

Programm Lebensgrundlage Umwelt
und ihre Sicherung (BWPLUS)

Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums
Umweltforschung Baden-Württemberg 2019

18./19. März 2019
Schwabenlandhalle Fellbach
Guntram-Palm-Platz 1, 70734 Fellbach

Heat4SmartGrid_BW

von

M. Schulz, J. Kumm, K. Hufendiek

Universität Stuttgart
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)

T. Kemmler, B. Thomas

Hochschule Reutlingen
Reutlinger Energiezentrum (REZ)

Förderkennzeichen: BWSGF17005-17006

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden
mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Executive Summary.....	3
1. Zielsetzung und Arbeitsprogramm	4
2. Darstellung des Arbeitsstandes	5
2.1 Verifikation der Simulationsmodelle am Prüfstand (AP4).....	5
2.1.1 Prüfstand am REZ und Erweiterung des Prüfstands.....	5
2.1.2 Hardware-in-the-loop und Überprüfung der Simulationsmodelle (M3).....	6
2.1.3 Ergebnisse der ersten Versuche	7
2.2 Vergleich der Simulationsmodelle vom REZ und IER.....	8
2.2.1 Simulationsmodell REZ	8
2.2.2 Simulationsmodell E2M2_DES.....	9
2.2.3 Modellinput/Szenariorahmen	10
2.2.4 Modellvergleich	11
3. Projektstatus	13
4. Quellenverzeichnis.....	13

Kurzfassung

Das Projekt „Heat4SmartGrid“ untersucht, welches Potenzial Baden-Württemberg für die Wärmeversorgung von vornehmlich Wohngebäuden mit Wärmepumpen in Verbindung mit erneuerbaren Energien, hauptsächlich Photovoltaik, bietet. Gleichzeitig wird untersucht, inwieweit das Verteilnetz durch eine intelligente Steuerung der Wärmepumpen entlastet werden kann. Der vorliegende Projektbericht zeigt die durchgeführten Arbeiten der Projektpartner im Jahr 2018. Es werden insbesondere die Arbeitspakete (AP) 4 und 6 sowie Meilenstein 3 und 4 thematisiert.

In AP 4 wird der Wärmepumpen-Prüfstand der Hochschule Reutlingen um einen Pufferspeicher mitsamt erforderlicher Messtechnik sowie Hardware-in-the-loop (HiL) Umgebung zur Überprüfung und Verifizierung der generierten, optimalen Fahrpläne, erweitert. Insbesondere im Dezember 2018 und Januar 2019 sind erste Langzeitversuche über 24h erfolgreich am Prüfstand durchgeführt worden. Dies zeigt, dass das HiL-System in der Lage ist, die mit den verschiedenen Algorithmen erstellten Fahrplänen zu bedienen. Meilenstein 3, welcher die Verifizierung eines Simulationsmodells am Prüfstand fordert, muss aufgrund von verzögerten Lieferzeiten von Komponenten für den Prüfstand in den Februar 2019 verschoben werden. Die ersten Versuche am Prüfstand stimmen jedoch optimistisch, dass der Meilenstein 3 entsprechend erreicht wird. In Arbeitspaket 6 werden die beiden Simulationsmodelle des IER und REZ miteinander verglichen. Hierzu werden unter Perfect-Foresight Jahressimulationen unter gleichen Randbedingungen und mit gleichen Inputdaten durchgeführt. Die beiden Simulationsmodelle sind hierzu weitestgehend aufeinander abgestimmt worden, sodass die Resultate der Jahressimulationen vergleichbar werden. Die Simulationsergebnisse der Jahressimulationen zeigen sich als durchaus vergleichbar, sodass eine Kombination aus beiden Simulationsmodellen möglich erscheint und somit angestrebt wird: Der mittels Optimierung generierte Fahrplan des IER Modells soll in das mehr technisch ausgerichtete Heuristik-Modell des REZ eingespeist und auf die praktische Umsetzbarkeit hin untersucht werden.

Executive Summary

The project "Heat4SmartGrid" analyses the potential of Baden-Württemberg for heat supply of residential buildings with heat pumps in connection with renewable energies, primarily photovoltaics. At the same time, it will be investigated to what extent the distribution network can be relieved by intelligent control of the heat pumps. This project report shows the work carried out by the project partners in 2018, in particular the work packages (WP) 4 and 6 as well as milestones 3 and 4.

In WP 4, the heat pump test bench at Reutlingen University was extended by a thermal energy storage with the necessary measurement technology and a hardware-in-the-loop (HiL) environment for verification of the generated optimum schedules. Especially in December 2018 and January 2019, the first long-term tests over a period of 24 hours were successfully carried out. The results show that the HiL system is able to operate the heat pump with regard to the schedules created with the various algorithms. Milestone 3, which requires the verification of a simulation model on the test bench, has to be postponed to February 2019 due to delayed delivery of components for the test bench. The first tests on the test bench give cause for optimism that milestone 3 will be reached until then. In WP 6, the two simulation models of IER and REZ are compared to each other. For this purpose, annual simulations under the same boundary conditions and based on the same input data are carried out under Perfect-Foresight. Beforehand, the two simulation models were coordinated as far as possible so that the results of the annual simulations are comparable. The simulation results of the annual simulations show minor deviations, only, therefore a combination of both simulation models is aimed at: The schedule of the IER model generated by optimization will be fed into the more technical heuristic model of the REZ and examined for practical feasibility.

1. Zielsetzung und Arbeitsprogramm

Das Land Baden-Württemberg (BW) verfolgt mit dem Ziel „50-80-90“ bis zum Jahr 2050 die Reduktion des Energiebedarfs um 50 %, einen Anteil von 80 % von erneuerbaren Energien an der Energieversorgung sowie die Reduktion der Treibhausgasemission um 90 %. Ein Mittel zur Erreichung dieser Ziele liegt in der Transformation der Gebäudewärmeversorgung, welche in Baden-Württemberg für knapp 30 % der CO₂-Emissionen verantwortlichen ist. Hierzu bietet sich insbesondere der flächendeckende Einsatz von elektrischen Wärmepumpen an. Weiterhin wird die erneuerbare Stromerzeugung in BW, die vor allem durch eine hohe Gleichzeitigkeit von PV-Einspeisung gekennzeichnet sein wird, vor ernsthafte zeitweise Engpässe des Verteilnetzes gestellt.

Im vorliegenden Projekt „Heat4SmartGrid“ soll vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen untersucht werden, wie mithilfe von intelligent gesteuerten Wärmepumpen der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung in Baden-Württemberg gesteigert und zudem das Verteilnetz entlastet werden kann.

Aufgabenpaket	Status	2017			2018				2019				2020
		Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1
1 Wärmebedarfsanalyse													
2 WP-Betriebsmodi													
3 Technische Analyse													
4 Verifizierung Simulationsmodell													
5 Prognosealgorithmen													
6 Intell. Steuerungsalgorithmen													
7 Potentialermittlung WP													
8 Handlungsempfehlungen													
M1 Definition von Referenz-Wärmepumpengebäudesystemen													
M2 Prognosealgorithmen für solare Erzeugung\Wärmenachfrage													
M3 Verifikation des Simulationsmodell am Prüfstand													
M4 Vergleich Steuerungsalgorithmen unter Perfect-Foresight													

Abbildung 1-1: Übersicht über die einzelnen Arbeitspakete im Projekt Heat4SmartGrid

In Abbildung 1-1 sind die einzelnen Arbeitspakete des Projekts dargestellt. Mit Blick auf den rot umrahmten Berichtszeitraum vom 01.01.2018 bis zum 31.12.2018 steht in diesem Zwischenbericht mit Blick auf den Projektfortschritt insbesondere die Fälligkeit der beiden Meilensteine 3 (M3) „Verifikation des Simulationsmodells am Prüfstand“ und Meilenstein 4 (M4) „Vergleich Steuerungsalgorithmen unter Perfect-Foresight im Blickpunkt. Während bei Meilenstein 3 mindestens ein Simulationsmodell aus AP3 in AP4 am Wärmepumpenprüfstand verifiziert werden soll, zielt Meilenstein 4 auf den Vergleich der beiden Optimierungsmodelle bzgl. des PV-Wärmepumpen-Speichersystems ab. Im Folgenden wird die Umsetzung beider Meilensteine näher erläutert.

2. Darstellung des Arbeitsstandes

2.1 Verifikation der Simulationsmodelle am Prüfstand (AP4)

Kemmler, T.

Reutlinger Energiezentrum (REZ), Hochschule Reutlingen

In AP4 sollen die in AP3 entwickelten Simulationsmodelle auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht werden. Hierfür steht an der Hochschule Reutlingen ein Prüfstand mit einer Sole-Wasser-Wärmepumpe (SWP) mit einer thermischen Leistung von ca. 17 kW zur Verfügung. Ziel des Arbeitspakets ist es, ein Simulationsmodell zu überprüfen und zu verifizieren. Aufgrund der praktischen Relevanz für das Projekt mündet dieses Arbeitspaket in Meilenstein 3.

2.1.1 Prüfstand am REZ und Erweiterung des Prüfstands

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Mittel für die Erweiterung des Wärmepumpenprüfstands um einen Pufferspeicher bereitgestellt. Dieser soll prinzipiell häufiges Takten der Wärmepumpe vermeiden, indem diese durch das Einspeisen ihrer erzeugten thermischen Energie in den Pufferspeicher längere Laufzeiten erzielt. Eine Besonderheit des Pufferspeichers, der im Rahmen des Projektes für den Prüfstand angeschafft wurde, ist, dass dieser in zwei Zonen eingeteilt ist. Eine Zone wird für das Brauchwarmwasser verwendet, die andere für das Heizungswasser. Beide Zonen sind durch ein Lochblech getrennt. Zur besseren Analyse der Vorgänge am und im Pufferspeicher, insbesondere zur Untersuchung der Temperaturschichtung im Speicher, wurden zusätzliche Temperatursensoren und Thermoelemente sowie ein weiterer Durchflussmengenmesser installiert. Zudem war es notwendig, zwei schaltbare Ventile zur gezielten Nutzung des Pufferspeichers zu beschaffen und in den Prüfstand zu integrieren. Tabelle 2-1 zeigt eine Übersicht der Komponenten des Prüfstands.

Tabelle 2-1: Übersicht der Komponenten des Prüfstands

Komponente	Details
Wärmepumpe	<ul style="list-style-type: none">- Typ: Viessmann Vitocal 300-G BWC 301.B17 (Sole-Wasser-Wärmepumpe)- Nenn-Wärmeleistung: 17,2 kW (nach DIN EN 14511; B0/W35, 5 K Spreizung)- Max. Vorlauftemperatur: 65°C
Thermischer Speicher	<ul style="list-style-type: none">- Typ: Viessmann Vitocell 120-E (2-Zonen-Speicher)- Fassungsvermögen:<ul style="list-style-type: none">- Gesamt: 600 Liter (350 Liter Brauchwarmwasser, 250 Liter Heizungswasser)- Besonderheiten: elektrischer Heizstab, Frischwasserstation
Wärmeübertrager Heizkreis	<ul style="list-style-type: none">- Typ: Thermowave thermolineEco (Plattenwärmetauscher)
Frischwasserstation	<ul style="list-style-type: none">- Typ: Viessmann Vitotrans 353 PZSA- Zapfleistung: bis 1500 l/h
Messtechnik	<ul style="list-style-type: none">- Temperatursensoren (23x), Durchflussmesser (5x)
Aktoren	<ul style="list-style-type: none">- Schaltbare Ventile (4x), Externe Umwälzpumpen (1x)

Das Heizsystem eines Verbrauchers wird mit Hilfe eines Wärmeübertragers simuliert. Mit Hilfe einer steuerbaren Pumpe sowie geregelten Vor- und Rücklauftemperaturen können an diesem Wärmeübertrager gezielt Heizlastprofile aufgeprägt und abgefahren werden. Über eine Frischwasserstation, die das eintretende Kaltwasser im Durchlauferhitzerprinzip auf eine vorzugebende Temperatur erwärmt und die direkt am Pufferspeicher angebracht ist, können Brauchwarmwasserlasten (BWW-Lasten) aus dem Speicher abgerufen werden. Zu diesem Zweck steht seitens des Prüfstands ein regelbarer Kaltwasserstrom zur Verfügung, mit dem

beliebige Zapfprofile und damit Brauchwarmwasserlastprofile nachgebildet werden können. Durch diesen Aufbau ist der Prüfstand in der Lage, einen Verbraucher, bspw. ein Einfamilienhaus, thermisch abzubilden und so Versuche zur Überprüfung und Validierung der vom Simulationsmodell erzeugten Fahrpläne für die Wärmepumpe durchzuführen.

2.1.2 Hardware-in-the-loop und Überprüfung der Simulationsmodelle (M3)

Um die in Matlab erzeugten Fahrpläne auf praktische Umsetzbarkeit zu testen, wurde der Prüfstand um eine Hardware-in-the-loop (HiL) Umgebung erweitert. Abbildung 2-1 abstrahiert den Aufbau des Prüfstands und der Programmumgebung.

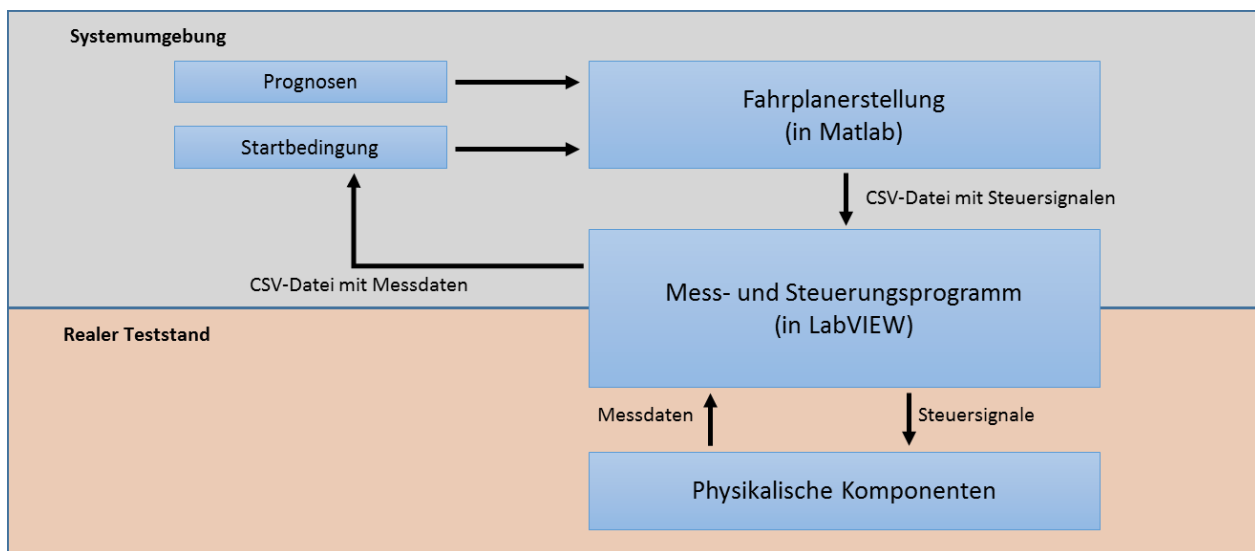


Abbildung 2-1: Schema der HiL-Umgebung

Die Steuersignale des in Matlab erstellten Fahrplans werden mittels einer CSV-Datei an das Mess- und Steuerungsprogramm, in diesem Fall LabView, weitergeleitet und dort verarbeitet. In LabView findet sowohl die komplette Messdatenerfassung als auch die Ansteuerung der Wärmepumpe und der Verbraucher statt. Ziel der Untersuchung ist es zu prüfen, ob die erstellten Fahrpläne auch in der Realität umsetzbar sind. Als Grundlage werden dafür verschiedene Lastprofile sowohl für die BWW-Bereitung als auch für die Heizung verwendet. Die Lastprofile werden in die Optimierungsfunktion in Matlab zur Erstellung des Fahrplans eingelesen, welcher die Steuersignale für die WP enthält. Diese Lastprofile werden in gleicher Weise am Prüfstand eingestellt, um für gleiche Randbedingungen in Simulation und Versuch zu sorgen.

Als Grundlagen für die Erstellung der Lastprofile dienen die VDI Richtlinie 4655 und die Standardlastprofile des BDEW, wobei auf der Basis von Typtagen Lastverläufe für einen Sommer-, Winter- und Übergangstag angewendet werden sollen.

Die am Prüfstand im LabView-Programm aus dem entgegengenommenen Fahrplan generierten Steuersignale für die Wärmepumpe orientieren sich an dem SG ready Label [5] des Bundesverband Wärmepumpen. Auf diese Weise wird erreicht, dass der Algorithmus herstellerunabhängig ist und damit auf jede Wärmepumpe angewendet werden kann, die das SG ready Label trägt. Das Fahrplansignal für „Wärmepumpe ein“ entspricht dabei dem Schaltzustand „Zwangsbetrieb“ des SG ready Labels. Hierfür werden die Solltemperaturen der Temperaturfühler am Pufferspeicher, mit der die Wärmepumpe gesteuert wird, erhöht, sodass sie starten kann. Das Fahrplansignal „Wärmepumpe aus“ versetzt die Wärmepumpe dagegen in den Normalbetrieb gemäß SG ready, d.h., die hinterlegten Sollwerte der Temperaturfühler am Speicher werden auf Mindestwerte gesetzt, sodass der Komfort im Gebäude gewährleistet bleibt.

2.1.3 Ergebnisse der ersten Versuche

Die ersten Versuche mit dem beschriebenen Prüfstand wurden inzwischen erfolgreich am REZ durchgeführt, und Abbildung 2-2 zeigt die Ergebnisse eines 24-h-Versuchs. Der Versuch basiert auf dem Lastprofil des Typtags „WWB“ nach VDI 4655. Hierbei handelt es sich um einen bewölkten Werktag im Winter. Das betrachtete Objekt stellt ein Einfamilienhaus mit 25.000 kWh/a Heizbedarf und 2.000 kWh/a BWW-Bedarf dar. Gemäß VDI 4655 liegt der Heizbedarf für den betrachteten Typtag bei 110 kWh, der BWW-Bedarf bei 5 kWh. In der Abbildung orange dargestellt ist der Soll-Fahrplan laut Optimierung, die blaue Linie zeigt die gemessene elektrische Leistung der Wärmepumpe am Prüfstand und somit die tatsächliche Laufzeit der Wärmepumpe. Die graue Linie T4 entspricht dem Thermoelement am Speicher auf Höhe des Heizungsvorlaufs der Wärmepumpe zum Speicher. T_min in Grün zeigt die Einschalttemperatur der Wärmepumpe in der Heizungszone des Speichers. Beide Temperaturdatensätze sind auf der Sekundärachse abgetragen. Wie man auf Abbildung 2-2 erkennen kann, stimmen Fahrplan und die tatsächliche Laufzeit der WP schon gut überein. Daraus lässt sich ableiten, dass das Abbild des Speichers in der Matlab-Simulation gut zum Speicher am Prüfstand passt. Lediglich bei Stunde 16 und 19 unterschreitet T4 die Grenztemperatur T_min für längere Zeit was zu einer Fahrplanverletzung führt. Dies lässt sich durch das Absinken der Soletemperatur auf knapp -10°C erklären; bei diesen Temperaturen schaltet sich die Wärmepumpe aufgrund sicherheitsrelevanter Aspekte ab, was auch das Takten in diesem Bereich erklärt, da die Wärmepumpe nach wie vor bestrebt ist, den Fahrplan zu erfüllen. Das Absinken von T4 zu Beginn des Versuchs erklärt sich dadurch, dass die Wärmepumpe den Speicher zuerst auf „Betriebstemperatur“ bringen muss, sodass der Bedarf bedient werden kann. Die Abweichungen der über den Tag kumulierten Wärmebedarfe für Heizung und BWW zwischen Simulation und Prüfstandsbetrieb liegen bei etwa 5%. Des Weiteren soll die Wärmepumpe laut Fahrplan 717 Minuten in Betrieb sein; am Prüfstand beträgt die tatsächliche Laufzeit 696 Minuten, was einer Abweichung von 3% entspricht. Dies zeigt, dass die Wärmepumpe am Prüfstand den erstellten Fahrplan bedienen kann, was wiederum als Bestätigung für die Umsetzbarkeit der aus der Simulation resultierenden Fahrplanoptimierung gewertet werden kann.

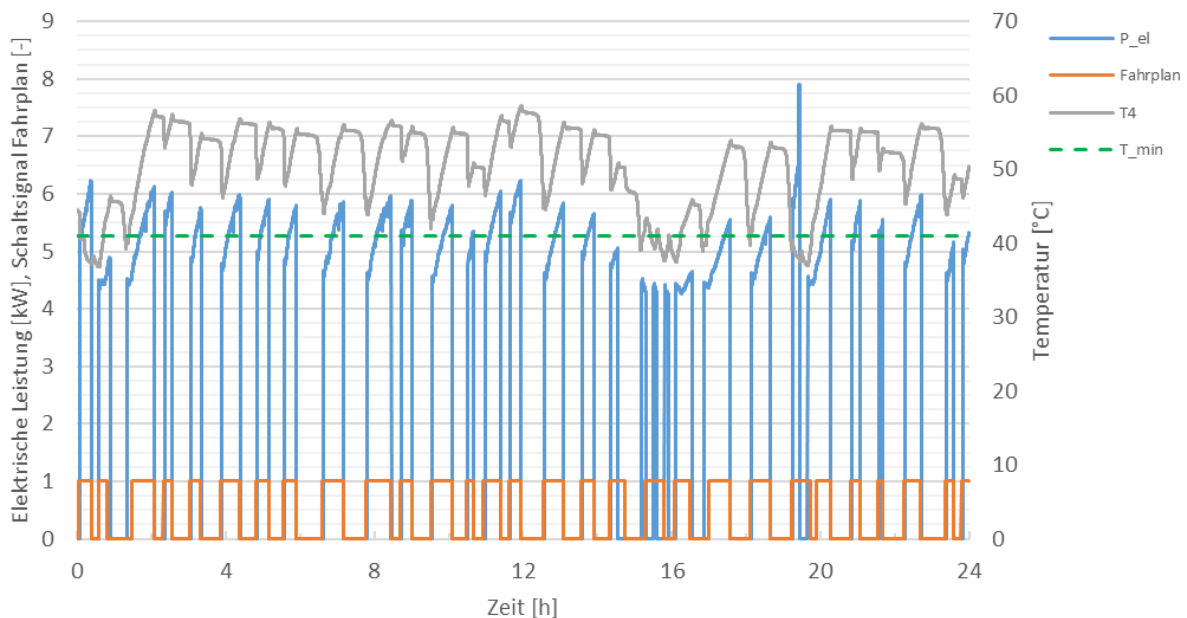


Abbildung 2-2: Prüfstandsergebnisse für Typtag „WWB“

Im nächsten Schritt sollen ein Übergangs- und ein Sommertag gemäß VDI 4655 am Prüfstand verifiziert werden. Wenn die Wärmepumpe den Fahrplan in gleichem Maße auch an diesen Tagen bedienen kann, kann Meilenstein 3 als erfolgreich erreicht angesehen werden.

2.2 Vergleich der Simulationsmodelle vom REZ und IER

Kemmler, T.; Schulz, M.

Reutlinger Energiezentrum (REZ), Hochschule Reutlingen; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

Neben der Untersuchung der praktischen Umsetzbarkeit sollen im Projekt auch intelligente dezentrale Steuerungsalgorithmen entwickelt werden, mittels derer Fahrpläne für die Wärmepumpen erzeugt werden. Diese Fahrpläne wiederum ermöglichen die Bestimmung der Freiheitsgerade der Systeme und damit des Flexibilitätspotentials des Wärmepumpen-Speichersystems. In AP 3 wird diese Steuerung seitens REZ, in AP 6 seitens IER erarbeitet. Meilenstein 4 (M4), fällig nach 17 Monaten (also zu Januar 2019), fokussiert hierbei den Vergleich beider Steuerungsalgorithmen unter Perfect-Foresight. In diesem Kapitel sollen hierzu zunächst beide Steuerungsmodelle vorgestellt und anschließend verglichen werden.

2.2.1 Simulationsmodell REZ

Im Folgenden wird das Simulationsmodell des REZ näher beschrieben, welches in Matlab-Simulink programmiert ist. Prinzipiell besteht das Simulationsmodell aus vier Bausteinen: Prognose, Optimierung, Interne Steuerung und den dynamischen Modellen (vgl. Abbildung 2-3).

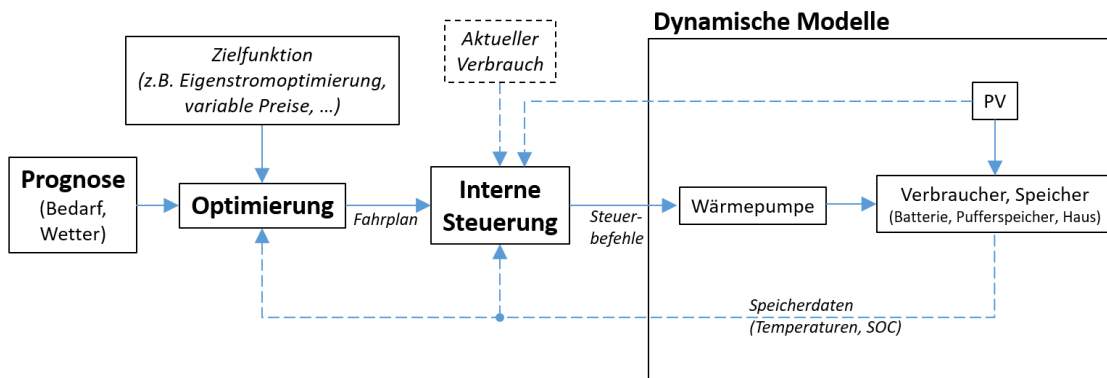


Abbildung 2-3: Schema des Simulationsmodells des REZ

Sowohl die Bausteine „Prognose“ als auch „Optimierung“ sind als Matlab-Funktion geschrieben und in die Simulink-Umgebung als Funktionsbausteine integriert. Die „Interne Steuerung“ ist in Stateflow programmiert und ebenfalls in Simulink eingebettet. Die „dynamischen Modelle“ wie die Wärmepumpe, die Speicher sowie die PV-Anlage sind Teile des CARNOT-Blocksets [1], welches eine frei verfügbare Toolbox für Simulink ist. Nachfolgend werden die vier Bausteine detailliert erläutert. Als Prognose wird hier die sogenannte „naive Prognose“ verwendet, d.h., der zu prognostizierende Tag entspricht dem vorherigen Tag. Bei der Prognose für den Strombedarf wird hier für jeden Zeitpunkt der Mittelwert aus den letzten sieben Tagen gebildet. Beim BWW-Bedarf wird der Mittelwert über drei Tage gebildet. Der Heizbedarf wird nicht direkt prognostiziert, sondern es werden nur die Lufttemperaturen für den zu prognostizierenden Tag aus Datensätzen des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) eingelesen. Der Heizbedarf ergibt sich im Anschluss aus den Transmissionsverlusten des betrachteten Objekts in Abhängigkeit der Außentemperaturen. Die PV Prognose wird ebenfalls mit Hilfe des DWD-Datensatz durchgeführt. Dieser enthält zusätzlich zu den Außentemperaturen Informationen über die Diffus- und Direktstrahlung für den ausgewählten Standort. Die daraus resultierende PV-Leistung wird nach [3] berechnet. Die Prognosefunktion erstellt somit drei Vektoren für den nächsten Tag – Strombedarf, BWW-Bedarf und Außentemperaturen – die an den Optimierungsbaustein weitergeleitet und dort verarbeitet werden. Im Baustein „Optimierung“ werden auf Basis der Prognosewerte Fahrpläne mit einem heuristischen Verfahren, dem Monte Carlo Verfahren, für die kommenden 24 Stunden erstellt. Es werden zufällig 1000 Fahrpläne erzeugt, die lediglich die Restriktionen maximale und minimale Raumtemperatur,

maximaler und minimaler Ladezustand des BWW-Speichers sowie Mindestlaufzeit und Mindeststillstandzeit der Wärmepumpe berücksichtigen. Von diesen 1000 erstellten Fahrplänen werden die zehn Fahrpläne ausgewählt, die die Zielfunktion, hier PV-Eigenstromnutzung, am besten erfüllen. Von diesen zehn Fahrplänen wird dann derjenige ausgewählt, der die geringste Anzahl Starts der Wärmepumpe erfordert. Dieser Fahrplan wird anschließend an die interne Steuerung weitergegeben, wo er verarbeitet wird. Wie in Abbildung 2-3 zu sehen ist, werden zusätzlich zum Fahrplan aktuelle Daten aus der Wärmepumpenanlage und dem Gebäude, wie die tatsächlichen Energieverbräuche und der aktuelle Speicherzustand, in die interne Steuerung eingespeist. Dies ermöglicht der internen Steuerung u.a. auf Prognosefehler zu reagieren. Wenn laut Fahrplansignal die Wärmepumpe beispielsweise laufen soll, jedoch die maximale Raumtemperatur schon erreicht oder der BWW-Speicher vollgeladen ist, kann die Wärmepumpe nicht starten. Dies stellt sicher, dass die physikalischen Grenzen der thermischen Speicher weder unter- noch überschritten werden. Die „dynamischen Modelle“ repräsentieren die realen Komponenten der Heizungsanlage sowie das Gebäude selbst. Dabei handelt es sich sowohl um vom REZ erweiterte Modelle aus der CARNOT-Toolbox als auch vom REZ selbst entwickelte Modelle. Sie stellen die physikalisch-technische Ebene des Simulationsmodells dar. Im Detail betrachtet wurde das Grundmodell für die Wärmepumpe aus der CARNOT-Toolbox entnommen und vom REZ so weiterentwickelt, dass die Wärmepumpe in zwei Betriebsmodi arbeiten kann – im BWW- und im Heizungsmodus. Das Hausmodell ist ebenfalls in seiner Grundform aus der Toolbox entnommen, jedoch wurde es um ein Fußbodenheizungsmodell in Simscape erweitert, so dass der Fußboden als thermischer Speicher für den Heizungsmodus der Wärmepumpe nutzbar ist. BWW-Speicher und PV-Anlage sind direkt aus der CARNOT-Toolbox entnommen.

Das Simulationsmodell des REZ ermöglicht eine Simulation aller relevanten Komponenten in einer variablen Auflösungsgenauigkeit. Gute Ergebnisse hinsichtlich des Verhältnisses Genauigkeit zu Simulationszeit lieferten Simulationen bei variabler Zeitschrittweite mit einem maximalen Zeitschritt von 150 Sekunden und einem minimalen Zeitschritt von 1 ms. Um saisonale Effekte mit zu berücksichtigen, werden mit diesem Simulationsmodell Jahressimulationen durchgeführt. Dabei werden für alle 365 Tage jeweils für den nächsten Tag die Fahrpläne erstellt. Anhand der dynamischen Modelle wird der jeweils ausgewählte Fahrplan nachgerechnet und überprüft, wie sich die Wärmepumpenanlage unter den realen Bedingungen verhält und inwieweit sie den Fahrplan erfüllen kann.

2.2.2 Simulationsmodell E2M2_DES

Nach der Vorstellung des REZ-Modells wird in diesem Abschnitt auf das Simulationsmodell des IER eingegangen. Zur Erzeugung des Fahrplans und damit zur Einsatzplanung der Wärmepumpe wird das gemischt ganzzahlige lineare Optimierungsmodell E2M2_DES verwendet, mit welchem verschiedene dezentrale Energiesysteme mit spezifischen Erzeuger- bzw. Speichertechnologien abgebildet werden können. Hierbei werden die dezentralen Energiesysteme durch elektrische und thermische Lastprofile als Verbraucher charakterisiert. Um diese elektrische und thermische Nachfrage zu decken, können verschiedene Erzeuger- und Speichertechnologien, beispielsweise PV-Anlagen, KWK-Anlagen, Batterie- oder Wärmespeicher, ausgewählt werden. Im Rahmen des hier vorliegenden Projekts ist eine Ausstattung des Energiesystems mit PV-Anlage, Wärmepumpe, Heizstab und Wärmespeicher gewählt worden. Neben dieser technischen Ausstattung werden im Modell die ökonomischen Rahmenbedingungen des lokalen Energiesystems und seiner Interaktion mit dem Gesamtenergiesystem berücksichtigt, beispielsweise durch den Strompreis oder die EEG-Einspeisevergütung.

Das Optimierungsmodell zielt nun auf die Minimierung der elektrischen und thermischen Energiekosten des lokalen Energiesystems. Hierzu werden durch Nebenbedingungen die Restriktionen der Optimierung aufgespannt. Diese Nebenbedingungen stellen so beispielsweise die Deckung der elektrischen oder thermischen

Last oder die Einhaltung der physikalischen Eigenschaften der technischen Komponenten sicher. Dieses Modell stellt hierbei eine Adaption des am IER zur Abbildung des europäischen Energiemarkts existierenden Modells E2M2 dar, welches in [2] beschrieben wird. Die Umsetzung von E2M2 erfolgt mit GAMS (General Algebraic Modeling System) des gleichnamigen Herstellers. Zur Erstellung des kostenoptimalen Fahrplans der Wärmepumpe wird dem Modell über einen festen Zeitraum (Betrachtungshorizont) die perfekte Information über die viertelstündlich aufgelösten Zeitreihen gegeben. Diese Informationen umfassen hierbei die zu deckende elektrische und thermische Last als auch die Erzeugung der PV-Anlage. Daneben hat der Optimierer im Betrachtungshorizont die Information über die vorherrschende Außentemperatur pro Zeitschritt und damit den Coefficient of Performance, also den Faktor, der beschreibt, wieviel thermische Leistung pro zugefügter elektrischer Last von der Wärmepumpe erzeugt wird. Weiterhin sind dem Optimierer die zeitschritt-spezifischen regulatorischen Bedingungen bekannt, wobei hier auf Haushaltsebene ein konstanter Strompreis sowie eine konstante Einspeisevergütung vorliegen. Mit diesen Informationen errechnet der Optimierer über einen festzulegenden Zeitraum (Entscheidungshorizont) den kostenoptimalen Einsatz der Entscheidungsvariablen, in diesem Fall die Leistung der Wärmepumpe.

Die Wärmepumpe ist gemischt-ganzzahlig modelliert, um so technologiespezifische Eigenschaften abzubilden. Diese umfassen zum einen die Berücksichtigung der unteren Leistungsgrenze P_{\min} , d.h. die minimale Leistung, die die Wärmepumpe bei einem Einsatz mindestens erbringen muss. Zum anderen fallen hierunter auch die Mindeststillstands- und Mindestbetriebsdauern der Wärmepumpe, die jedoch durch die zeitliche Auflösung des Modells von 15 Minuten nicht abgebildet werden können. Als Ergebnis der Optimierung wird also der kostenoptimale Einsatz der Wärmepumpe errechnet und als Zeitreihe mit einer Auflösung von 15 Minuten für das ganze Jahr ausgegeben. Neben diesen Entscheidungsvariablen bestimmt der Optimierer auch den Einsatz des Heizstabes und hiermit indirekt das Be- und Entladen des Wärmespeichers.

2.2.3 Modellinput/Szenariorahmen

Um die beiden vorgestellten Modelle vergleichen zu können, bedarf es gemeinsamen und vergleichbaren Rahmenbedingungen, welche an dieser Stelle beschrieben werden sollen. Diese Rahmenbedingungen stellen insbesondere die Eigenschaften der Liegenschaft sowie der technischen Ausstattung des PV-Wärmepumpen-Wärmespeichersystems dar.

Der in der Simulation betrachtete Haushalt weist pro Jahr einen elektrischen Verbrauch von 3.995 kWh (ohne den Strom zum Betrieb der Wärmepumpe) sowie einen thermischen Verbrauch von 12.012 kWh, davon 9.943 kWh Heizenergie und 2.069 kWh Wärme zur Brauchwarmwasserbereitung, auf. Die Erzeugungskurve der PV-Anlage stammt von einer Anlage mit einer installierten Leistung von etwa 550 kW_p. Für den Einsatz im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde die Erzeugungskurve auf eine Leistung von 6,8 kW_p herunterskaliert, was dem Mittelwert aller im Zeitraum von August 2017 bis Juli 2018 neu installierten PV-Anlagen unter 10 kW_p Leistung entspricht [4].

Ein Überblick über die wichtigsten Kenndaten des Energiesystems wird in der folgenden Tabelle 2-2 gegeben:

Tabelle 2-2: Kenndaten des verwendeten PV-Wärmepumpen-Wärmespeichersystems

Parameter	Eigenschaft	Wert	Einheit
PV-Anlage	El. Leistung	6,8	kW _p
	Standort	Stuttgart	
Luft-Wärmepumpe	El. Leistung	2,4 (A7/W35)	kW _{el}
	Th. Leistung	10,9 (A7/W35)	kW _{th}
	COP	4,5 (A7/W35)	
Heizstab	Elektrische Leistung	5	kW _{el}
Wärmespeicher	Th. Kapazität	63,5	kW _{th}
Außentemperatur	Min./Max. Wert	- 13 / 33	°C

2.2.4 Modellvergleich

Mittels der vorgestellten Eingangsdaten können nun die Ergebnisse der beiden Modelle miteinander verglichen werden. Beide Modelle weisen als Ergebnis einen Fahrplan für die Wärmepumpe sowie die Be- und Entladung des Wärmespeichers aus.

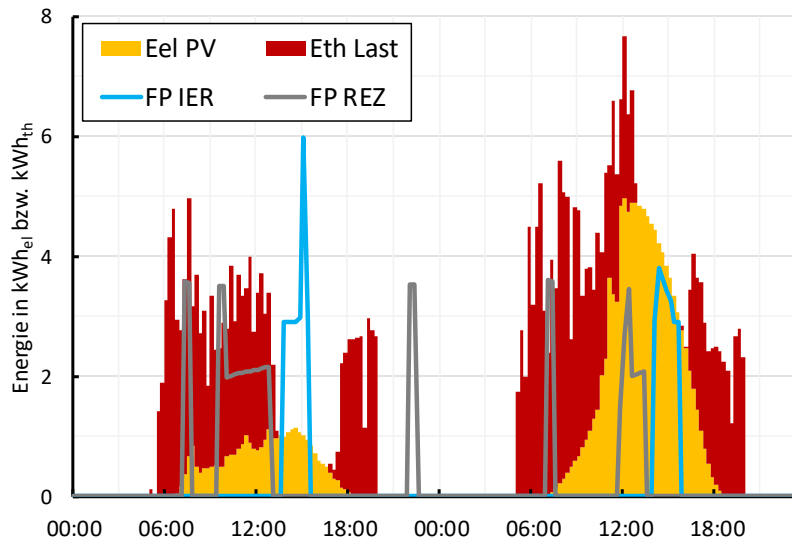


Abbildung 2-4: Fahrpläne der Wärmepumpe an zwei beispielhaften Übergangstagen

In Abbildung 2-4 werden die resultierenden Fahrpläne der Wärmepumpe aus beiden Modellen an zwei beispielhaften Übergangstagen im März dargestellt. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass beide Modelle den Einsatz der Wärmepumpe in die Zeit der PV-Stromerzeugung legen, allein bei der Heuristik ergibt sich daneben ein nächtlicher WP-Einsatz, weil die nach diesem Fahrplan erzeugte und gespeicherte Wärme nicht vollständig zur Versorgung des Gebäudes am Abend ausreicht.

In Abhängigkeit dieser Fahrplandifferenzen ergeben sich über das Jahr Unterschiede bzgl. des Stromverbrauchs und damit auch des Netzbezuges sowie der Netzeinspeisung des Haushalts sowie der Wärmeerzeugung der Wärmepumpe.

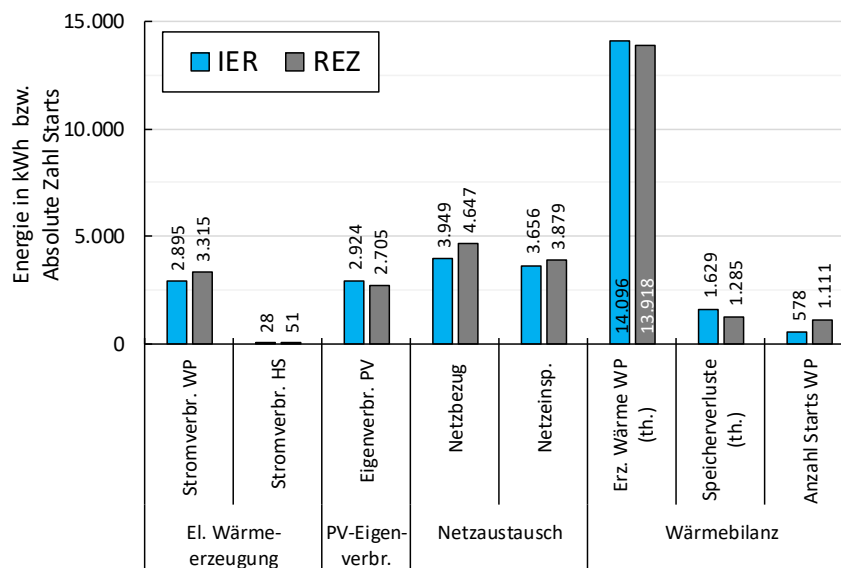


Abbildung 2-5: Übersicht über die jährliche energetische Bilanz der Liegenschaft

In Abbildung 2-5 wird ein Überblick über diese jährlichen Unterschiede gegeben, welche sich aus den unterschiedlichen Fahrweisen der Wärmepumpe und des Wärmespeichers nach den beiden Modellen ergeben.

Hier kann zunächst ein Mehrbedarf an elektrischem Strom von 420 kWh_{el} (12,66 %) zum Betrieb der Wärmepumpe durch die Heuristik (REZ-Modell) erkannt werden. Gleichzeitig setzt diese mit Blick auf die Maximierung des Eigenverbrauchs des PV-Stroms deutlich häufiger den Heizstab ein, wobei der absolute Stromverbrauch des Heizstabes nach beiden Modellen nahezu vernachlässigbar gering ist. Obwohl die Heuristik insgesamt einen höheren Stromverbrauch aufweist, erzeugt der Optimierer (IER-Modell) 178 kWh_{th} mehr Wärme. Hierdurch ergibt sich eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von 4,8 der Wärmepumpe im Fall des Optimierers und von 4,1 im Fall der Heuristik, was bedeutet, dass der Optimierer Zeiten mit höherer Temperatur und damit höherer Arbeitszahl zur Wärmeerzeugung bevorzugt. Mit Blick auf den Netzaustausch ergeben sich bei einer Eigenverbrauchsquote von 44,43 % (IER-Modell) zu 41,08 % (REZ-Modell) und einem Autarkiegrad von 42,29 % zu 36,80 % nur geringe Unterschiede. Bei der Anzahl der Wärmepumpenstarts weichen die Modelle dagegen mit einer Differenz von 533 Starts deutlich voneinander ab.

Mit Blick auf die Speicherverluste muss berücksichtigt werden, dass beide Modelle unterschiedliche Speichertechnologien verwenden. Während beim REZ das Gebäude als Speicher, unterstützt von einem Pufferspeicher, fungiert, kommt beim IER nur ein Wärmespeicher zum Einsatz, dessen Kapazität zur Gewährung der Vergleichbarkeit allerdings um die thermische Kapazität des Gebäudes erweitert wurde. Hierbei weisen die Speicherverluste jedoch realistische Wertebereiche auf.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass beide Modelle bei identischen Eingangsdaten Ergebnisse in ähnlicher Höhe aufweisen. Obwohl die Heuristik insgesamt eine geringere Komplexität bzgl. der Implementierung aufweist, weichen die Ergebnisse nur in geringem Maße von den Ergebnissen der Optimierung ab.

Im Rahmen eines Workshops am 14.01.2019 am IER ist dieser Modellvergleich den assoziierten Projektpartnern vorgestellt und mit ihnen diskutiert worden. Die Diskussion des Workshops fokussierte sich dabei insbesondere auf das veränderte Verhalten der Liegenschaft aufgrund des Wärmepumpeneinsatzes hinsichtlich seines Netzbezugsprofils und den Rückwirkungen auf das Verteilnetz sowie auf die Frage nach Anreizen und Signalen, um dieses Verhalten netzdienlich zu gestalten. Als ein in diesem Zusammenhang zentrales Ergebnis wurde vorgestellt, dass durch den Einsatz der Wärmepumpe in weniger als 25 Viertelstunden pro Jahr Netzbezugsspitzen mit einer Leistung von über 6 kW hervorgerufen werden. Um auch diese zu vermeiden, ist insbesondere die Einführung einer Leistungskomponente des Haushaltsstrompreises diskutiert worden.

3. Projektstatus

In AP4 wurde der an der Hochschule Reutlingen befindliche Wärmepumpen-Prüfstand erfolgreich um den geplanten Pufferspeicher mitsamt Messtechnik erweitert. Zusätzlich wurde am Prüfstand eine Hardware-in-the-loop Umgebung implementiert, um die Fahrpläne aus der Optimierung überprüfen zu können. Im Dezember 2018 und Januar 2019 wurden bereits erste 24-h Versuche erfolgreich am Prüfstand absolviert. Aufgrund von verlängerten Lieferzeiten von Komponenten für den Prüfstand und die Konfiguration und Anpassung des Prüfstands an den Betrieb mit Pufferspeicher verzögert sich Meilenstein 3 voraussichtlich von Oktober 2018 auf Februar 2019. Die Erfüllung des Meilensteins 3 ist jedoch sehr realistisch, da die ersten 24-h Versuche bereits gute Ergebnisse geliefert haben. Diese Verzögerung bei AP4 ist rein inhaltlich; finanziell bleibt das Projekt bezogen auf AP4 im vereinbarten und genehmigten Rahmen.

Zusätzlich wurde in AP6 der Vergleich der Simulationsmodelle von IER und REZ bearbeitet. Im Rahmen dieses Arbeitspakets sind unter Perfect-Foresight Jahressimulationen mit beiden Simulationsmodellen bei gleichen Eingangsdaten durchgeführt und die Ergebnisse anschließend verglichen worden. Zusätzlich wurden beide Modelle aufeinander abgestimmt und soweit wie möglich angepasst, sodass die Ergebnisse vergleichbarer werden. Es zeigt sich, dass die Resultate der beiden Modelle eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Die bilanziellen energetischen Kennzahlen wie Strombedarf und Wärmezeugung der Wärmepumpe weisen gute Übereinstimmungen auf. Ebenfalls funktioniert die Optimierung der Fahrpläne hinsichtlich PV-Eigenstromoptimierung. Meilenstein 4, der Vergleich der Steuerungsalgorithmen unter Perfect-Foresight, kann somit als erfolgreich erreicht angesehen werden. Als nächster Schritt ist eine Kombination der beiden Simulationsmodelle geplant: Der „optimale“ Fahrplan aus dem IER Modell soll in das REZ Modell eingespeist werden und auf die technische Umsetzbarkeit hin am Prüfstand untersucht zu werden.

Hinsichtlich des Mittelabrufs sind beide Projekte im genehmigten Rahmen; Abweichungen vom Projektplan, v.a. in AP 4, waren lediglich inhaltlicher Art.

4. Quellenverzeichnis

- [1] Solar-Institut-Jülich: CARNOT Blockset Version 1.0. Aachen. 1999.
- [2] N. Sun: Modellgestützte Untersuchung des Elektrizitätsmarktes. Universität Stuttgart. Stuttgart. 2013.
- [3] V. Quaschnig, Regenerative Energiesysteme, München: Carl Hanser Verlag, 2015.
- [4] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: EEG-Registerdaten und -Fördersätze. Bonn. 2018.
- [5] Bundesverband Wärmepumpe e.V.: SG Ready-Label. Abrufbar unter <https://www.waermepumpe.de/normen-technik/sg-ready/>, zuletzt abgerufen am 23.01.2019.