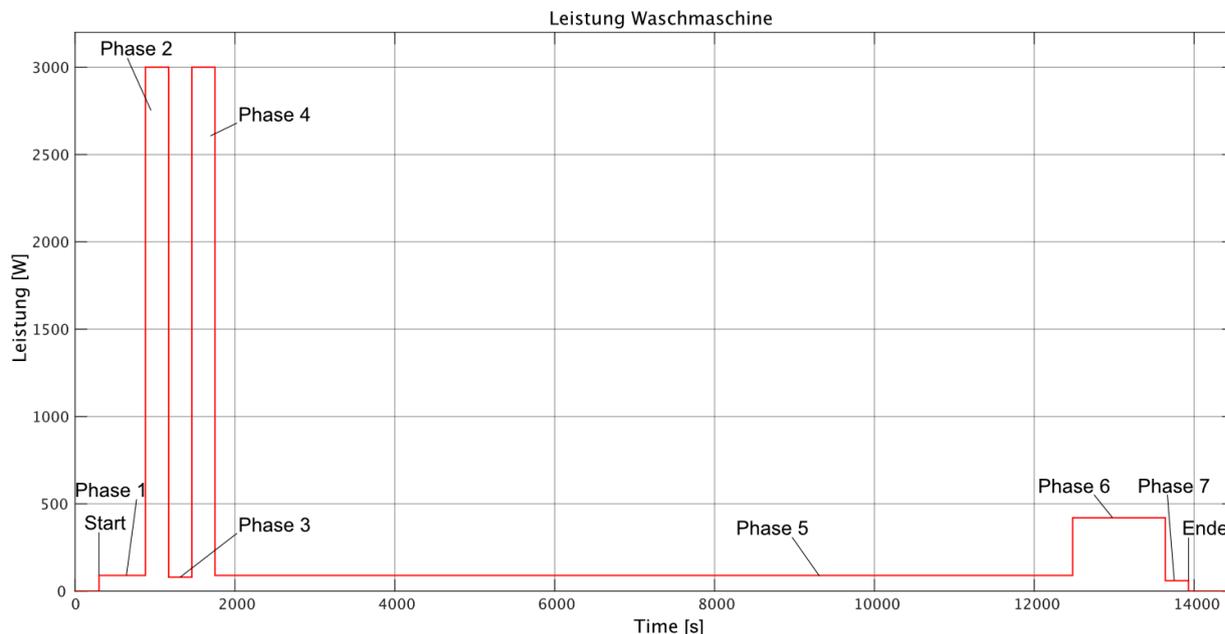


Abbildung 68: Leistung Waschmaschine, 1 Durchgang Standardprogramm

Im Diagramm ist die Leistung der Waschmaschine abgebildet. Zu sehen ist ein Durchgang des Standardprogramms. Die Zeitspanne beträgt 4 h. Quelle: Hochschule Luzern

Die Waschmaschine wird im Referenzablauf gemäss Modell am Montag zweimal und von Dienstag bis Freitag einmal am Tag gestartet. Das ist in Abbildung 69 ersichtlich.

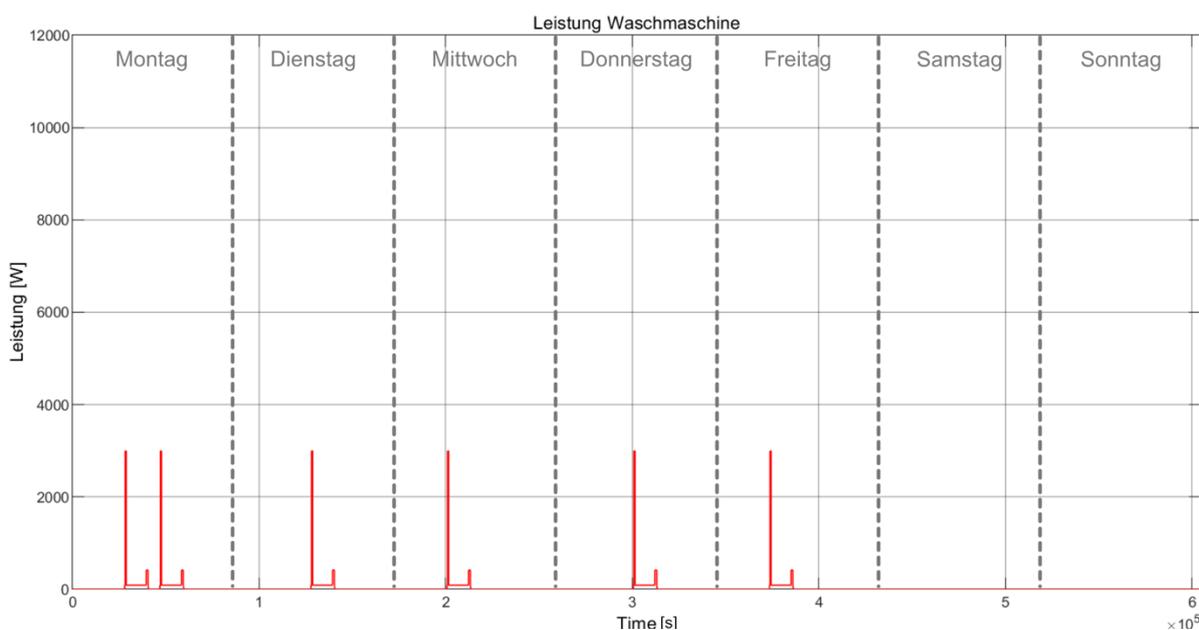


Abbildung 69: Leistung Waschmaschine, 1 Woche,

Im Diagramm ist die Leistung der Waschmaschine abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

Tumbler

In Abbildung 70 ist das Lastprofil des Tumblers ersichtlich, das mit Simulink simuliert wurde. Das simulierte Profil entspricht den Vorgaben des Modells.

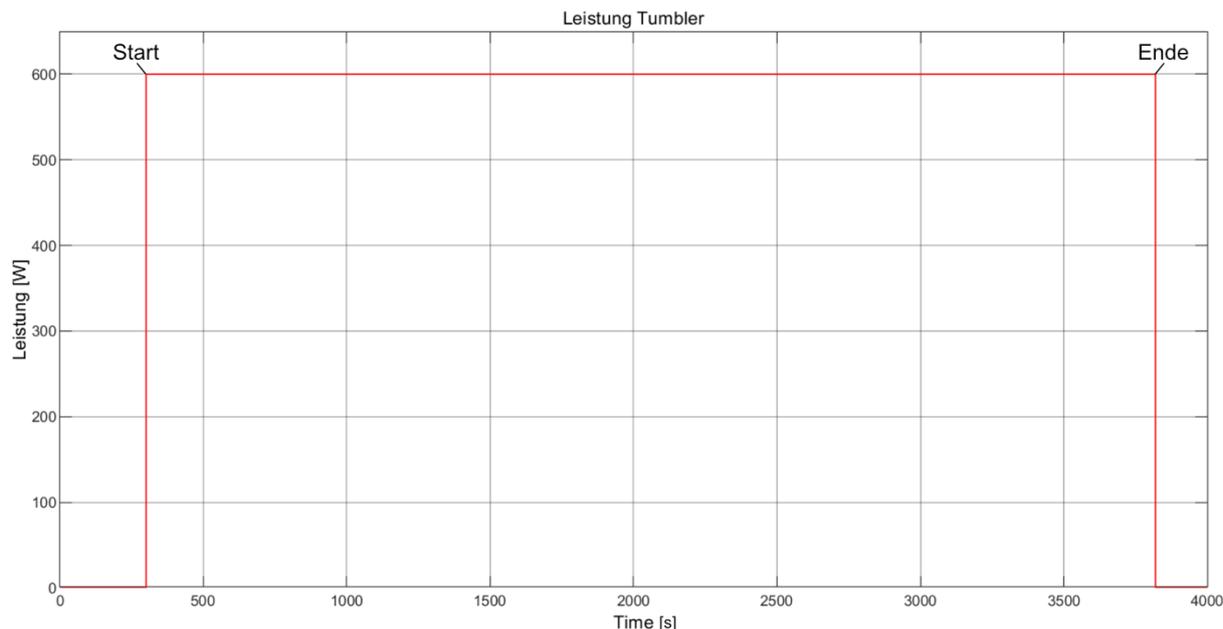


Abbildung 70: Leistung Tumbler, 1 Durchgang Standardprogramm
Im Diagramm ist die Leistung des Tumblers abgebildet. Zu sehen ist ein Durchgang des Standardprogramms. Die Zeitspanne beträgt 1 h 6 Min. Quelle: Hochschule Luzern

Gemäss Modell wird der Tumbler im Referenzablauf am Mittwoch und am Freitag um 15:30 Uhr gestartet. Das ist in Abbildung 71 ersichtlich.

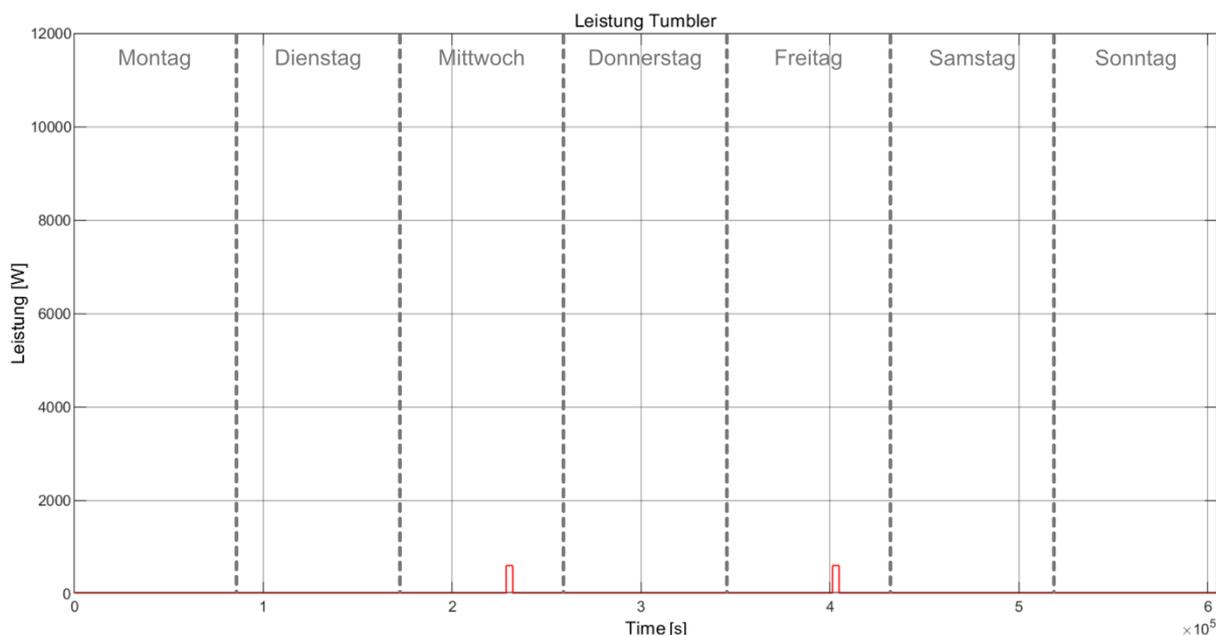


Abbildung 71: Leistung Tumbler, 1 Woche,
Im Diagramm ist die Leistung des Tumblers abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

Ladestation Elektroauto

Die Ladeleistung und Kapazität des Elektroautos während eines Ladevorganges ist in Abbildung 72 dargestellt. Sobald das Auto wegfährt, wird der Verbrauch für die Fahrstrecke von der Kapazität subtrahiert. Dies ist eine Vereinfachung im Modell, die aber keinen Einfluss auf die Ladung hat. Die Kapazität würde eigentlich langsam sinken, während das Elektroauto unterwegs ist. Wenn das Auto zurück ist und die Ladung startet, ist die Kapazität auf den gleichen Wert gesunken. Da der Wert der Kapazität aber für den weiteren Verlauf erst zu diesem Zeitpunkt benötigt wird, spielt es keine Rolle, wann und wie der Wert gesenkt wird. Er muss lediglich stimmen, wenn die Ladung startet.

Beim Ladevorgang sind Phase 1 und 2 gut erkennbar. In Phase 1 ist die Leistung konstant und in Phase 2 sinkt sie linear, bis das Auto vollgeladen ist.

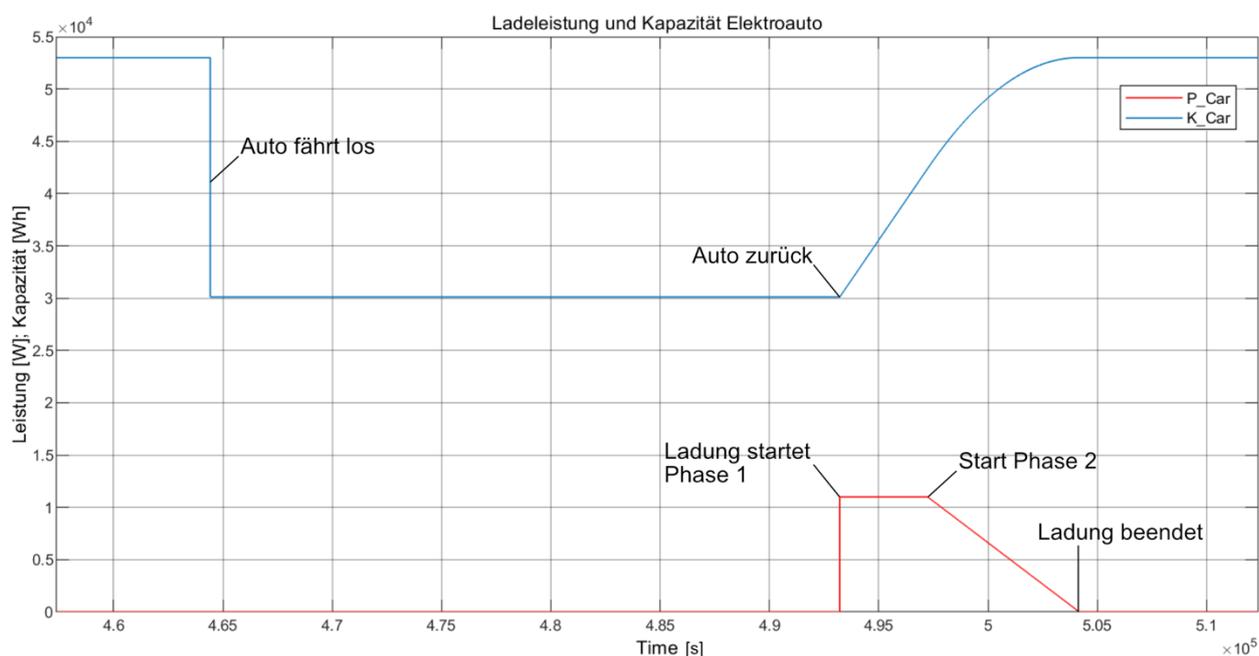


Abbildung 72: Ladeleistung und Kapazität Elektroauto, 1 Ladevorgang

Im Diagramm ist die Ladeleistung (rot) und Kapazität des Elektroautos (blau) abgebildet. Zu sehen ist ein Ladevorgang. Die Zeitspanne beträgt 16 h 40 Min. Quelle: Hochschule Luzern

In Abbildung 73 ist die ganze Woche abgebildet. Am Dienstag und Donnerstag lädt das Auto über den Mittag während 1.5 h. Das reicht gerade nicht aus, um das Auto ganz aufzuladen. Deshalb sinkt beim nächsten Gebrauch die Kapazität weiter ab, obwohl dieselbe Strecke gefahren wird.

Am Samstag wird eine grössere Strecke gefahren. Deshalb sinkt die Kapazität stärker und die anschliessende Ladung dauert länger.

Das Wochenprofil ist in jeder Jahreszeit gleich.

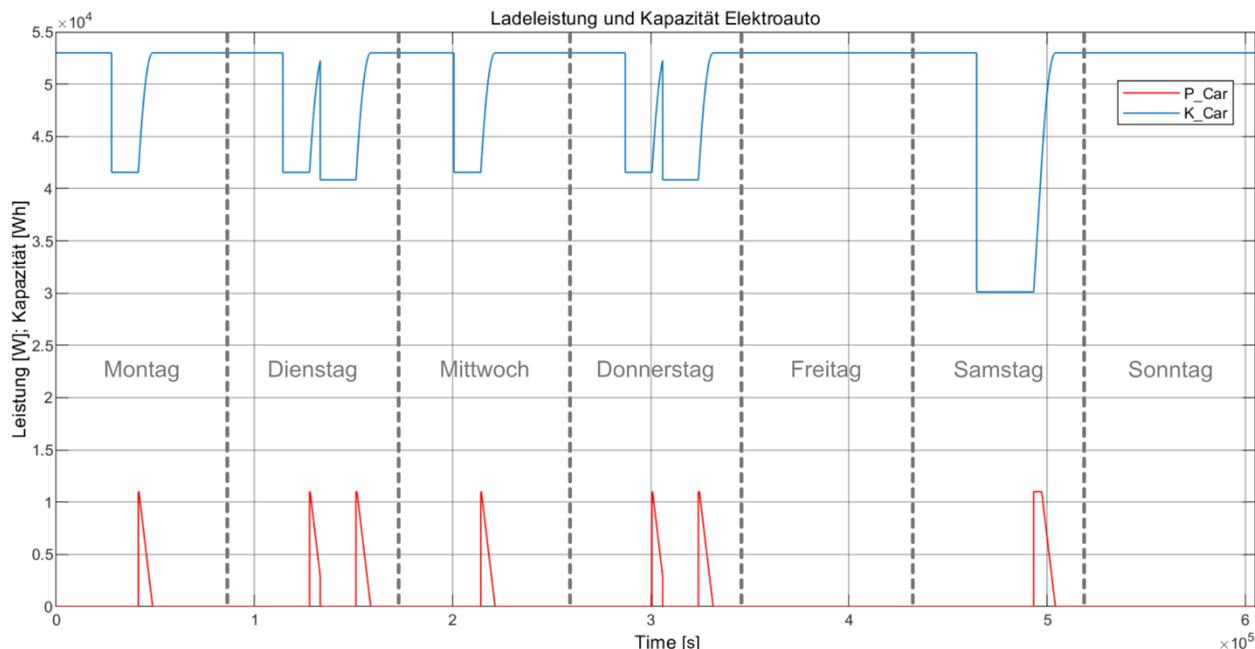


Abbildung 73: Ladeleistung und Kapazität Elektroauto, 1 Woche
Im Diagramm ist die Ladeleistung (rot) und Kapazität des Elektroautos (blau) abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Quelle: Hochschule Luzern

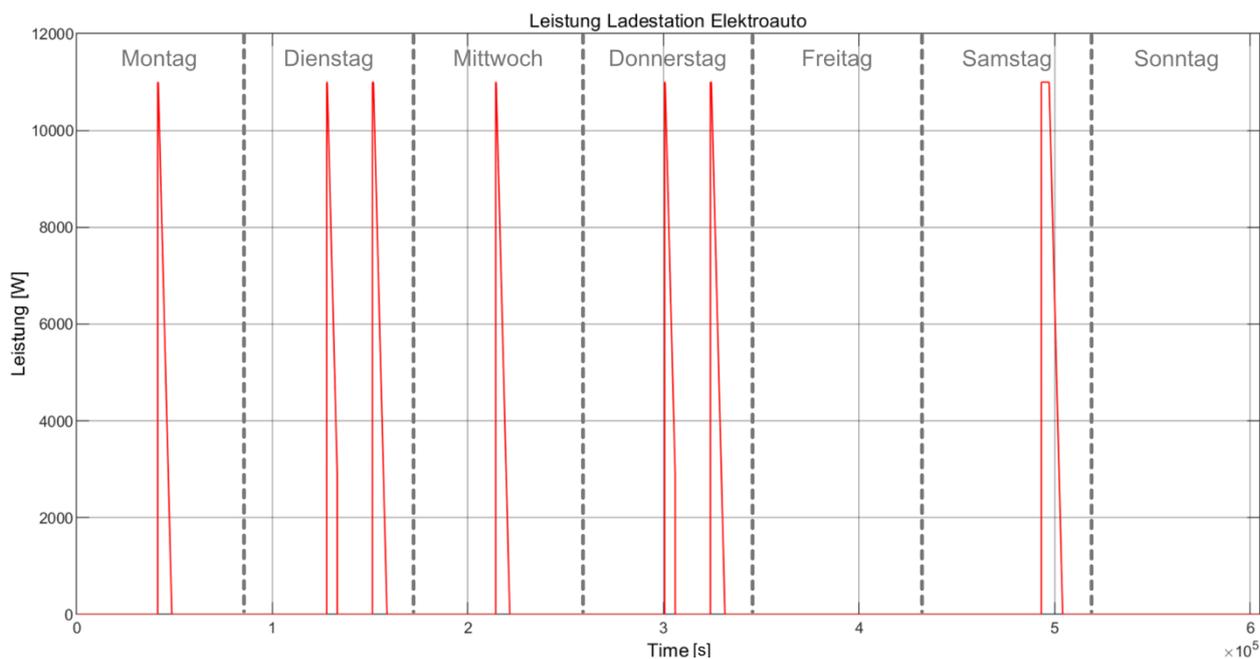


Abbildung 74: Leistung Ladestation Elektroauto, 1 Woche,
Im Diagramm ist die Leistung der Ladestation Elektroauto abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Die Y-Achse geht von 0 – 12'000 W, so wie bei den Wochenansichten der anderen Modelle. Dadurch kann die Leistung besser mit den anderen Modellen verglichen werden. Quelle: Hochschule Luzern

5.2.2. Resultate Referenzablauf

Winter

In Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die Resultate der Teilprüfung Winter als Zahlen aufgelistet und in den nachfolgenden Abbildungen sind sie als Diagramme abgebildet.

Tabelle 4: Resultate Referenzablauf Winter

Bezeichnung	Resultat
PV-Produktion	27.8 kWh
Gesamtverbrauch	391.3 kWh
Netzbezug gesamt	367.8 kWh
Netzbezug Hochtarif	210.4 kWh
Netzbezug Niedertarif	157.4 kWh
Eigenverbrauch	23.5 kWh
Rückspeisung	4.3 kWh
Eigenverbrauchsanteil	84.5 %
Autarkiegrad	6.0 %

Der Eigenverbrauchsanteil ist im Winter mit 84.5 % sehr hoch. Der Autarkiegrad hingegen ist mit 6.0 % klein. Das liegt daran, dass die PV-Produktion im Vergleich zum Gesamtverbrauch sehr klein ist und daher der Grossteil der produzierten Energie selbst verbraucht werden konnte. Entsprechend ist der Netzbezug gross und die Rückspeisung klein.

Tabelle 5: Energiekosten Referenzablauf Winter

Tarif	Energiemenge	Preis	Energiekosten
Netzbezug Hochtarif	210.4 kWh	22.13 Rp./kWh	+46.55 CHF
Netzbezug Niedertarif	157.4 kWh	19.27 Rp./kWh	+30.35 CHF
Nutzung PV-Energie	23.5 kWh	16.7 Rp./kWh	+3.90 CHF
Verkauf PV-Energie	4.3 kWh	5.75 Rp./kWh	-0.25 CHF
Energiekosten Winter			80.55 CHF

In Abbildung 75 ist der Sonntag der Teilprüfung Winter ersichtlich. Abgebildet sind die Leistungen des Gesamtverbrauchs (rot), der Produktion der PV-Anlage (grün), des Netzbezugs (blau) und der Rückspeisung (orange). Im Winter ist die PV-Produktion klein und ein Grossteil kann direkt verbraucht werden. Entsprechend ist die Rückspeisung klein. Hingegen ist der Netzbezug gross, weil mit der PV-Produktion nur ein kleiner Teil des Gesamtverbrauchs abgedeckt werden kann.

Zur Gesamtübersicht ist in Abbildung 76 die gesamte Prüfdauer einer Woche dargestellt. Da ist auch ersichtlich, dass z. B. am Dienstag und am Donnerstag die PV-Produktion sehr klein ist und die gesamte Energie gleich verbraucht wird.

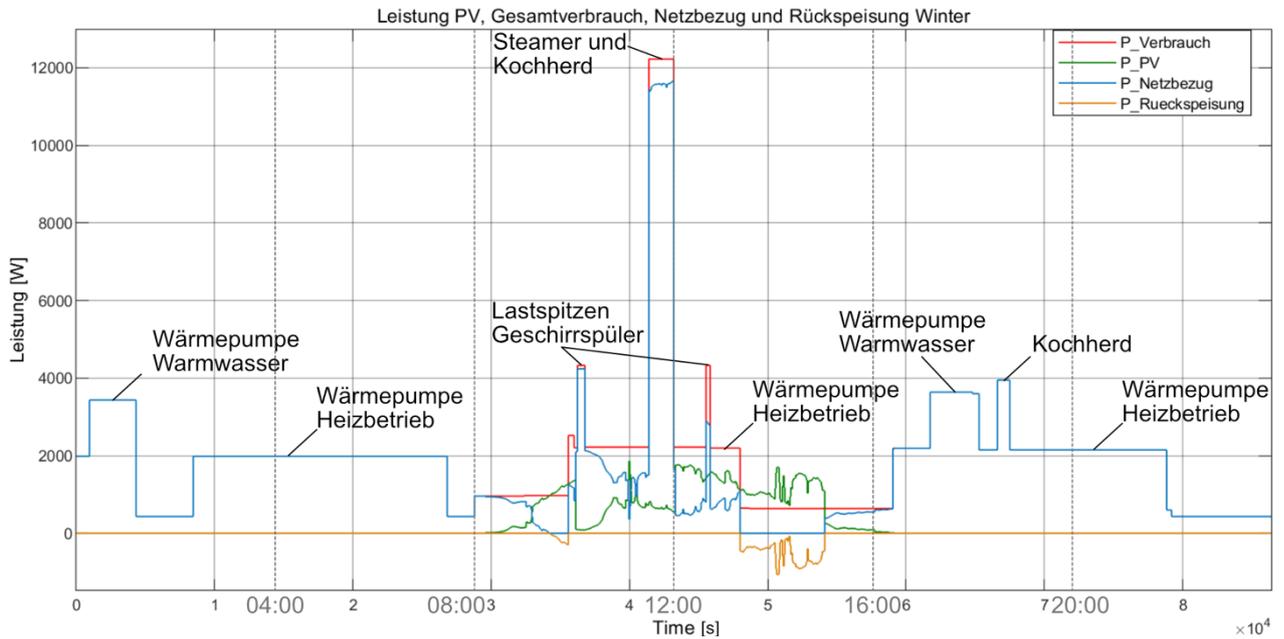


Abbildung 75: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, Sonntag, Winter
Im Diagramm sind vom Sonntag im Winter die Leistungen des Gesamtverbrauchs (rot), der Produktion der PV-Anlage (grün), des Netzbezugs (blau) und der Rückspeisung (orange) abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 24 h. Quelle: Hochschule Luzern

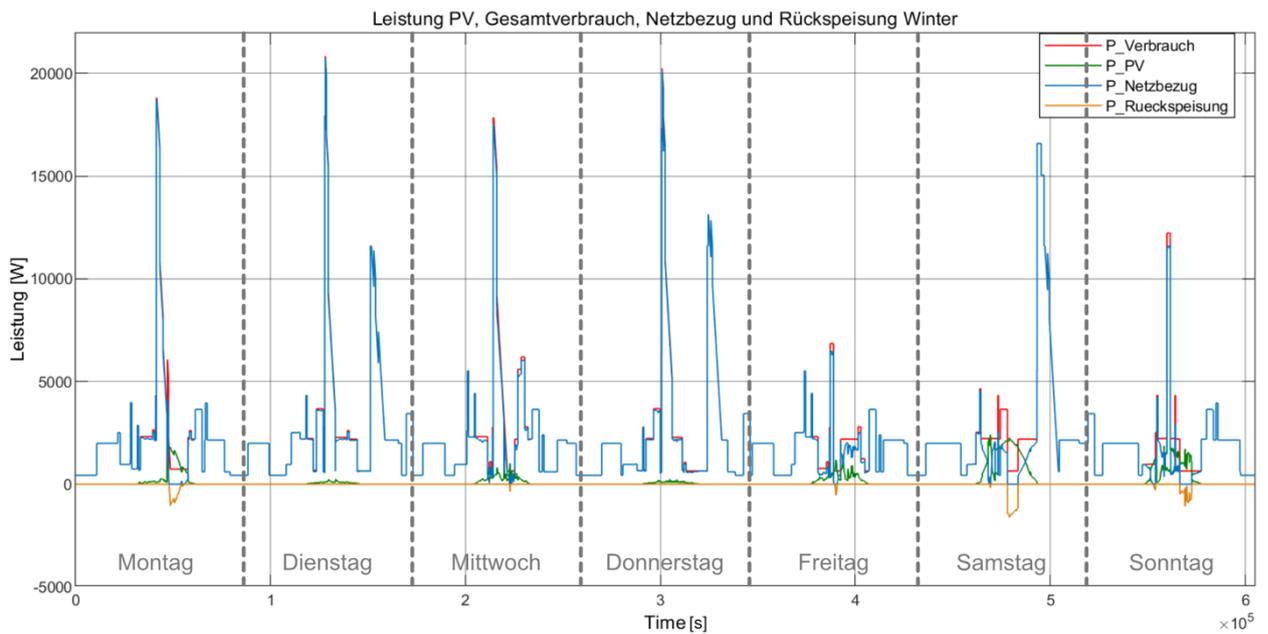


Abbildung 76: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, 1 Woche, Winter
Im Diagramm sind die Leistungen des Gesamtverbrauchs (rot), der Produktion der PV-Anlage (grün), des Netzbezugs (blau) und der Rückspeisung (orange) im Winter abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Quelle: Hochschule Luzern

Übergangszeit

In Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die Resultate der Teilprüfung Übergangszeit als Zahlen aufgelistet und in den nachfolgenden Abbildungen sind sie als Diagramme abgebildet.

Tabelle 6: Resultate Referenzablauf Übergangszeit

Bezeichnung	Resultat
PV-Produktion	177.2 kWh
Gesamtverbrauch	306.1 kWh
Netzbezug gesamt	213.0 kWh
Netzbezug Hochtarif	99.3 kWh
Netzbezug Niedertarif	113.7 kWh
Eigenverbrauch	93.1 kWh
Rückspeisung	84.1 kWh
Eigenverbrauchsanteil	52.5 %
Autarkiegrad	30.4 %

Ca. die Hälfte der PV-Produktion konnte in der Übergangszeit selbst verbraucht werden. Die andere Hälfte musste ins Netz zurückgespiessen werden. Das zeigt der Eigenverbrauchsanteil von 52.5 %. Der Autarkiegrad liegt mit 30.4 % deutlich über dem vom Winter mit 6.0 %. Das heisst, knapp 1/3 des Gesamtverbrauches konnte mit der PV-Produktion gedeckt werden. Die restlichen 2/3 mussten vom Netz bezogen werden. Der Gesamtverbrauch ist in der Übergangszeit geringer als im Winter. Das liegt daran, dass die Wärmepumpe weniger oft benötigt wurde.

Tabelle 7: Energiekosten Referenzablauf Übergangszeit

Tarif	Energiemenge	Preis	Energiekosten
Netzbezug Hochtarif	99.3 kWh	22.13 Rp./kWh	+22.00 CHF
Netzbezug Niedertarif	113.7 kWh	19.27 Rp./kWh	+21.90 CHF
Nutzung PV-Energie	93.1 kWh	16.7 Rp./kWh	+15.55 CHF
Verkauf PV-Energie	84.1 kWh	5.75 Rp./kWh	-4.85 CHF
Energiekosten Übergangszeit			54.60 CHF

In Abbildung 77 ist der Sonntag der Teilprüfung Übergangszeit ersichtlich. Abgebildet sind die Leistungen des Gesamtverbrauchs (rot), der Produktion der PV-Anlage (grün), des Netzbezugs (blau) und der Rückspeisung (orange). In der Übergangszeit ist die PV-Produktion rund 6-mal grösser als im Winter. Nun kann etwa die Hälfte direkt verbraucht werden.

Zur Gesamtübersicht ist in Abbildung 78 die gesamte Prüfdauer einer Woche dargestellt. Da ist der grosse Anteil der Rückspeisung ersichtlich. Bei den grossen Lastspitzen reicht die PV-Produktion nicht aus und es wird Energie vom Netz bezogen.

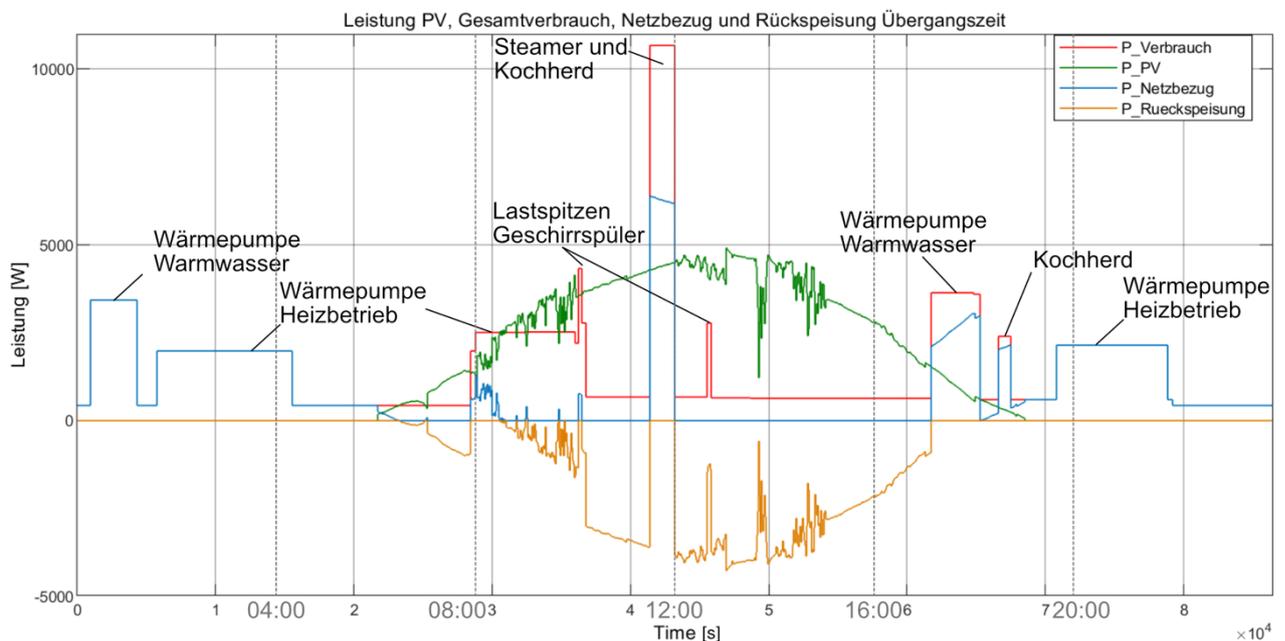


Abbildung 77: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, Sonntag, Übergangszeit
Im Diagramm sind vom Sonntag in der Übergangszeit die Leistungen des Gesamtverbrauchs (rot), der Produktion der PV-Anlage (grün), des Netzbezugs (blau) und der Rückspeisung (orange) abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 24 h. Quelle: Hochschule Luzern

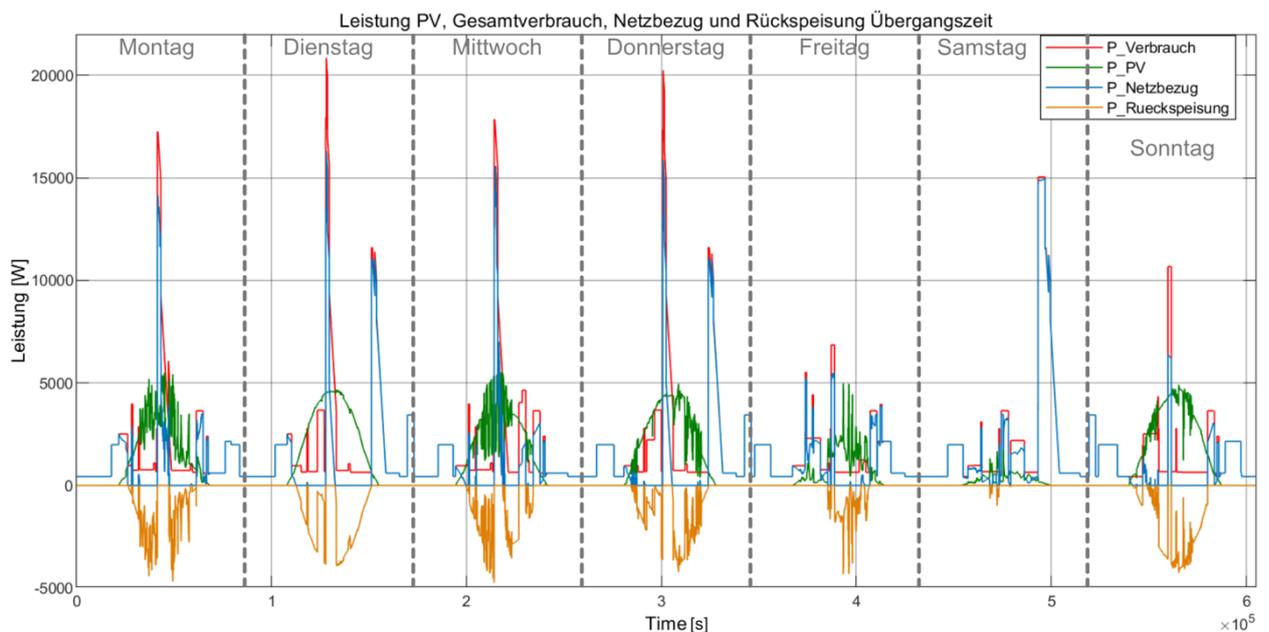


Abbildung 78: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, 1 Woche, Übergangszeit
Im Diagramm sind die Leistungen des Gesamtverbrauchs (rot), der Produktion der PV-Anlage (grün), des Netzbezugs (blau) und der Rückspeisung (orange) in der Übergangszeit abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Quelle: Hochschule Luzern

Sommer

In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die Resultate der Teilprüfung Sommer als Zahlen aufgelistet und in den nachfolgenden Abbildungen sind sie als Diagramme abgebildet.

Tabelle 8: Resultate Referenzablauf Sommer

Bezeichnung	Resultat
PV-Produktion	195.6 kWh
Gesamtverbrauch	259.4 kWh
Netzbezug gesamt	174.1 kWh
Netzbezug Hochtarif	98.3 kWh
Netzbezug Niedertarif	75.8 kWh
Eigenverbrauch	85.3 kWh
Rückspeisung	110.3 kWh
Eigenverbrauchsanteil	43.6 %
Autarkiegrad	32.9 %

Im Sommer konnte 43.6 % der PV-Produktion selbst verbraucht werden. Mehr als die Hälfte musste ins Netz zurückgespiessen werden. Der Autarkiegrad liegt mit 32.9 % im gleichen Bereich, wie in der Übergangszeit (30.4 %). Das heisst, knapp 1/3 des Gesamtverbrauches konnte mit der PV-Produktion gedeckt werden. Die restlichen 2/3 mussten vom Netz bezogen werden.

Der Gesamtverbrauch ist im Sommer geringer als im Winter und in der Übergangszeit. Das liegt daran, dass die Wärmepumpe weniger oft benötigt wurde.

Tabelle 9: Energiekosten Referenzablauf Sommer

Tarif	Energiemenge	Preis	Energiekosten
Netzbezug Hochtarif	98.3 kWh	22.13 Rp./kWh	+21.75 CHF
Netzbezug Niedertarif	75.8 kWh	19.27 Rp./kWh	+14.60 CHF
Nutzung PV-Energie	85.3 kWh	16.7 Rp./kWh	+14.25 CHF
Verkauf PV-Energie	110.3 kWh	5.75 Rp./kWh	-6.35 CHF
Energiekosten Sommer			44.25 CHF

In Abbildung 79 ist der Sonntag der Teilprüfung Sommer ersichtlich. Abgebildet sind die Leistungen des Gesamtverbrauchs (rot), der Produktion der PV-Anlage (grün), des Netzbezugs (blau) und der Rückspeisung (orange). Die PV-Produktion ist im Sommer nur knapp 10 % höher als in der Übergangszeit. In dem Beispiel vom Sonntag ist gut ersichtlich, dass der Gesamtverbrauch die meiste Zeit unterhalb der PV-Produktion liegt.

Lediglich die zwei Lastspitzen am Mittag und Abend liegen darüber. Da ist dann sogar ein Netzbezug notwendig.

Zur Gesamtübersicht ist in Abbildung 80 die gesamte Prüfdauer einer Woche dargestellt. Da ist der grosse Anteil der Rückspeisung ersichtlich.

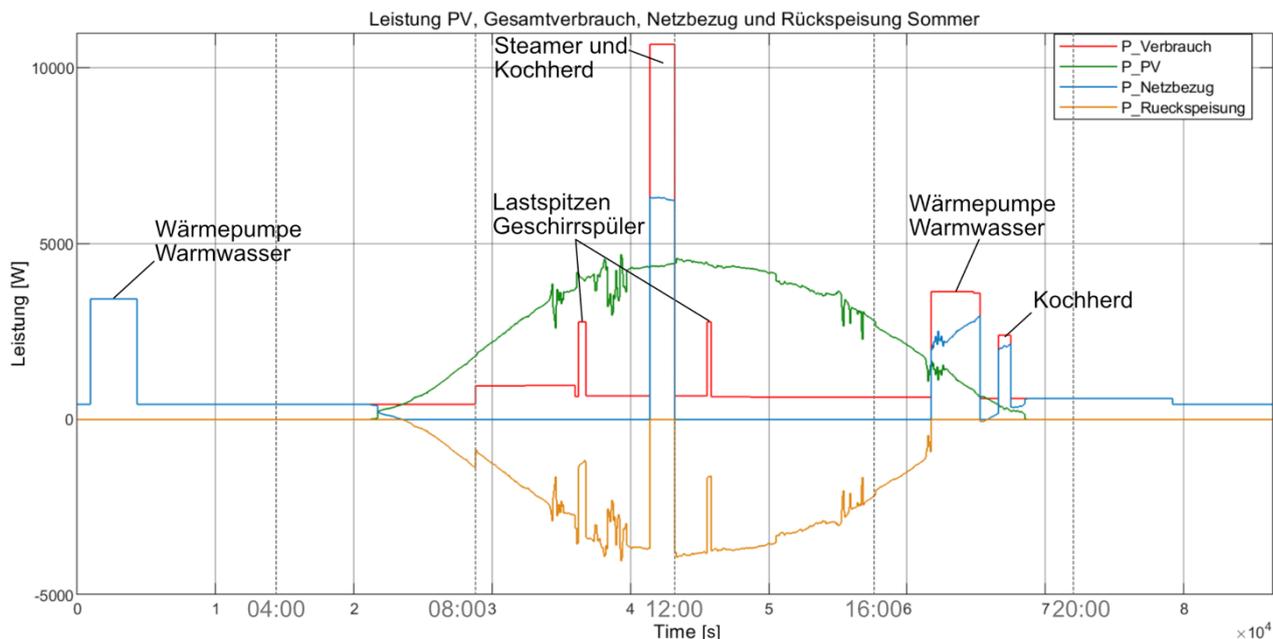


Abbildung 79: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, Sonntag, Sommer
Im Diagramm sind vom Sonntag im Sommer die Leistungen des Gesamtverbrauchs (rot), der Produktion der PV-Anlage (grün), des Netzbezugs (blau) und der Rückspeisung (orange) abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 24 h. Quelle: Hochschule Luzern

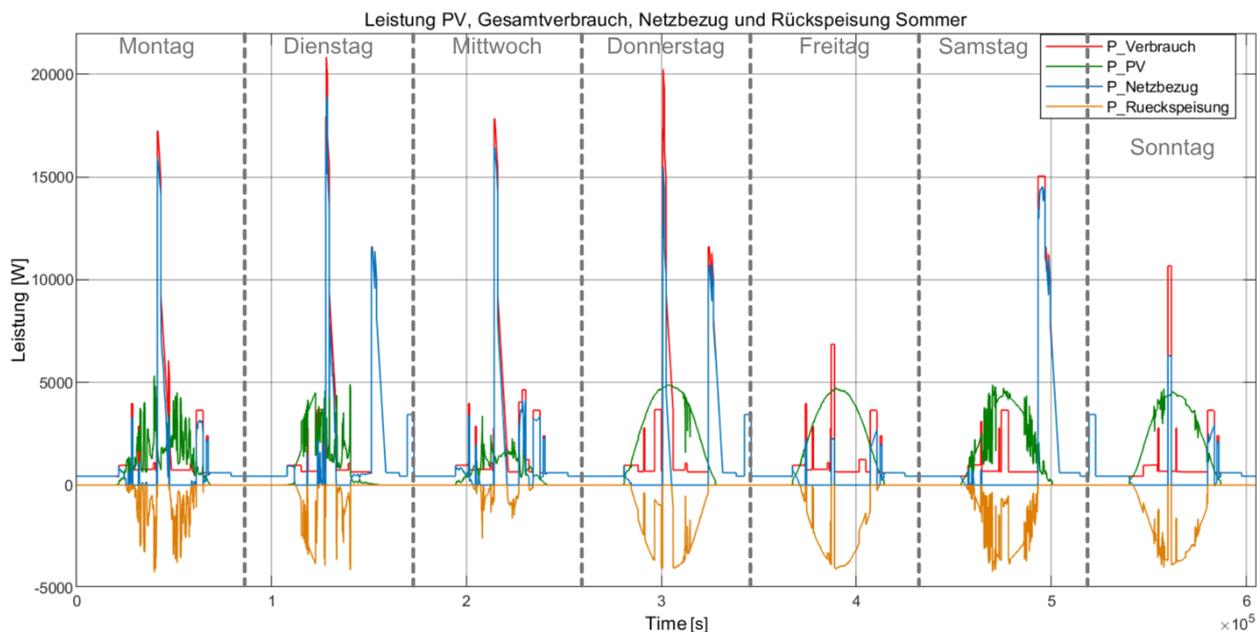


Abbildung 80: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, 1 Woche, Sommer
Im Diagramm sind die Leistungen des Gesamtverbrauchs (rot), der Produktion der PV-Anlage (grün), des Netzbezugs (blau) und der Rückspeisung (orange) im Sommer abgebildet. Die Zeitspanne beträgt 1 Woche. Quelle: Hochschule Luzern

Bewertung

In den folgenden drei Abbildungen sind die Ergebnisse der drei Teilprüfungen des Referenzablaufs und die Gesamtergebnisse zusammengefasst. Systemkosten sind keine aufgeführt, weil der Referenzablauf ohne EMS durchgeführt wird. Die Grafiken verdeutlichen nochmals, dass die Übergangszeit und der Sommer nahe beieinander liegen und der Winter sich deutlich von ihnen abhebt.

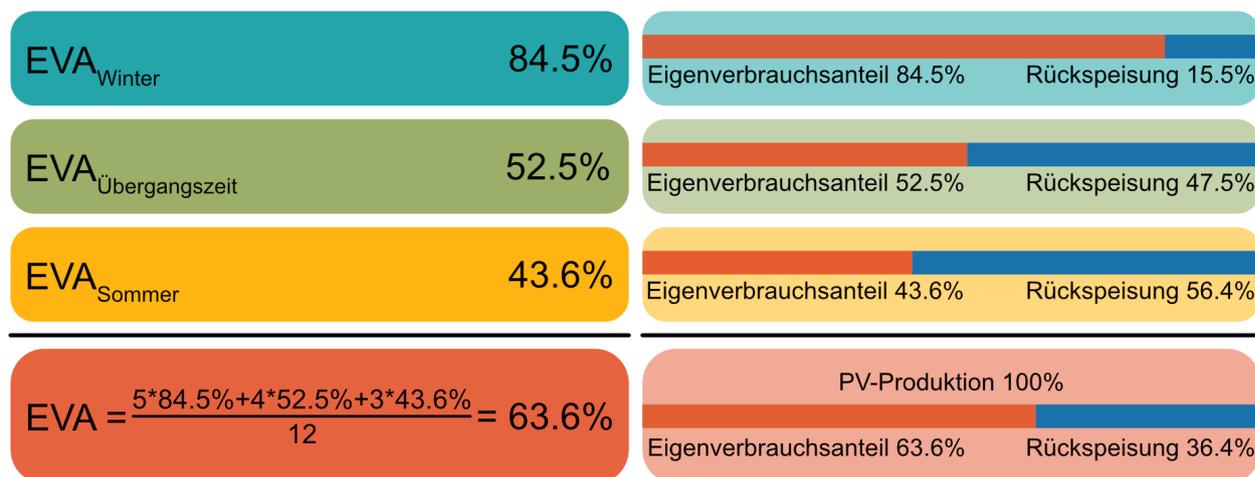


Abbildung 81: Bewertung EVA, Referenzablauf

Im linken Teil der Grafik sind die Eigenverbrauchsanteile aufgeführt. Rechts sind der Eigenverbrauchsanteil und der Anteil der Rückspeisung als Balken dargestellt. Beide Balken zusammen ergeben 100%, was der PV-Produktion entspricht. Quelle: Hochschule Luzern

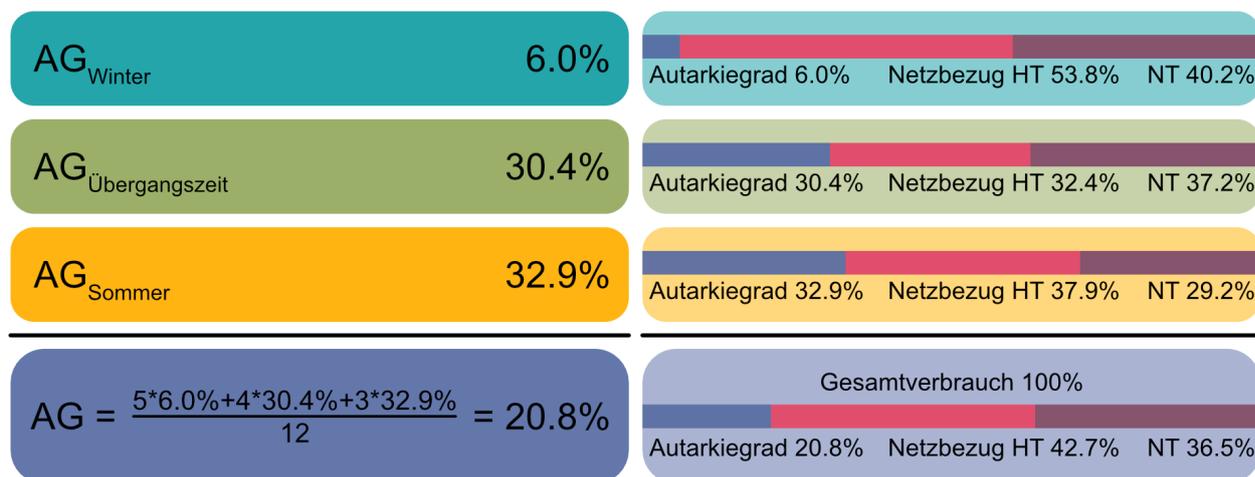


Abbildung 82: Bewertung AG, Referenzablauf

Im linken Teil der Grafik sind die Autarkiegrade aufgeführt. Rechts sind der Autarkiegrad und der Anteil des Netzbezuges im Hoch- und Niedertarif als Balken dargestellt. Alle drei Balken zusammen ergeben 100%, was dem Gesamtverbrauch entspricht. Quelle: Hochschule Luzern

Energiekosten Winter	80.55 CHF
Energiekosten Übergangszeit	54.60 CHF
Energiekosten Sommer	44.25 CHF
<hr/>	
$K_{\text{Energie,ges}} = \frac{5 \cdot 80.55 + 4 \cdot 54.60 + 3 \cdot 44.25}{12}$	$= 62.85 \text{ CHF}$

Abbildung 83: Bewertung Energiekosten Referenzablauf

In dieser Grafik sind die Energiekosten pro Teilprüfung aufgelistet. Darunter werden die Gesamtenergiekosten als gewichteter arithmetischer Mittelwert berechnet. Quelle: Hochschule Luzern

6. Schlusswort

6.1. Rückblick

In dieser Arbeit wurde ein Bewertungsverfahren entwickelt, das es ermöglicht, Energiemanagementsysteme zur Eigenverbrauchsoptimierung (EMS) zu testen und miteinander zu vergleichen. Das Verfahren ist so konzipiert, dass die EMS unter jeweils gleichen und reproduzierbaren Bedingungen geprüft werden können. Dazu wurde ein EFH mit einer PV-Anlage und den Verbrauchern Geschirrspüler, Waschmaschine, Tumbler, Wärmepumpe mit Warmwasser- und Energiespeicher, Elektroauto und allgemeinen Verbrauchern (z. B. Kochherd, Licht usw.) simuliert. Das EMS selbst wird als reales Gerät in den Prüfaufbau eingebaut. Die Simulation und das EMS kommunizieren über eine I/O Karte. Diese Karte besitzt digitale und analoge Ein- und Ausgänge und bildet die Schnittstelle zwischen Software und Hardware. Diese Methode wird als «Hardware in the Loop» bezeichnet. (Kapitel 3)

Der Prüfaufbau und die Modelle für die Simulation wurden bereits in der vorangegangenen Vertiefungsarbeit 2 [19] theoretisch ausgearbeitet (Kapitel 3.2). In dieser vorliegenden Arbeit wurde in einem ersten Schritt der Referenzablauf in der Simulationssoftware umgesetzt. Im Referenzablauf wird kein EMS verwendet und es bildet somit eine neutrale Bewertungsgrundlage. So konnten die Modelle ohne Fremdeinfluss durch das EMS überprüft werden (Kapitel 4). Mit dem Referenzablauf konnte das gesamte Bewertungsverfahren durchsimuliert werden und die Bewertung des Referenzverfahrens konnte ebenfalls vorgenommen werden (Kapitel 5). Es wurde ein Eigenverbrauchsanteil von 63.6 % und ein Autarkiegrad von 20.8% erzielt. Die Energiekosten belaufen sich auf 62.85 CHF pro Woche. Diese Werte sind bereits sehr gut, weil der Referenzablauf schon eigenverbrauchsoptimiert ist. Die Verbraucher werden alle tagsüber eingeschaltet und nicht in der Nacht.

Der Referenzablauf hat korrekt funktioniert und die Erwartungen wurden erfüllt. Die simulierten Modelle entsprechen den Vorgaben und auch die Resultate liegen im erwarteten Bereich. In der Simulation gibt es jedoch bestimmt noch Verbesserungs- und Optimierungspotential. Da keine Vorkenntnisse mit Simulink vorhanden waren, wurde die Simulation so umgesetzt, wie es für sinnvoll erachtet wurde. Es wurde aber vermutlich nicht immer die optimale und schnellste Lösung verwendet.

Auf der Grundlage des Referenzablaufs wurden die Schnittstellen zum EMS nacheinander eingebunden und getestet (Kapitel 5.1.2). Dafür wurde auch der Prüfaufbau zusammengebaut und verdrahtet.

Die Ein/Aus-Schnittstellen wurden mit den digitalen Eingängen auf der I/O Karte umgesetzt. Sie funktionierten auf Anhieb einwandfrei.

Als nächstes wurde die S0-Schnittstelle integriert. Diese funktionierte nicht, weil einerseits die ausgewählte I/O Karte USB-6001 von National Instruments nicht real-time fähig ist und andererseits, weil ihr Treiber in Simulink nicht korrekt funktioniert.

Die UDP-Schnittstelle wurde als Nächstes eingebunden. Bei der UDP-Schnittstelle lag das Problem bei der ausgewählten Simulationssoftware Simulink. Diese kann keine UDP-Pakete verarbeiten, deren Längen variabel sind. Das ist aber bei der Ladestation von Keba notwendig.

Diese Schnittstellen-Probleme konnten im Rahmen dieser Master-Thesis nicht mehr behoben werden. Deswegen konnte das Bewertungsverfahren auch nicht mit einem EMS durchgeführt werden.

Insgesamt konnten nicht alle Ziele dieser Master-Thesis erreicht werden. Nachfolgend sind die erreichten sowie die nicht erreichten Ziele aufgeführt.

Folgende Ziele wurden in dieser Arbeit erreicht:

- Entwicklung des Bewertungsverfahrens (Kapitel 3)
- Umsetzung des Referenzablaufs (Kapitel 4)
- Durchführung und Bewertung des Referenzablaufs (Kapitel 5)

Die nachfolgenden Ziele konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht erreicht werden:

- Umsetzung des Bewertungsverfahrens mit EMS
- Durchführung des Bewertungsverfahrens mit 1-2 EMS
- Bewertung der EMS
- Abschätzung, ob die Prüfung von EMS mit diesem Bewertungsverfahren funktioniert

Diese Ziele konnten zwar nicht erreicht werden, dafür wurden aber wertvolle Erkenntnisse gewonnen. Rückblickend gesehen, hätten zuerst die Schnittstellen genauer analysiert werden müssen. Anhand der daraus gewonnenen Erkenntnisse hätte dann die Soft- und Hardware ausgewählt werden können. Und erst dann hätte der Referenzablauf umgesetzt werden sollen.

6.2. Ausblick

Für die zuvor genannten Probleme mit den Schnittstellen S0 und UDP stehen verschiedene Lösungsansätze zur Verfügung.

S0-Schnittstelle:

- Verwendung von real-time Hardware, z. B. Speedgoat [50]
- Verwendung des Analogausgangs mit Speicher der I/O Karte, zusammen mit einer anderen Software als Simulink, z. B. mit LabVIEW
- S0 nicht umsetzen, dafür RS485. Da werden die Zählerwerte als Zahl gesendet und kleine zeitliche Schwankungen wirken sich nicht auf den Wert aus.

UDP-Schnittstelle:

- Verwendung einer anderen Software als Simulink, z. B. LabVIEW

Die Modelle in der Simulation funktionieren, sie könnten aber noch optimiert werden, so dass die Simulation schneller ist. Vor allem die Initialisierung dauert momentan zu lange (mehr als 10 Minuten).

Sobald diese technischen Probleme behoben sind, kann das Bewertungsverfahren mit dem ersten EMS getestet werden. Mit dem Testen von weiteren EMS wird dann auch ersichtlich, welche und wie grosse Anpassungen jeweils notwendig sind, damit das Bewertungsverfahren auch mit den anderen EMS funktioniert.

Nachdem das Bewertungsverfahren mit einigen EMS erfolgreich durchgeführt werden konnte, kann dann auch eine Aussage gemacht werden, ob das ganze Prinzip mit der Bewertung von EMS so funktioniert und ob sich der Aufwand lohnt.

Weiter kann dann geprüft werden, ob die in dieser Arbeit bestimmten Kriterien für die Bewertung sinnvoll sind oder ob sie angepasst werden müssen. Dazu zählen die Prüfdauer und die Gewichtung der Teilresultate.

Wenn all dies erfolgreich umgesetzt, geprüft und allenfalls angepasst wurde, liegt die erste Version eines funktionierenden Bewertungsverfahrens für EMS vor. Nun kann das Verfahren erweitert werden und andere Varianten (Anhang 1) können umgesetzt werden.

Ein oft angesprochenes Thema ist der Batteriespeicher. Dieser ist zwar noch nicht Standard im EFH, aber es wäre sehr interessant, wenn dieser ebenfalls in das Bewertungsverfahren eingebunden werden könnte. Mit ihm könnte der Eigenverbrauch noch mehr gesteigert werden.

Als Grundlage für den Batteriespeicher kann das Modell des Elektroautos herangezogen werden. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass die Energie nicht nur vom EFH in den Batteriespeicher fließt, sondern auch wieder zurück ins Haus. Auch der Batteriespeicher hat eine Kommunikationsschnittstelle, welche gut analysiert werden muss.

Ein weiteres spannendes Thema für das Bewertungsverfahren ist das bidirektionale Laden von Elektroautos. Dabei wird das Elektroauto wie ein Batteriespeicher genutzt. Idealerweise wird das Elektroauto tagsüber mit der Energie von der PV-Anlage geladen und in der Nacht kann die gespeicherte Energie wieder vom Elektroauto bezogen werden anstatt vom Stromnetz. Hier gilt es zu beachten, dass das Elektroauto nicht zu stark entladen wird, wenn es am nächsten Morgen zum Fahren benötigt wird.

Das Bewertungsverfahren dieser Arbeit ist auf EMS ausgelegt, die für EFH konzipiert sind. In einem weiteren Schritt könnte das Bewertungsverfahren auf andere Nutzungen, wie z. B. MFH oder Gewerbe, ausgeweitet werden. Bei einem MFH gibt es mehrere Parteien, die darin wohnen und entsprechend gibt es einzelne Verbraucher mehrmals, z. B. der Geschirrspüler oder die Waschmaschine. Die PV-Anlage und das Heizsystem (Wärmepumpe, Speicher) hingegen werden grösser. Für die verschiedenen Bewohner braucht es unterschiedliche Lastprofile, z. B. für ein Paar, das 100% arbeitet, oder für eine Rentnerin. Dadurch steigt der Eigenverbrauch im Vergleich zu einem EFH bereits. Es entstehen aber auch neue Themen wie z. B. die Abrechnung der Energiekosten.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablauf Masterarbeit.....	13
Abbildung 2: Beispiel EMS.....	14
Abbildung 3: Komponenten eines EMS	15
Abbildung 4: Schematische Darstellung des EFH	19
Abbildung 5: Blockschema Prüfaufbau	21
Abbildung 6: Aufbau EFH	23
Abbildung 7: Dachansicht mit PV-Anlage.....	25
Abbildung 8: Gesamtsystem PV-Anlage	26
Abbildung 9: Tagesablauf PV-Anlage.....	27
Abbildung 10: Lastprofil Allgemeine Verbraucher am Montag mit einzelnen Verbrauchern	28
Abbildung 11: Heizsystem	29
Abbildung 12: Heizsystem im Warmwasserbetrieb.....	30
Abbildung 13: Heizsystem im Heizbetrieb	32
Abbildung 14: Lastprofil Geschirrspüler	35
Abbildung 15: Lastprofil Waschmaschine	36
Abbildung 16: Lastprofil Tumbler	37
Abbildung 17: Ladevorgang ohne EMS	39
Abbildung 18: Ladevorgang mit EMS.....	40
Abbildung 19: Prüfmethode «Hardware in the Loop».....	41
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Prüfdauer.....	42
Abbildung 21: Zusammensetzung Bewertung.....	43
Abbildung 22: Zuordnung der Jahreszeiten.....	44
Abbildung 23: Bewertung Eigenverbrauchsanteil	46

Abbildung 24: Bewertung Autarkiegrad.....	47
Abbildung 25: Berechnung Energiekosten	48
Abbildung 26: Bewertung Energiekosten	48
Abbildung 27: Zusammensetzung Bewertung Preis	49
Abbildung 28: Blockschema Prüfaufbau mit Produkten.....	50
Abbildung 29: S0-Impuls	51
Abbildung 30: USB-6001	52
Abbildung 31: Schaltrelais.....	53
Abbildung 32: Eltako ER12DX-UC.....	53
Abbildung 33: Halbleiterrelais	54
Abbildung 34: Crydom CN024D05.....	54
Abbildung 35: Beispielsystem Simulink.....	57
Abbildung 36: Simulink Beispiel mit Subsystem	58
Abbildung 37: Gesamtüberblick Simulation.....	59
Abbildung 38: Ausschnitt Simulink Modell allgemeine Verbraucher	61
Abbildung 39: Ausschnitt Simulink Modell PV-Anlage	62
Abbildung 40: MATLAB Code zur MATLAB Function	63
Abbildung 41: Simulink Modell Geschirrspüler	63
Abbildung 42: Stateflow Chart Geschirrspüler	64
Abbildung 43: Digital Input I/O Karte	65
Abbildung 44: Berechnung S0-Impuls	66
Abbildung 45: Generierung S0-Impuls	66
Abbildung 46: Realer Prüfaufbau.....	69
Abbildung 47: SMARTFOX PRO und SMARTFOX Meter.....	70
Abbildung 48: EKZ einfachSolar Steuerung und Extension DIGITAL.....	71

Abbildung 49: Leistung und Einstrahlung PV-Anlage, Sonntag, Winter	76
Abbildung 50: Leistung und Einstrahlung PV-Anlage, Sonntag, Übergangszeit.....	77
Abbildung 51: Leistung PV-Anlage, 1 Woche, Winter	77
Abbildung 52: Leistung PV-Anlage, 1 Woche, Übergangszeit	78
Abbildung 53: Leistung PV-Anlage, 1 Woche, Sommer	78
Abbildung 54: Leistung allgemeine Verbraucher, Sonntag	79
Abbildung 55: Leistung allgemeine Verbraucher, 1 Woche	79
Abbildung 56: Wärmeenergie Warmwasserspeicher und el. Leistung Wärmepumpe	80
Abbildung 57: Wärmeenergie Energiespeicher und el. Leistung Wärmepumpe.....	81
Abbildung 58: Leistung Wärmepumpe, 1 Woche, Winter	82
Abbildung 59: Leistung Wärmepumpe, 1 Woche, Übergangszeit.....	82
Abbildung 60: Leistung Wärmepumpe, 1 Woche, Sommer.....	83
Abbildung 61: Leistung Geschirrspüler, 1 Durchgang Standardprogramm.....	84
Abbildung 62: Leistung Geschirrspüler, 1 Woche	84
Abbildung 63: Leistung Waschmaschine, 1 Durchgang Standardprogramm.....	85
Abbildung 64: Leistung Waschmaschine, 1 Woche,	85
Abbildung 65: Leistung Tumbler, 1 Durchgang Standardprogramm	86
Abbildung 66: Leistung Tumbler, 1 Woche,.....	86
Abbildung 67: Ladeleistung und Kapazität Elektroauto, 1 Ladevorgang.....	87
Abbildung 68: Ladeleistung und Kapazität Elektroauto, 1 Woche	88
Abbildung 69: Leistung Ladestation Elektroauto, 1 Woche,.....	88
Abbildung 70: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, Sonntag, Winter	90
Abbildung 71: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, 1 Woche, Winter	90

Abbildung 72: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, Sonntag, Übergangszeit.....	92
Abbildung 73: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, 1 Woche, Übergangszeit.....	92
Abbildung 74: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, Sonntag, Sommer.....	94
Abbildung 75: Leistung PV, Gesamtverbrauch, Netzbezug und Rückspeisung, 1 Woche, Sommer.....	94
Abbildung 76: Bewertung EVA, Referenzablauf	95
Abbildung 77: Bewertung AG, Referenzablauf.....	95
Abbildung 78: Bewertung Energiekosten Referenzablauf	96
Abbildung 79: Variantenübersicht	112
Abbildung 80: Meteodaten Aussentemperatur Winter	131
Abbildung 81: Meteodaten Einstrahlung Winter	131
Abbildung 82: Meteodaten Aussentemperatur Übergangszeit	132
Abbildung 83: Meteodaten Einstrahlung Übergangszeit.....	132
Abbildung 84: Meteodaten Aussentemperatur Sommer	133
Abbildung 85: Meteodaten Einstrahlung Sommer.....	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnung Jahreszeiten. Quelle: [31]	44
Tabelle 2: Energiekosten. Quelle: [32] [33]	47
Tabelle 3: Zuordnung der Modelle zur Methode	56
Tabelle 4: Resultate Referenzablauf Winter	89
Tabelle 5: Energiekosten Referenzablauf Winter	89
Tabelle 6: Resultate Referenzablauf Übergangszeit	91
Tabelle 7: Energiekosten Referenzablauf Übergangszeit	91
Tabelle 8: Resultate Referenzablauf Sommer	93
Tabelle 9: Energiekosten Referenzablauf Sommer	93
Tabelle 10: Modellparameter EFH	113
Tabelle 11: Modellparameter Bewohner	114
Tabelle 12: Abwesenheiten Mutter	114
Tabelle 13: Modellparameter PV-Anlage	116
Tabelle 14: Modellparameter allgemeine Verbraucher	118
Tabelle 15: Allgemeine Verbraucher mit Angabe der Leistung und der Laufzeit	118
Tabelle 16: Modellparameter Wärmepumpe mit Warmwasser- und Energiespeicher	119
Tabelle 17: Modellparameter Geschirrspüler	122
Tabelle 18: Phasen des Lastprofils des Geschirrspülers	122
Tabelle 19: Nutzungszeiten Geschirrspüler	122
Tabelle 20: EMS-Zeitfenster Geschirrspüler	122
Tabelle 21: Modellparameter Waschmaschine	124
Tabelle 22: Phasen des Lastprofils der Waschmaschine	124
Tabelle 23: Nutzungszeiten Waschmaschine	124
Tabelle 24: EMS-Zeitfenster Waschmaschine	125

Tabelle 25: Modellparameter Tumbler	126
Tabelle 26: Phasen des Lastprofils des Tumblers	126
Tabelle 27: Nutzungszeiten Tumbler	126
Tabelle 28: EMS-Zeitfenster Tumbler	127
Tabelle 29: Modellparameter Ladestation Elektroauto.....	130

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Dr. R. Paschotta, *Energieautarkie*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.energie-lexikon.info/energieautarkie.html>. Zugriff am: 20.01.2020
- [2] EnergieSchweiz, «Solarstrom-Eigenverbrauch optimieren - Handbuch», 2017
- [3] DUDEN, *Benchmark, die oder der*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Benchmark>. Zugriff am: 20.01.2020
- [4] Wikipedia, *Benchmark*. [Online] Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Benchmark>. Zugriff am: 20.01.2020
- [5] *Energiegesetz: EnG*, 01.01.2018
- [6] Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI, *Weisung: Energieerzeugungsanlagen (EEA) im Parallel- oder im Inselbetrieb mit dem Niederspannungsverteilsnetz*, Nr. 219, 01.10.2017
- [7] Prof. Dr. O. Blendel, *Energiemanagement*. [Online] Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/energiemanagement-53997>. Zugriff am: 20.01.2020
- [8] TENAG GmbH, *Das Energiemanagement Glossar*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.tenag.de/glossar/>. Zugriff am: 20.01.2020
- [9] Prof. Dr. O. Blendel, *Energiemanagementsystem*. [Online] Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/energiemanagementsystem-53996>. Zugriff am: 20.01.2020
- [10] C. Gubler, «Bewertungsverfahren für den Vergleich von Energiemanagementsystemen. Systemverständnis als Grundlage», Vertiefungsarbeit 1, Unpubliziertes Dokument, Horw, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 24.01.2020
- [11] *Energetische Betriebsoptimierung*, SIA 2048:2015, 01.07.2015
- [12] Bundesverband Wärmepumpe (BWP), *SG Ready-Label*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.waermepumpe.de/normen-technik/sg-ready/>. Zugriff am: 20.01.2020
- [13] VESE, *Eigenverbrauch*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.vese.ch/eigenverbrauch>. Zugriff am: 20.01.2021
- [14] VESE, *pvtarif.ch*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.vese.ch/pvtarif/#ChartTitle>. Zugriff am: 20.01.2021
- [15] Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom, *Die kantonalen Strompreise im Vergleich*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.strompreis.elcom.admin.ch/Map/ShowSwissMap.aspx>. Zugriff am: 20.01.2021

- [16] BKW, «Preisinformation für Privat- und Gewerbekunden», 2021. [Online] Verfügbar unter: https://www.bkw.ch/fileadmin/user_upload/1_Private/1_1_Stromprodukte/PK_Produnktblaetter/000941_TB_Stromprodukte_Privat-Gewerbekunden_D-2021.pdf. Zugriff am: 20.01.2021
- [17] Energie Zukunft Schweiz, «Energiemanagementsysteme Digitales Werkzeug der Energieversorgung. Eine Marktübersicht», 06.2020
- [18] B. Zhou et al., «Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 61, S. 30–40, 08.2016
- [19] C. Gubler, «Bewertungsverfahren für den Vergleich von Energiemanagementsystemen. Erarbeitung des Bewertungsverfahrens», Vertiefungsarbeit 2, Unpubliziertes Dokument, Horw, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 19.06.2020
- [20] *Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*, SIA 2024:2015, 01.10.2015
- [21] Megasol Energie AG, «Technische Datenblatt P275-60-w U40», 2018. [Online] Verfügbar unter: https://megasol.ch/wp-content/uploads/2018/07/0322.0859-P275-60-w-U40_DE.pdf. Zugriff am: 12.06.2020
- [22] *Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Warmwasserbedarf, Gesamtanforderungen und Auslegung*, SIA 385/2:2015, 01.01.2015
- [23] *Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3*, SIA 384.201, 01.12.2018
- [24] V-ZUG AG, «Bedienungsanleitung Adora SL: Waschmaschine», 2017
- [25] KEBA, «Technische Daten KeContact P30, V1.02». [Online] Verfügbar unter: https://www.keba.com/download/x/c39561e911/kecontactp30technicaldata_dbde.pdf. Zugriff am 18.06.2020
- [26] HZ, «Erstmals Elektroauto unter den meistverkauften Modellen in der Schweiz», *Handelszeitung* vom 15.01.2020. [Online] Verfügbar unter: <https://www.handelszeitung.ch/tech/erstmals-elektroauto-unter-den-meistverkauften-modellen-der-schweiz>. Zugriff am: 14.06.2020
- [27] ADAC, «Autotest: Tesla Model 3 Standard Range Plus», 2019. [Online] Verfügbar unter: https://assets.adac.de/image/upload/v1574250025/ADAC-eV/KOR/Text/PDF/Tesla_Model_3_Standard_Range_Plus_dstyfv.pdf. Zugriff am: 09.06.2020
- [28] A. Karle, *Elektromobilität. Grundlagen und Praxis*, 4. Auflage, München, Carl Hanser Verlag, 2020

- [29] D. Fasthuber und M. Litzlbauer, «Erkenntnisse der Messung von Ladevorgängen der Elektrofahrzeuge in der Modellregion „e-pendler in niederösterreich», 2016. [Online] Verfügbar unter: https://publik.tuwien.ac.at/files/Pub-Dat_248415.pdf. Zugriff am 14.06.2020
- [30] *Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, SN EN 61851-1:2019, 09.09.2019
- [31] *Meteonorm 8* [Software]. 2020. Meteotest AG
- [32] Industrielle Betriebe Kloten AG, «Tarifordnung Elektrizitätswerk». [Online] Verfügbar unter: https://www.ibkloten.ch/fileadmin/Dateien/Produkte/Strom/TaO20_EW_v1.6.pdf. Zugriff am: 20.01.2021
- [33] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS), *DGS PV-Stromkostenrechner*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.dgs-franken.de/service/stromkostenrechner/>. Zugriff am: 20.01.2021
- [34] *Einrichtungen zur Messung der elektrischen Energie (AC). Besondere Anforderungen. Teil 31: Impulseinrichtungen für Induktionszähler und elektronische Zähler (nur Zweidrahtsysteme)*, SN EN 62053-31:1998, 01.04.1998
- [35] Elektronik Kompendium, *UDP- User Datagram Protocol*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/0812281.htm>. Zugriff am: 20.01.2021
- [36] National Instruments, *USB-6001*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.ni.com/de-ch/support/model.usb-6001.html>. Zugriff am: 20.01.2021
- [37] DAfi GmbH, *SMARTFOX PRO*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.smartfox.at/smartfox-pro.html>. Zugriff am: 15.06.2020
- [38] SOLARWATT GmbH, *Extension DIGITAL*. [Online] Verfügbar unter: <https://hilfe.energymanager.com/dokumentation/connections/extension1-2.html>. Zugriff am: 15.06.2020
- [39] Eltako GmbH, «Datenblatt ER12DX-UC» [Online] Verfügbar unter: https://www.eltako.com/fileadmin/downloads/de/datenblatt/Datenblatt_ER12DX-UC.pdf. Zugriff am: 20.01.2021
- [40] Wikipedia, *Relais*. [Online] Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Relais#Halbleiterrelais>. Zugriff am: 20.01.2021
- [41] Meteotest AG, *Meteonorm Software*. [Online] Verfügbar unter: <https://meteonorm.com/produkt/meteonorm-software>. Zugriff am: 20.01.2021
- [42] A. Angermann et al., *MATLAB® - Simulink® - Stateflow®*, 9. Auflage, Berlin, Walter de Gruyter GmbH, 2017
- [43] National Instruments, *Was ist LabVIEW?*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.ni.com/de-ch/shop/labview.html>. Zugriff am: 20.01.2021

- [44] KEBA, «UDP Programmers Guide V 2.01», 2018. [Online] Verfügbar unter: https://www.keba.com/download/x/fff263235e/kecontactp30udp_pgen.pdf. Zugriff am: 14.06.2020
- [45] P. Alem DAfi GmbH, «Technische Fragen zu Smartfox Pro», E-Mail, 05.11.2020
- [46] Fankhauser-Solar AG, *Smartfox PRO Energiemanager*. [Online] Verfügbar unter: https://www.fankhauser-solar.ch/content/uploads/imported/f89912d69bcb0f8eab31cb4b6b2253c2f5a854a-CO_Smartfox_Pro_1024x1024.jpg. Zugriff am: 20.01.2021
- [47] Smartfox, *SMARTFOX Meter*. [Online] Verfügbar unter: https://www.smartfox.at/images/smartfox%20meter_2x.jpg?crc=282023259. Zugriff am: 20.01.2021
- [48] EKZ, *Solaranlage steuern*. [Online] Verfügbar unter: https://www.ekz.ch/content/ekz-internet/de/private/strom-produzieren/eigenverbrauch/_jcr_content/content/pagesection_2/section_content/cols_1_1/layout-6-2/textimage_0.ekzImg.width_textimage_half_large_narrow.jpg/1559377087169.ekzImg.width_textimage_half_large_narrow.jpg/einfachSolar-Steuerung_600x315.jpg. Zugriff am: 20.01.2021
- [49] solarx. [Online] Verfügbar unter: <https://solarx.ro/wp-content/uploads/2020/07/500001737.png>. Zugriff am: 20.01.2021
- [50] Speedgoat, *Hardware-in-the-Loop Simulation*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.speedgoat.com/applications-industries/applications/hardware-in-the-loop>. Zugriff am: 20.01.2021
- [51] Wireshark. [Online] Verfügbar unter: <https://www.wireshark.org>. Zugriff am: 20.01.2021
- [52] C. Bucher, «SW 4, Selbststudium: Lernaufgabe Zeitschrittsimulation PV-Anlage», Unpubliziertes Dokument, Horw, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 09.10.2019
- [53] K. Mertens, *Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, 4. Auflage, München, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2018, S. 174/178
- [54] Fronius Schweiz AG, *Fronius Symo 3.0-3-M*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.fronius.com/de-ch/switzerland/solarenergie/produkte/alle-produkte/wechselrichter/fronius-symo/fronius-symo-3-0-3-m>. Zugriff am: 20.01.2021
- [55] STIEBEL ELTRON AG, «Bedienung und Installation Sole | Wasser-Wärmepumpe», [Online] Verfügbar unter: https://www.stiebel-eltron.de/content/dam/ste/cdbassets/current/bedienungs-_u_installationsanleitungen/WPF_04-16__cool__c27d8177-2549-4e38-9a1d-9e6f80b4db5e.pdf. Zugriff am: 12.06.2020

- [56] *Heizwärmebedarf*, SIA 380/1:2016, 01.12.2016
- [57] V-ZUG AG, «Bedienungsanleitung Adora SL designintegriert, vollintegriert: Geschirrspüler», 2017
- [58] V-ZUG AG, «Bedienungsanleitung Adora TS WP: Wäschetrockner», 2018
- [59] Antronic CO, *USB-6001*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.antronic.co.th/media/img/product/large/11-05-45-2.png>. Zugriff am: 20.01.2021
- [60] Eltako GmbH, *ER12DX-UC*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.eltako.de/wp-content/uploads/2020/09/ER12DX-UC.jpg>. Zugriff am: 20.01.2021
- [61] Rapid Electronics Limited, *Crydom DRA-CN024D05 Solid State Relay Module 3.5A 3-12VDC*. [Online] Verfügbar unter: <https://static.rapidonline.com/catalogueimages/product/51/01/s51-0125p01wl.jpg>. Zugriff am: 20.01.2021

Anhang

Anhang I: Variantenübersicht

In der folgenden Abbildung sind die Varianten zu den einzelnen Komponenten aufgeführt. Die rote Variante ist diejenige, die als Referenz beschrieben wurde und umgesetzt wird.

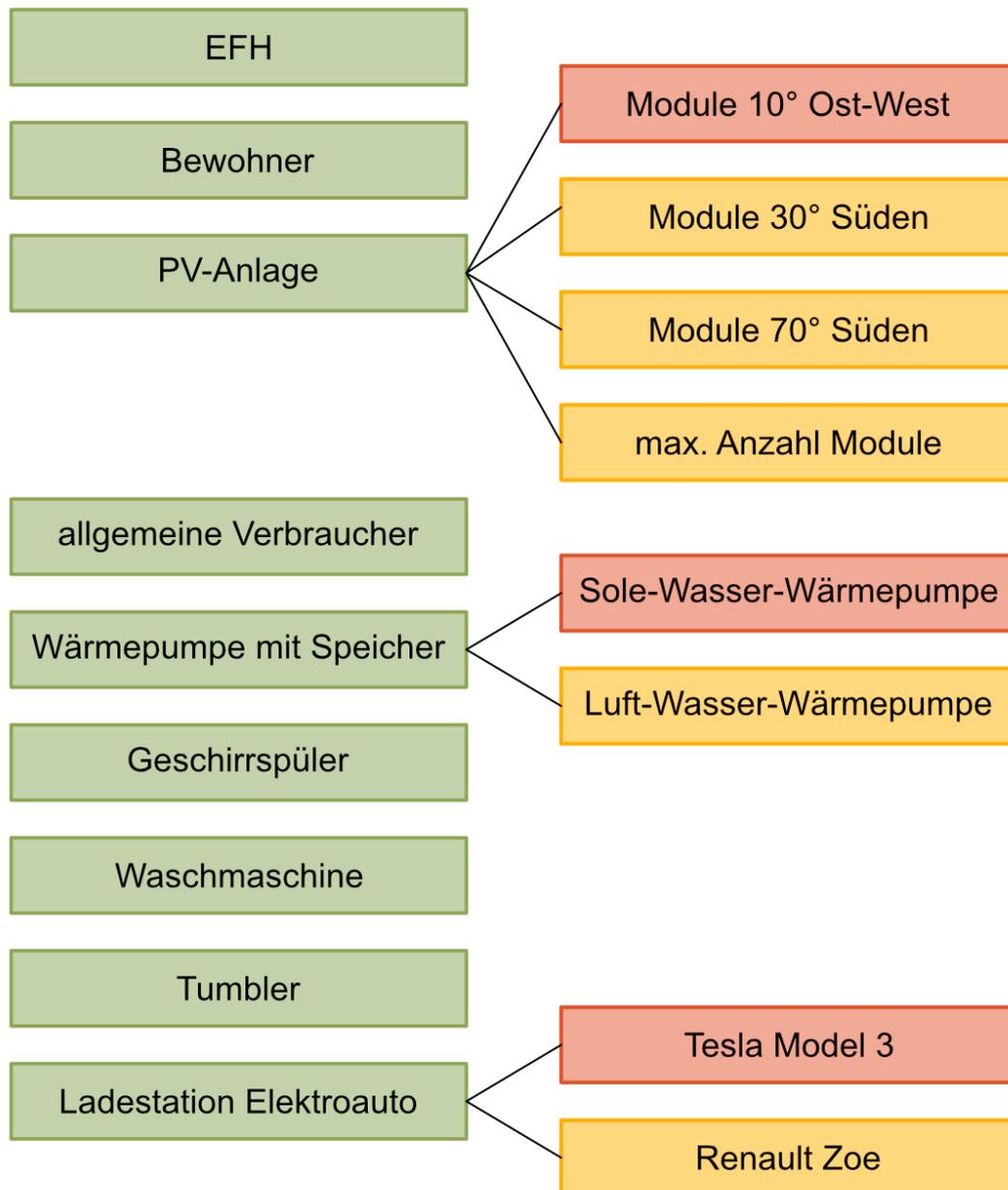


Abbildung 84: Variantenübersicht
Quelle: Hochschule Luzern

Anhang 2: Modelle des Bewertungsverfahrens

EFH

Modellparameter

Tabelle 10: Modellparameter EFH

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Gebäudelänge	L	13 m	Annahme
Gebäudebreite	B	8 m	Annahme
Geschosshöhe	H _G	3 m	Annahme
Gebäudehöhe	H	6 m	Berechnung
Anzahl Geschosse	n _G	3 (UG, EG, OG)	Annahme
beheizte Geschosse	n _{G,b}	2 (EG, OG)	Annahme
unbeheizte Geschosse	n _{G,ub}	1 (UG)	Annahme
Dachform	-	Flachdach	Annahme
thermische Gebäudehüllfläche	A _H	460 m ²	Berechnung
Wandanteil	f _W	70%	Berechnung
Fensteranteil	f _F	30%	[20]
Wandfläche	A _W	384.4 m ²	Berechnung
Fensterfläche	A _F	75.6 m ²	Berechnung
U-Wert Wand	U _W	0.2 W/(m ² *K)	[20]
U-Wert Fenster	U _F	1.2 W/(m ² *K)	[20]
Aussenwanddicke	d _{AW}	0.4 m	Annahme
Energiebezugsfläche	EBF	176 m ²	Berechnung
Raumvolumen	V _R	457 m ³	Berechnung
Standort	-	8302 Zürich Kloten	Annahme

Getroffene Annahmen

Nachfolgend sind die getroffenen Annahmen für das Modell des EFH zusammengefasst.

- Die Abmessungen des EFH beruhen auf den Werten von einigen realen EFH.
- Die Aussenwände, das Dach und der Boden haben den gleichen U-Wert.

Bewohner

Modellparameter

Tabelle 11: Modellparameter Bewohner

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Arbeitsweg mit Elektroauto	s_{Arbeit}	40 km	Annahme

Tabelle 12: Abwesenheiten Mutter

Wochentag	Uhrzeit Abwesenheit	Grund Abwesenheit	Verkehrsmittel
Montag	07:45 – 11:30 Uhr	Arbeiten inkl. Arbeitsweg	Elektroauto
Dienstag	07:45 – 11:30 Uhr	Arbeiten inkl. Arbeitsweg	Elektroauto
Dienstag	13:00 – 18:00 Uhr	Arbeiten inkl. Arbeitsweg	Elektroauto
Mittwoch	07:45 – 11:30 Uhr	Arbeiten inkl. Arbeitsweg	Elektroauto
Mittwoch	14:00 – 15:00 Uhr	Einkaufen	zu Fuss
Donnerstag	07:45 – 11:30 Uhr	Arbeiten inkl. Arbeitsweg	Elektroauto
Donnerstag	13:00 – 18:00 Uhr	Arbeiten inkl. Arbeitsweg	Elektroauto
Freitag	-	-	-
Samstag	09:00 – 17:00 Uhr	Einkaufen	Elektroauto
Sonntag	-	-	-

PV-Anlage

Formeln

Modulwirkungsgrad [52]

$$\eta_{Modul}(t) = \eta_{Temp.}(t) * \eta_{Schwachlicht}(t) \quad (A.1)$$

Modultemperatur [53]

$$T_{Modul}(t) = T_a(t) + (NOCT - T_{U,NOCT}) * \frac{G_{Modul}(t)}{G_{NOCT}} \quad (A.2)$$

Temperaturwirkungsgrad des Modules [53]

$$\eta_{Temp.}(t) = 1 + TK(P_{mpp}) * (T_{Modul}(t) - T_{STC}) \quad (A.3)$$

Schwachlichtwirkungsgrad des Modules [52]

$$\eta_{Schwachlicht}(t) = -8 * 10^{-5} * G_{Modul}(t)^2 + 0.12 * G_{Modul}(t) + 60 \quad (A.4)$$

DC-Ausgangsleistung

$$P_{DC}(t) = n_{Modul} * \frac{P_{STC}}{1000 \frac{W}{m^2}} * G_{Modul}(t) * \eta_{Modul}(t) * \eta_{DC} \quad (A.5)$$

Wechselrichterwirkungsgrad

Der Wirkungsgrad des Wechselrichters η_{WR} ist von der DC-Ausgangsleistung P_{DC} abhängig und kann aus dem Datenblatt des Wechselrichters herausgelesen werden. Dort sind die Wirkungsgrade an acht Betriebspunkten angegeben. Die Werte dazwischen werden interpoliert [54].

Wechselrichterausgangsleistung

$$P_{WR}(t) = P_{DC}(t) * \eta_{WR}(t) \quad (A.6)$$

Minimal- und Maximalleistung des WR

Der Wechselrichter schaltet erst bei der Minimalleistung $P_{WR,min}$ ein und bei der Maximalleistung $P_{WR,max}$ wird die Leistung begrenzt [52]. Daher gilt:

$$\begin{aligned} \text{wenn } P_{WR}(t) < P_{WR,min}, \text{ dann } P_{WR}(t) &= 0 \text{ und} \\ \text{wenn } P_{WR}(t) \geq P_{WR,max}, \text{ dann } P_{WR}(t) &= P_{WR,max} \end{aligned} \quad (A.7)$$

AC-Kabelverluste [52]

$$P_{Verl.,AC}(t) = \frac{P_{WR}(t)^2}{(n_{Modul} * P_{STC})^2} * k_{Verl.,AC} * n_{Modul} * P_{STC} \quad (A.8)$$

AC-Ausgangsleistung der PV-Anlage

$$P_{PV}(t) = P_{WR}(t) - P_{Verl.,AC}(t) \quad (A.9)$$

Alle Schritte bis hierhin werden für die Ost- und Westseite separat ausgeführt.

Gesamtleistung der PV-Anlage

$$P_{PV}(t) = P_{PV,O}(t) + P_{PV,W}(t) \quad (A.10)$$

Modellparameter

Tabelle 13: Modellparameter PV-Anlage

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
PV-Anlage			
Anzahl Module	n_{Modul}	24 Module	[19]
Ausrichtung	-	Ost-West	Annahme
Aufstellwinkel	α	10°	Annahme
Nennleistung PV-Anlage	$P_{PV,Nenn}$	6.6 kWp	[19]
effektive Leistung PV-Anlage	P_{PV}	[W], zeitabhängig	Formel A.10
DC-Wirkungsgrad	η_{DC}	96%	Annahme [52]
DC-Ausgangsleistung gesamt	P_{DC}	[W], zeitabhängig	Formel A.5
AC-Kabelverluste bei $P_{PV,Nenn}$	$k_{Verl.,AC}$	3%	Annahme
AC-Kabelverluste	$P_{Verl.,AC}$	[W], zeitabhängig	Formel A.8

Modul			
Hersteller	-	Megasol Energie AG	[21]
Modultyp	-	P275-60-w U40	[21]
Zelltyp	-	Polykristallin	[21]
Nennleistung STC	P_{STC}	275 W _p	[21]
Zelltemperatur STC	T_{STC}	25 °C	[21]
Modulwirkungsgrad	η_{Modul}	[-], zeitabhängig	Formel A.1
Temperaturwirkungsgrad	η_{Temp}	[-], zeitabhängig	Formel A.3
Schwachlichtwirkungsgrad	$\eta_{Schwachlicht}$	[-], zeitabhängig	Formel A.4
Nennbetriebstemperatur	NOCT	45 °C	[21]
Einstrahlung NOCT	G_{NOCT}	800 W/m ²	[53]
Umgebungstemperatur NOCT	$T_{U,NOCT}$	20 °C	[53]
Temperaturkoeffizient	$TK(P_{mpp})$	-0.37 %/K	[21]
Modultemperatur	T_{Modul}	[°C], zeitabhängig	Formel A.2
Wechselrichter			
Hersteller	-	Fronius Schweiz AG	[54]
Typ	-	SYMO 3.0-3-M	[54]
Minimalleistung	$P_{WR,min}$	0.3% von $P_{WR,max}$ = 9 W	Annahme
Maximalleistung	$P_{WR,max}$	3 kW	[54]
Wirkungsgrad	η_{WR}	[-], zeitabhängig	[54]
Ausgangsleistung	P_{WR}	[W], zeitabhängig	Formel A.6
Umwelt			
Ausstemperatur	T_a	[°C], zeitabhängig	Meteonorm
Einstrahlung auf das Modul	G_{Modul}	[W/m ²], zeitabhängig	Meteonorm

Getroffene Annahmen

Nachfolgend sind die getroffenen Annahmen für das Modell der PV-Anlage zusammengefasst.

- Für die Systemverluste auf der DC-Seite wird ein konstanter Wert angenommen. Die Jahreszeitlichen Schwankungen werden vernachlässigt.
- Für die AC-Kabelverluste wird ein konstanter Wert bei der Peakleistung angenommen.
- Die AC-Kabelverluste verhalten sich proportional zum Quadrat der Leistung.

Allgemeine Verbraucher

Modellparameter

Tabelle 14: Modellparameter allgemeine Verbraucher

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Leistung allgemeine Verbraucher	P_{aV}	[W], zeitabhängig	Annahme

Tabelle 15: Allgemeine Verbraucher mit Angabe der Leistung und der Laufzeit

Verbraucher	Laufzeit	Leistung
Kochherd, Kochen mit 3 Kochzonen	Di – Mi 11:30 – 12:00 Uhr Fr 11:30 – 12:00 Uhr So 11:30 – 12:00 Uhr	6'200 W
Kochherd, Kochen mit 1 Kochzone	Mo 11:30 – 12:00 Uhr Do 11:30 – 12:00 Uhr Mo – So 18:30 – 18:45 Uhr	1'800 W
Backofen	Mi 15:00 – 16:00 Uhr Sa 17:00 – 18:00 Uhr	3'400 W
Steamer	Mo 11:30 – 12:00 Uhr Do 11:30 – 12:00 Uhr So 11:30 – 12:00 Uhr	3'800 W
Verbraucher Morgen	Mo – Fr 06:00 – 08:00 Uhr Sa 07:00 – 09:00 Uhr So 08:00 – 10:00 Uhr	560 W
Verbraucher Tag	Mo – Fr 08:00 – 18:00 Uhr Sa 09:00 – 18:00 Uhr So 10:00 – 18:00 Uhr	240 W
Verbraucher Abend	Mo – Fr 18:00 – 22:00 Uhr Sa 18:00 – 23:00 Uhr So 18:00 – 22:00 Uhr	200 W
Verbraucher Nacht	Mo – Fr 22:00 – 06:00 Uhr Fr/Sa 22:00 – 07:00 Uhr Sa/So 23:00 – 08:00 Uhr So/Mo 22:00 – 06:00 Uhr	35 W
Verbraucher 24h	Mo – So dauernd	400 W

Getroffene Annahmen

Nachfolgend sind die getroffenen Annahmen für das Modell der PV-Anlage zusammengefasst.

- Der Verbrauch pro Verbrauchergruppe wird als konstant angenommen.
- Im Modell werden keine jahreszeitlichen Schwankungen berücksichtigt.

Wärmepumpe mit Warmwasser- und Energiespeicher

Formeln

Nutzenergie Warmwasserspeicher

$$Q_{WWS,N} = V_{WWS,N} * \rho_W * c_W * (T_{WWS,aus} - T_{WWS,ein}) \quad (A.11)$$

Nutzenergie Energiespeicher

$$Q_{ES,N} = V_{ES,N} * \rho_W * c_W * (T_{ES,aus} - T_{ES,ein}) \quad (A.12)$$

Modellparameter

Tabelle 16: Modellparameter Wärmepumpe mit Warmwasser- und Energiespeicher

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Eintrittstemperatur Wärmequelle WP	T_{WQ1}	0 °C	[55]
Warmwasserbetrieb			
Nutzenergie WWS	$Q_{WWS,N}$	[kWh]	Formel A.11
Nutzvolumen WWS	$V_{WWS,N}$	500 l	Annahme
Dichte von Wasser	ρ_W	1 kg/l	[20]
spezifische Wärmekapazität von Wasser	c_W	0.00116 kWh/(kg*K)	[20]
Einschalttemperatur WWS	$T_{WWS,ein}$	50 °C	Annahme
Ausschalttemperatur WWS	$T_{WWS,aus}$	60 °C	Annahme
Entladeleistung WW	Φ_{WW}	[kW], zeitabhängig	Formel 3.4
Volumenstrom WW	\dot{V}_{WW}	[l/h], zeitabhängig	[22]
Warmwassertemperatur	T_{WW}	60 °C	[20]
Kaltwassertemperatur	T_{KW}	10 °C	[20]
Entladezeit WWS	$\Delta t_{WWS,Entlade}$	[h], zeitabhängig	Formel 3.5
Vorlauftemperatur WWS	$T_{VL,WWS}$	65 °C	[55]
Wärmeleistung WP bei B0/W65	$\Phi_{WWS,65}$	6.6 kW	[55]
Ladezeit WWS	$\Delta t_{WWS,Lade}$	[h], zeitabhängig	Formel 3.6
elektrische Leistung WP bei B0/W65	$P_{WP,65}$	3 kW	[55]

Heizbetrieb			
Nutzenergie ES	$Q_{ES,N}$	[kWh]	Formel A.12
Nutzvolumen ES	$V_{ES,N}$	1000 l	Annahme
Einschalttemperatur ES	$T_{ES, \text{ein}}$	20 °C	Annahme
Ausschalttemperatur ES	$T_{ES, \text{aus}}$	30 °C	Annahme
Raumheizlast	Φ_R	[W], zeitabhängig	Formel 3.8
Heizleistung BH	Φ_{BH}	[W], zeitabhängig	Formel 3.7
Transmissionsverluste	Φ_T	[W], zeitabhängig	Formel 3.9
Luftwärmeverluste	Φ_L	[W], zeitabhängig	Formel 3.10
Raumtemperatur	T_R	20 °C	[56]
Aussentemperatur	T_a	[°C, K], zeitabhängig	Meteonorm
Wandfläche	A_W	384.4 m ²	Berechnung
U-Wert Wand	U_W	0.2 W/(m ² *K)	[20]
Fensterfläche	A_F	75.6 m ²	Berechnung
U-Wert Fenster	U_F	1.2 W/(m ² *K)	[20]
Raumvolumen	V_R	457 m ³	Berechnung
Luftwechselrate	n_R	0.3 1/h	[23]
Dichte von Luft	ρ_L	$\rho_L * c_L = 0.34$ Wh/(m ³ *K)	[23]
spezifische Wärmekapazität von Luft	c_L	$\rho_L * c_L = 0.34$ Wh/(m ³ *K)	[23]
Entladezeit ES	$\Delta t_{ES, \text{Entlade}}$	[h], zeitabhängig	Formel 3.11
Vorlauftemperatur ES	$T_{VL, ES1}$	35 °C	[55]
Wärmeleistung WP bei B0/W35	$\Phi_{ES1, 35}$	7.5 kW	[55]
Ladezeit ES	$\Delta t_{ES, \text{Lade}}$	[h], zeitabhängig	Formel 3.12
elektrische Leistung WP bei B0/W35	$P_{WP, 35}$	1.55 kW	[55]
Betrieb mit EMS			
Ausschalttemperatur WWS im erhöhten Betrieb	$T_{WWS, \text{aus}, M3}$	65 °C	Annahme
Ausschalttemperatur ES im erhöhten Betrieb	$T_{ES, \text{aus}, M3}$	35 °C	Annahme

Getroffene Annahmen

Nachfolgend sind die getroffenen Annahmen für das Modell der Wärmepumpe mit Warmwasser- und Energiespeicher zusammengefasst.

Wärmepumpe

- Die Eintrittstemperatur der Wärmequelle T_{WQ1} ist konstant 0°C
- Im Warmwasserbetrieb ist die Vorlauftemperatur $T_{VL,WWS}$ konstant 65°C
- Im Heizbetrieb ist die Vorlauftemperatur $T_{VL,ES1}$ konstant 35°C
- Die Heizleistung Φ_{WP} ist in den beiden Betriebsarten jeweils konstant
- Dadurch ist auch die elektrische Leistungsaufnahme P_{WP} konstant

Warmwasserbetrieb

- Verluste des Warmwasserspeichers werden nicht berücksichtigt
- Die Stundenwerte der Warmwasserentnahme nach SIA 385/2 werden gleichmässig auf die ganze Stunde verteilt.

Heizbetrieb

- Die Raumtemperatur T_R verändert sich nicht
- Das Gebäude wird als ein Raum angesehen. Es gibt keine Raumunterteilungen und damit keine Wärmeübergänge zwischen den Räumen, sondern nur vom Gebäude nach aussen
- Das Raumvolumen entspricht dem Gebäudevolumen
- Verluste des Energiespeichers werden nicht berücksichtigt

SG Ready

- Die erhöhten Werte gelten für die Speichertemperaturen $T_{WWS,aus}$ und $T_{ES,aus}$
- Der Energiespeicher wird zuerst erhöht, danach der Warmwasserspeicher, ausser der Warmwasserspeicher ist leer, dann hat dieser immer noch Vorrang

Startbedingungen

Am Startpunkt des Bewertungsverfahrens sind der Warmwasser- und Energiespeicher vollgeladen.

Geschirrspüler

Modellparameter

Tabelle 17: Modellparameter Geschirrspüler

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Leistung Geschirrspüler	P_{GS}	[W], zeitabhängig	Annahme
Hersteller	-	V-ZUG	[57]
Typ	-	Adora SL GS55SLGHVi	[57]
Standardprogramm	-	Eco	[57]
Dauer Standardprogramm	t_{GS}	4 h 31 Min	Messung

Tabelle 18: Phasen des Lastprofils des Geschirrspülers

Phase	Laufzeit [hh:mm]	Leistung [W]
Phase 1	00:00 – 01:04	14
Phase 2	01:04 – 01:13	2'140
Phase 3	01:13 – 03:39	33
Phase 4	03:39 – 03:44	2'140
Phase 5	03:44 – 04:31	10

Tabelle 19: Nutzungszeiten Geschirrspüler

Wochentag	Nutzungszeit Referenz
Montag - Samstag	07:45 – 12:16 Uhr
Sonntag	09:00 – 13:31 Uhr

Einflussnahme des EMS auf den Referenzablauf

Das EMS erhält täglich ein Zeitfenster, in dem es den Geschirrspüler starten kann. Das Eco-Programm soll spätestens um ca. 18 Uhr beendet sein. Mit einer Laufzeit von 4 h 31 Min ergibt das ein Zeitfenster von 07:45 – 13:30 Uhr bzw. 09:00 – 13:30 Uhr am Sonntag. Um 13:30 Uhr muss das EMS den Geschirrspüler starten, auch wenn kein Überschuss vorhanden ist.

Tabelle 20: EMS-Zeitfenster Geschirrspüler

Wochentag	Zeitfenster EMS
Montag - Samstag	07:45 – 13:30 Uhr
Sonntag	09:00 – 13:30 Uhr

Getroffene Annahmen

Nachfolgend sind die getroffenen Annahmen für das Modell des Geschirrspülers zusammengefasst.

- Der Verbrauch innerhalb einer Phase wird als konstant angenommen.

Waschmaschine

Modellparameter

Tabelle 21: Modellparameter Waschmaschine

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Leistung Waschmaschine	P_{WM}	[W], zeitabhängig	Annahme
Hersteller	-	V-ZUG	[24]
Typ	-	Adora SL WAASLHi	[24]
Standardprogramm	-	Baumwolle 60°	[24]
Dauer Standardprogramm	t_{WM}	3 h 32 Min	Messung

Tabelle 22: Phasen des Lastprofils der Waschmaschine

Phase	Laufzeit [hh:mm]	Leistung [W]
Phase 1	00:00 – 00:05	90
Phase 2	00:05 – 00:09	3'000
Phase 3	00:09 – 00:11	80
Phase 4	00:11 – 00:15	3'000
Phase 5	00:15 – 03:13	90
Phase 6	03:13 – 03:29	420
Phase 7	03:29 – 03:32	60

Tabelle 23: Nutzungszeiten Waschmaschine

Wochentag	Nutzungszeit Referenz
Montag	07:45 – 11:17 Uhr 13:00 – 16:32 Uhr
Dienstag	11:30 – 15:02 Uhr
Mittwoch	07:45 – 11:17 Uhr
Donnerstag	11:30 – 15:02 Uhr
Freitag	07:45 – 11:17 Uhr
Samstag, Sonntag	-

Einflussnahme des EMS auf den Referenzablauf

Das EMS erhält im Bewertungsverfahren Zeitfenster, in denen die Waschmaschine gestartet werden muss. Am Montag muss der erste Waschgang bis ca. 14:00 Uhr beendet sein, damit am Nachmittag die zweite Ladung gewaschen werden kann. Diese muss bis ca. 20:00 Uhr fertig sein. Am Dienstag und Donnerstag muss der Waschgang bis ca. 17:00 Uhr abgeschlossen sein und am Mittwoch und Freitag bis ca. 15:00 Uhr, damit die

Wäsche danach noch getumbelt werden kann. Die dazugehörigen Zeitfenster sind in Tabelle 18 aufgelistet.

Die Waschmaschine muss am Ende des Zeitfenster vom EMS eingeschalten werden, unabhängig davon, ob Überschuss vorhanden ist oder nicht.

Tabelle 24: EMS-Zeitfenster Waschmaschine

Wochentag	Zeitfenster EMS
Montag	07:45 – 10:30 Uhr 13:00 – 16:30 Uhr
Dienstag	07:45 – 13:30 Uhr
Mittwoch	07:45 – 11:30 Uhr
Donnerstag	07:45 – 13:30 Uhr
Freitag	07:45 – 11:30 Uhr
Samstag, Sonntag	-

Getroffene Annahmen

Nachfolgend sind die getroffenen Annahmen für das Modell der Waschmaschine zusammengefasst.

- Der Verbrauch innerhalb einer Phase wird als konstant angenommen.

Tumbler

Modellparameter

Tabelle 25: Modellparameter Tumbler

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Leistung Tumbler	P_{TU}	[W], zeitabhängig	Annahme
Hersteller	-	V-ZUG	[58]
Typ	-	Adora TS WTATSWPHi	[58]
Standardprogramm	-	Standardprogramm	[58]
Dauer Standardprogramm	t_{TU}	58 Min	Messung

Tabelle 26: Phasen des Lastprofils des Tumblers

Phase	Laufzeit [hh:mm]	Leistung [W]
Phase 1	00:00 – 00:58	600

Der Tumbler wird am Mittwoch und Freitag um 15:30 Uhr gestartet. An den anderen Wochentagen wird er nicht benutzt.

Tabelle 27: Nutzungszeiten Tumbler

Wochentag	Nutzungszeit Referenz
Montag, Dienstag	-
Mittwoch	15:30 – 16:28 Uhr
Donnerstag	-
Freitag	15:30 – 16:28 Uhr
Samstag, Sonntag	-

Einflussnahme des EMS auf den Referenzablauf

Das EMS erhält am Mittwoch und Freitag ein Zeitfenster von 15:30 – 19:00 Uhr, in dem es den Tumbler einschalten kann. Das bedeutet, der Tumbler muss spätestens um 20 Uhr sein Programm beendet haben.

Selbst wenn kein Überschuss vorhanden ist, muss das EMS den Tumbler spätestens um 19 Uhr einschalten.

Tabelle 28: EMS-Zeitfenster Tumbler

Wochentag	Zeitfenster EMS
Montag, Dienstag	-
Mittwoch	15:30 – 19:00 Uhr
Donnerstag	-
Freitag	15:30 – 19:00 Uhr
Samstag, Sonntag	-

Getroffene Annahmen

Nachfolgend sind die getroffenen Annahmen für das Modell des Tumblers zusammengefasst.

- Der Verbrauch innerhalb einer Phase wird als konstant angenommen.

Ladestation Elektroauto

Formeln Referenzablauf

Ladedauer der Phase 1

$$t_{80\%} = \frac{K_{80\%}}{P_{Car}(t_{80\%})} \quad (\text{A.13})$$

Grundfunktion Phase 2

$$f(t) = P_{Car}(t) = a * t + b \quad (\text{A.14})$$

$$a = \frac{P_{Car}(t_{100\%}) - P_{Car}(t_{80\%})}{t_{100\%} - t_{80\%}} \quad \text{und} \quad b = P_{Car}(t_{80\%}) \quad (\text{A.15})$$

Ladefunktion Phase 2

$$f(t) = P_{Car}(t) = \frac{-P_{Car}(t_{80\%})}{t_{100\%} - t_{80\%}} * t + P_{Car}(t_{80\%}) \quad (\text{A.16})$$

Ladedauer Phase 2

$$t_{100\%} - t_{80\%} = \frac{2 * K_{20\%}}{P_{Car}(t_{80\%})} \quad (\text{A.17})$$

Ladezustand SOC

$$SOC(t) = \frac{100 * \sum_{t=1}^n P_{Car}(t) * \Delta t}{K_{Nenn}} \quad \text{mit} \quad \Delta t = t_2 - t_1 \quad (\text{A.18})$$

Der Ladezustand SOC ist der Ladestation nicht bekannt. Das Elektroauto kommuniziert diesen Wert nicht.

Einflussnahme des EMS auf den Referenzablauf

Das EMS gibt der Ladestation den Ladestrom vor

Funktion der Ladekurve $f(t)$

$$f(t)' = P_{Car}(t)' = \frac{-P_{Car}(t_{80\%})}{t'_{100\%} - t_{80\%}} * t + P_{Car}(t_{80\%}) \quad (A.19)$$

$$t'_{100\%} - t_{80\%} = \frac{2 * K_{20\%}}{P_{Car}(t_{80\%})} \quad (A.20)$$

Liegt zum Zeitpunkt t_n die Vorgabe vom EMS unterhalb von $f(t)$, so wird der Wert vom EMS übernommen. Aufgrund der kleineren Ladeleistung wäre der Akku zum Zeitpunkt $t'_{100\%}$ noch nicht vollgeladen. Die Ladedauer $t'_{100\%} - t_{80\%}$ verlängert sich und muss neu berechnet werden. Dafür wird die Kapazität K_n benötigt, die zum Zeitpunkt t_n noch geladen werden muss und die Ladeleistung $P_{Car}(t_n)$ zum Zeitpunkt t_n .

$$t_{100\%,n} - t_{80\%} = \frac{2 * K_n}{P_{Car}(t_n)} \quad (A.21)$$

Damit ergibt sich die neue Funktion $f_n(t)$. Diese bildet nun die neue Obergrenze der Ladekurve und muss jedes Mal neu berechnet werden, wenn das EMS einen tieferen Wert vorgibt.

$$f_n(t) = P_{Car,n}(t) = \frac{-P_{Car}(t_n)}{t_{100\%,n} - t_n} * t + P_{Car}(t_n) \quad (A.22)$$

Getroffene Annahmen

Nachfolgend sind die getroffenen Annahmen für das Modell der Ladestation und das Elektroauto zusammengefasst.

- Der Wechsel von Phase 1 zu Phase 2 findet bei SOC = 80% statt, unabhängig von Temperatur und Ladeleistung
- Die Ladeleistung sinkt in Phase 2 linear
- Der Verbrauch nach WLTP pro 100 km wird für jede Fahrtstrecke genutzt, unabhängig davon, ob es eine Autobahnstrecke oder eine Stadtrundfahrt ist

Startbedingungen

Das Elektroauto ist am Startpunkt des Bewertungsverfahrens zu 100% geladen.

Modellparameter

Tabelle 29: Modellparameter Ladestation Elektroauto

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Ladeleistung Elektroauto	P_{Car}	[W], zeitabhängig	Formel A.16
Ladezustand	SOC	[%], zeitabhängig	Formel A.18
Ladedauer Phase 1	$t_{80\%}$	[h], zeitabhängig	Formel A.13
Ladedauer Phase 2	$t_{100\%} - t_{80\%}$	[h], zeitabhängig	Formel A.17
80% der Batteriekapazität	$K_{80\%}$	$80\% * K_{Nenn}$	Berechnung
20% der Batteriekapazität	$K_{20\%}$	$20\% * K_{Nenn}$	Berechnung
Zeitschritt	Δt	60 s	Annahme
Ladestation			
Hersteller	-	Keba	[25]
Typ	-	p30x	[25]
Anschluss	-	3x 230 V	[25]
max. Ladeleistung	$P_{Lade,max}$	22 kW	[25]
min. Ladeleistung	$P_{Lade,min}$	4.1 kW	[30]
Elektroauto			
Hersteller	-	Tesla	[27]
Typ	-	Model 3 Standard Range Plus	[27]
Akkukapazität	K_{Nenn}	53 kWh	[27]
Verbrauch nach WLTP	E_{WLTP}	14.3 kWh/100 km	[27]
max. Ladeleistung	$P_{Lade,max,A}$	11 kW	[27]
Modell mit EMS			
berechnete Ladekurve in Phase 2	$f(t)' = P_{Car}(t)'$	[W], zeitabhängig	Formel A.19
berechnete Ladedauer Phase 2	$t'_{100\%} - t_{80\%}$	[h], zeitabhängig	Formel A.20
beliebiger Zeitpunkt, an dem eine Neuberechnung notwendig ist	t_n	[h], zeitabhängig	-
neu berechnete Restladedauer Phase 2	$t_{100\%,n} - t_{80\%}$	[h], zeitabhängig	Formel A.21
neu berechnete Ladekurve in Phase 2	$f_n(t) = P_{Car,n}(t)$	[W], zeitabhängig	Formel A.22

Anhang 3: Meteodaten

Folgende Zeiträume wurden für die Meteodaten Aussentemperatur und Einstrahlung ausgewählt.

Winter

19. – 25. Januar

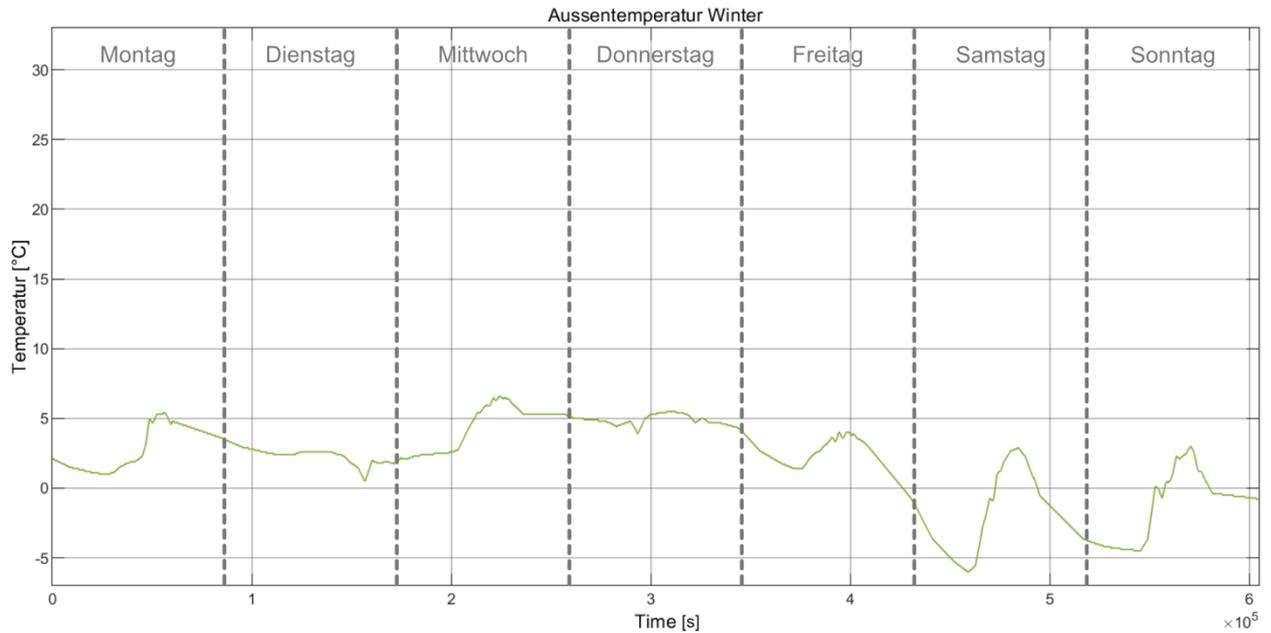


Abbildung 85: Meteodaten Aussentemperatur Winter

Quelle: Hochschule Luzern

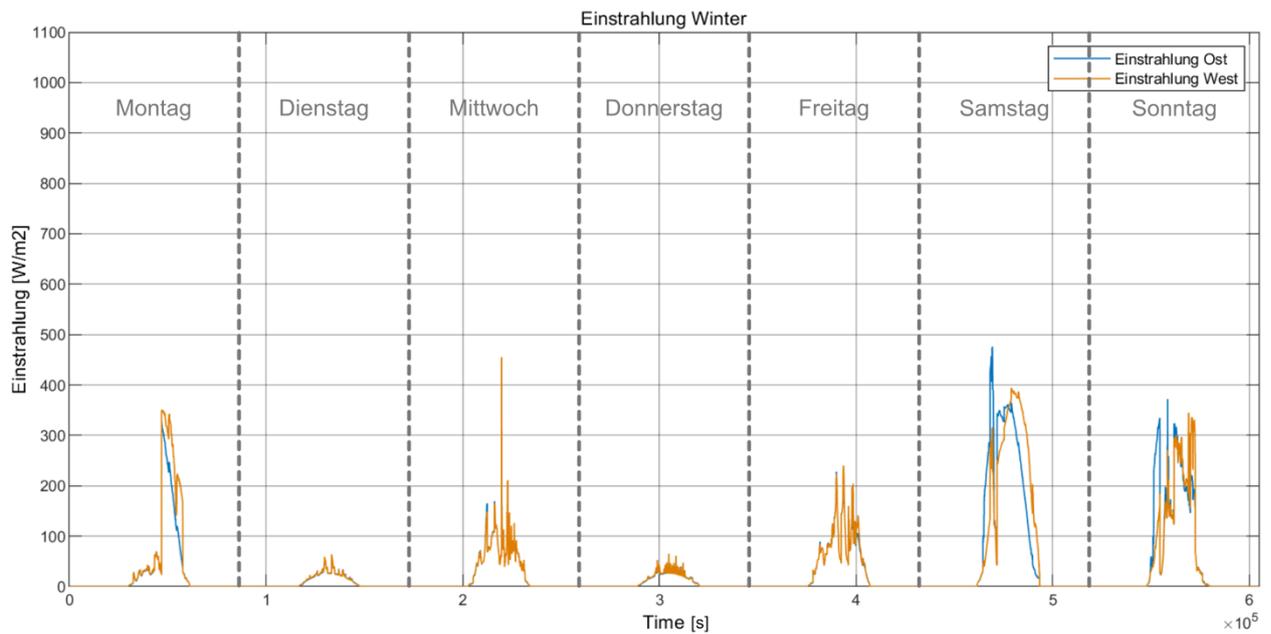


Abbildung 86: Meteodaten Einstrahlung Winter

Quelle: Hochschule Luzern

Übergangszeit

9. – 15. April

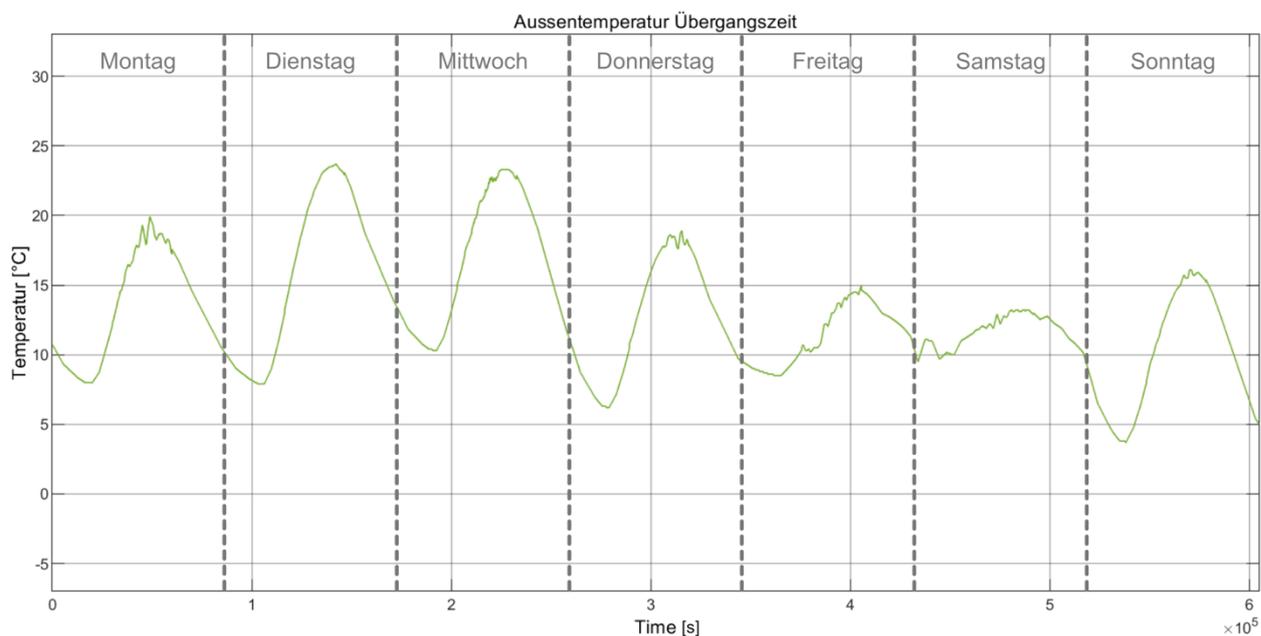


Abbildung 87: Meteodaten Aussentemperatur Übergangszeit
Quelle: Hochschule Luzern

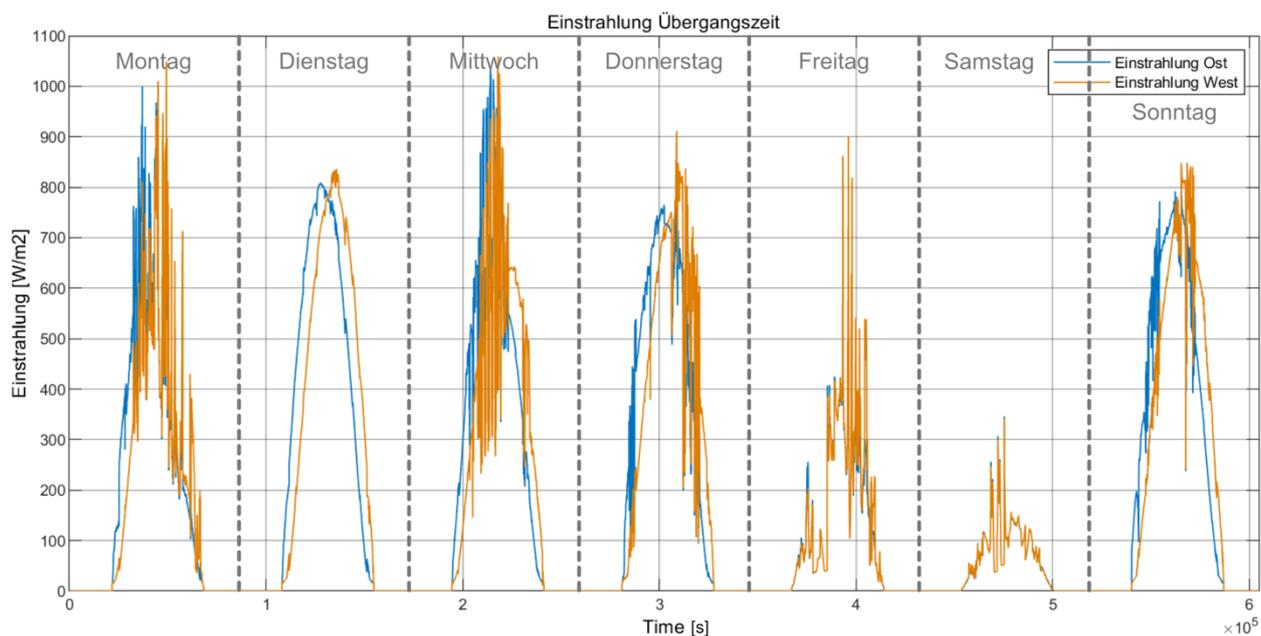


Abbildung 88: Meteodaten Einstrahlung Übergangszeit
Quelle: Hochschule Luzern

Sommer

15. – 21. August

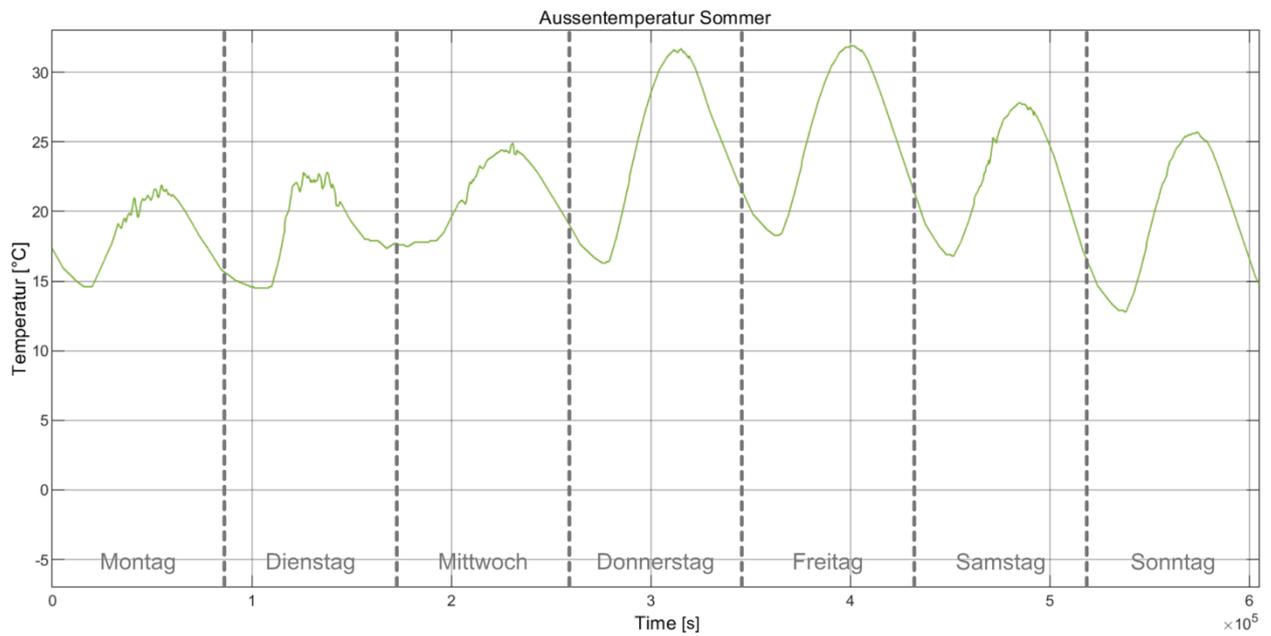


Abbildung 89: Meteodaten Aussentemperatur Sommer

Quelle: Hochschule Luzern

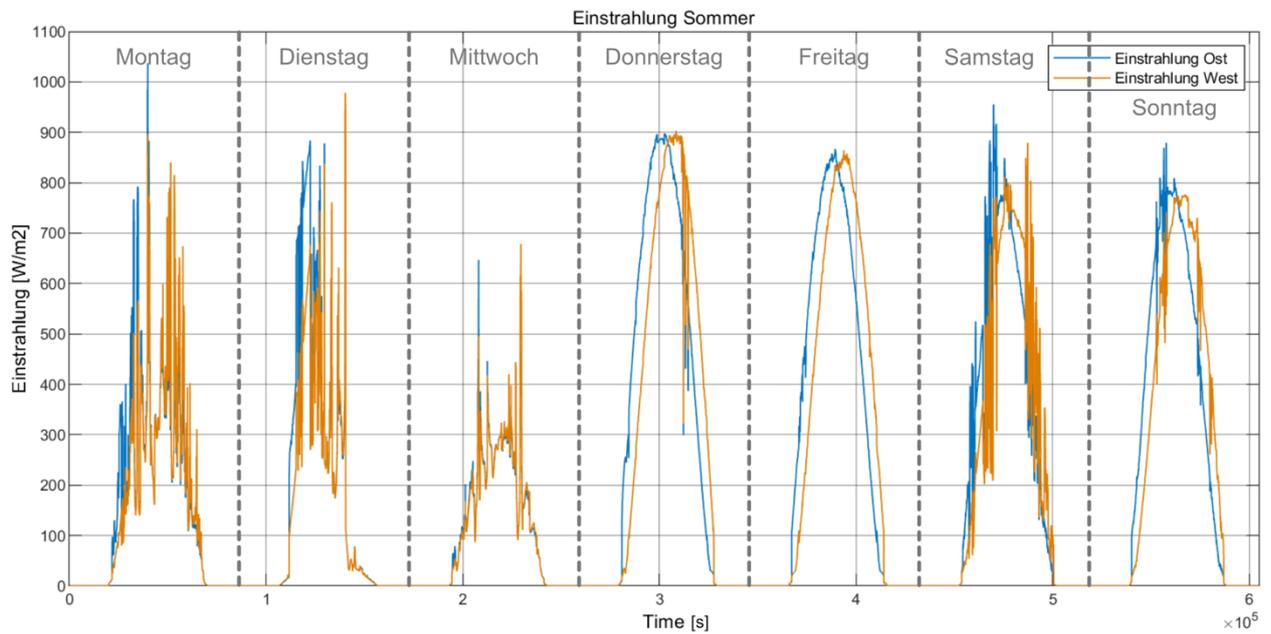


Abbildung 90: Meteodaten Einstrahlung Sommer

Quelle: Hochschule Luzern