

Baden-Württemberg Programm Lebensgrundlage und ihre Sicherung (BWPLUS)

Intelligente dezentrale erneuerbare Wärme für Smart Grids in Baden-Württemberg –
Lastflexibilisierung zur Verteilnetzentlastung mit Wärmepumpen
(Heat4SmartGrid)

Zwischenbericht

Heat4SmartGrid_BW

Kumm, J.; Schulz, M.; Blesl, M.; Hufendiek, K.

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

Kemmler, T.; Thomas, B.

Reutlinger Energiezentrum (REZ), Hochschule Reutlingen

Berichtszeitraum: 01.04.2017 – 31.01.2017

Zuwendungsnummer: BWSGF17005

Die Arbeiten des Programms BWPLUS – Energiesystemanalyse werden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg gefördert.

Inhalt

Kurzfassung	3
Executive Summary	3
1. Zielsetzung und Arbeitsprogramm	4
2. Darstellung des Arbeitsstandes	4
2.1 Analyse des Wärmebedarfs und technischen Wärmepumpenpotenzials bis 2050 (AP 1)	4
2.2 Betriebsmodi für Wärmepumpen (AP 2)	6
2.2.1 Korrelationsfunktionen für Kennlinien von Wärmepumpen	6
2.2.2 Verfahren zur Bestimmung der Jahresarbeitszahlen und Stromlastgängen von Wärmepumpen	8
2.2.3 Technische Analyse von Wärmepumpe und Speicher	9
2.3 Prognosealgorithmen für lokalen Energiebedarf und PV-Erzeugung (AP 5)	10
2.3.1 Prognose des lokalen Strom- und Brauchwarmwasserbedarfs.....	11
2.3.2 Prognose der lokalen PV-Erzeugung und des Heizwärmebedarfs.....	13
3. Projektstatus.....	14

Kurzfassung

Im Projekt „Heat4SmartGrid“ soll untersucht werden, ob und wie mit Hilfe von Wärmepumpen der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung in Baden-Württemberg (BW) gesteigert werden und gleichzeitig das Verteilnetz durch eine intelligente Steuerung der Wärmepumpensysteme entlastet werden kann.

Hierzu ist im AP 1 für das Jahr 2050 ein Wärmebedarf in BW von 35 TWh errechnet worden, bei 40 TWh im Jahr 2030. Im Vergleich zum Jahr 2015 ergibt sich so ein Rückgang um 30 % zum Jahr 2030 und bis zum Jahr 2050 um 40 %. Weiterhin steigt auf Grund von energetischer Sanierung im Gebäudebestand das technische Potenzial für Wärmepumpen, ausgehend von 8 TWh im Jahr 2015, auf 20 TWh bis 2030 und auf 23 TWh bis 2040. Insgesamt könnten so 63 % aller Wohnanteile in BW durch Wärmepumpen mit thermischer Energie versorgt werden. Der Einsatz von Wärmepumpensystemen ist somit ein wichtiger Baustein für das Gelingen der Wärmewende.

Zur Steuerung der Wärmepumpen sind in AP 2 Betriebsmodi in Abhängigkeit von Anwendung und Gebäudetyp entwickelt worden. Diese werden mittels Korrelationsfunktionen für die Heizleistung für Luft-Wasser- und Sole-Wasser-Wärmepumpen bestimmt. Hierauf aufbauend sind für die in AP 1 ermittelten Gebäudetypen die erreichbare Jahresarbeitszahl der beiden Wärmepumpentechnologien ermittelt worden.

Zur intelligenten system- und netzdienlichen Steuerung dieser Wärmepumpensysteme werden Prognosen über die lokale Erzeugung und den lokalen Verbrauch benötigt, die in AP 5 erarbeitet werden. In Abhängigkeit der Prognoseanwendung sind sowohl univariate (elektrische Last und thermische Brauchwarmwasserlast) als auch multivariate Prognosemodelle (PV-Erzeugung und thermische Heizwarmwasserlast) implementiert worden.

Executive Summary

The "Heat4SmartGrid" project aims to investigate to what extent heat pumps can be used to increase the share of renewable energies in heat supply in Baden-Württemberg (BW) and how to simultaneously decongest the distribution grid by intelligently controlling the heat pump systems.

For this purpose, AP 1 calculated a heat demand in BW of 35 TWh for the year 2050 and 40 TWh in 2030, resulting in a decrease of 30% compared to the year 2015 by 2030 and 40% by the year 2050. Furthermore, the technical potential for heat pumps will increase from 8 TWh in 2015 to 2030 and 23 TWh by 2040 as a result of energy saving measures on existing buildings. From a technical point of view 63% of all residential units in BW could thus be supplied with thermal energy by heat pumps. The use of heat pump systems is therefore an important component for the success of the heat transition.

For the control of the heat pumps in AP 2 operating modes of the heat pumps depending on application and building type have been developed. These are determined by correlation functions for the heating capacity for air-water and brine-water heat pumps. Based on this, the achievable coefficient of performance of the two heat pump technologies was determined for the building types determined in AP 1.

For intelligent system and grid-based control of these heat pump systems, forecasts of local generation and consumption are required, which are developed in AP 5. Depending on the forecasting application, both univariate (electrical load and thermal domestic hot water load) and multivariate forecasting models (PV-generation and thermal hot water load) have been implemented.

1. Zielsetzung und Arbeitsprogramm

Um dem Klimawandel entgegenzutreten soll in Baden-Württemberg (BW) mit dem Ziel „50-80-90“ bis zum Jahr 2050 der Energiebedarf um 50 % reduziert, die Energieversorgung zu 80 % durch erneuerbare Energien erfolgen und die Treibhausgasemissionen um 90 % reduziert werden.

Um diese Ziele zu erreichen, ist es notwendig, dass auch die Gebäudewärmeversorgung, die in BW für knapp 30 % der CO₂-Emissionen verantwortlich ist, konsequent umgebaut wird. Ein zentraler Schlüssel kann hierbei der flächendeckende Einsatz von elektrischen Wärmepumpen darstellen. 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. Das vorliegende Projekt „Heat4SmartGrid“ adressiert diese beiden Herausforderungen und untersucht, wie mithilfe von intelligent gesteuerten Wärmepumpen der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung in Baden-Württemberg gesteigert und zudem das Verteilnetz entlastet werden kann.

Hierfür werden nach einer Analyse des aktuellen und zukünftigen Wärmebedarfs in BW (AP 1) geeignete Wärmepumpen-Betriebsmodi entwickelt (AP 2). Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der technischen Analyse von Wärmepumpensystemen (AP 3) mithilfe eines Prüfstandes (AP 4) und der Entwicklung von stochastischen Steuerungen für den optimierten Betrieb der Wärmepumpen (AP 6). Diese basieren auf Prognosen der lokalen Last und der lokalen PV-Erzeugung (AP 5). Ausgehend von diesen APs soll eine kostenoptimale zukünftige Energieversorgungsstruktur berechnet und zudem abgeschätzt werden, in welchem Umfang Wärmepumpensysteme zukünftig in BW zur Senkung der CO₂-Emissionen, zur Flexibilisierung der Stromnachfrage und damit zur Entlastung des Verteilnetzes beitragen können (AP 7). Abschließend sollen aus den gewonnenen Erkenntnissen Handlungsempfehlungen abgeleitet (AP 8) werden.

Im vorliegenden Bericht werden die Fortschritte aus AP 1, AP 2, AP3 und AP 5 des Jahres 2017 beschrieben.

2. Darstellung des Arbeitsstandes

2.1 Analyse des Wärmebedarfs und technischen Wärmepumpenpotenzials bis 2050 (AP 1)

Blesl, M.

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

Als Ausgangsbasis für die Fortschreibung des zukünftigen Wärmebedarfs der Wohngebäude und zur Bestimmung des technischen Wärmepotenzials in Baden-Württemberg wurde der digitale Wärmealas verwendet, der mittels der modifizierten Siedlungstypenmethode erstellt wurde. Dieser enthält für die 11.353 Gemeinden und gemeindefreien Gebiete in Deutschland, Daten zu deren demographischen Kenngrößen (Einwohnerzahl /Beschäftigte je Gemeinde und Entwicklung), dem Gebäudebestand (unterteilt nach Wohngebäudetypen (Größe/Baualter), Nichtwohngebäude (Nutzung/Baualter), Siedlungsfläche und deren Aufteilung nach Siedlungstypen.

Mit dieser Datenbasis als Grundlage wird die Entwicklung des Wärmebedarfs der Haushalte fortgeschrieben. Hierbei werden zum einen die durch die Energieeinsparverordnung (ENEV) bzw. deren Fortschreibung zu erwartenden steigenden Anforderungen an die maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Bauteile berücksichtigt. Zum anderen wird berücksichtigt, dass eine energetische Sanierungsmaßnahme in der Regel nur im Sanierungszyklus stattfindet, d.h. die energetischen Sanierungsmaßnahmen am Gebäudebestand werden in Abhängigkeit des Baualters des Gebäudes bzw. des Zeitpunktes der letzten Instandsetzung an der Gebäudehülle durchgeführt. Entsprechend wird ein Austausch von Fenstern alle 30 Jahre, die Instandsetzung der Fassade alle 40 Jahre, eine Erneuerung von Dächern bzw. Dachflächen alle 50 Jahre angenommen. Da die Dämmung von Kellerdecken eine Sanierungsmaßnahme ist, die rein unter energetischen Gesichtspunkten durchgeführt wird, wird unterstellt, dass diese erst ab einem Mindestmaß an durchgeführten energetischen Sanierungsmaßnahmen des Gebäudes erfolgt. Im Weiteren wird teilweise ein Einbau einer kontrollierten Lüftung angenommen, die zum einen die energetische Luftwechselrate reduziert und zum anderen einer Schimmelbildung durch zu hoher Feuchte in den Gebäuden vorbeugt. Für Neubauten wird bis zum Jahr 2020 die geltende ENEV als begrenzendes Maß des spezifischen Wärmebedarfs unterstellt, die danach durch einen quasi Niedrigstenergiehausstandard von 15 kWh/m² ersetzt wird.

Der Wärmebedarf für Raumwärme und Brauchwarmwasser der Wohngebäude in Baden-Württemberg ist in **Abbildung 2-1** dargestellt und betrug im Jahr 2015 rund 58 TWh. Neben der energetischen Gebäudesanierung tragen bis zum Jahr 2050 der Anstieg der Einwohnerzahl, die steigende spezifische Wohnflächennachfrage der Bevölkerung, sowie die Abrisse und Neubauten im Gebäudebestand zu einer Veränderung des Wärmebedarfs bei. Als Folge ist insgesamt von einem Rückgang des Wärmebedarfs auszugehen. Während im Jahr 2030 noch ein Wärmebedarf von 40 TWh zu erwarten ist, beträgt der Wärmebedarf für das Jahr 2050 unter den getroffenen Annahmen 35 TWh. Dies entspricht einem Rückgang gegenüber 2015 für das Jahr 2030 von 30 % und für das Jahr 2050 von 40 %.

In Abhängigkeit des Baualters der Gebäude wurden verschiedenartige Wärmeverteilungssysteme samt Heizkörpertyp (Radiatoren, Plattenheizkörper, Flächenheizkörper u.a.) mit unterschiedlichen Heizwassertemperaturen definiert, dimensioniert und im Modell in die entsprechenden Gebäude installiert. Die Größe der Heizkörper orientiert sich dabei an der Heizlast (nach DIN EN 12831) der jeweiligen Räume eines Gebäudetyps. Hierbei wird die Fläche des Heizkörpers in etwa 1,3-fach größer gewählt als die berechnete Heizlast des jeweiligen Raumes es erfordert. Wird ein Bestandsgebäude energetisch saniert, so bleiben in der Regel die ursprünglichen Heizkörper bestehen. Da die notwendige Heizlast der jeweiligen Räume eines Gebäudes infolge der energetischen Sanierung abnimmt, entsteht bei unveränderter Heizwassertemperatur eine Überdimensionierung der Größe der Heizflächen. Infolge dessen kann die ursprüngliche Heizwassertemperatur gesenkt werden, um die angepasste, notwendige Heizlast zu gewährleisten.

Das technische Potenzial der Wärmepumpe in den Wohngebäuden wird stark von der Vorlauftemperatur des Heizungssystems beeinflusst, die für den effizienten Betrieb von Wärmepumpen nicht über 55°C liegen sollte. Dies kann im Fall von Heizungssystemen mit Fußbodenheizungen von allen Gebäudetypen erreicht werden. Im Fall von Gebäuden mit durchgeführten energetischen Sanierungsmaßnahmen werden umgerechnet auf den spezifischen Raumwärmebedarf alle Einfamilienhäuser mit einem geringeren Raumwärmebedarf als ca. 70 kWh/m² bzw. im Fall von Mehrfamilienhäusern als ca. 50 kWh/m² als geeignet angesehen. Für die weitere Betrachtung wurden die geeigneten Gebäude eines Gebäudetyps zusammengefasst und in einem Durchschnittsgebäudetyp abgebildet. Eine exemplarische Zusammenstellung der charakteristischen Werte für den Gebäudetyp „EFH vor 1979“ mit technischem Wärmepumpenpotenzial ist in **Tabelle 2-1** zusammengefasst.

Tabelle 2-1: Charakterisierung des durchschnittlichen Gebäudetyps „EFH vor 1979“ mit technischem Potenzial zur Wärmebereitstellung mit Wärmepumpe

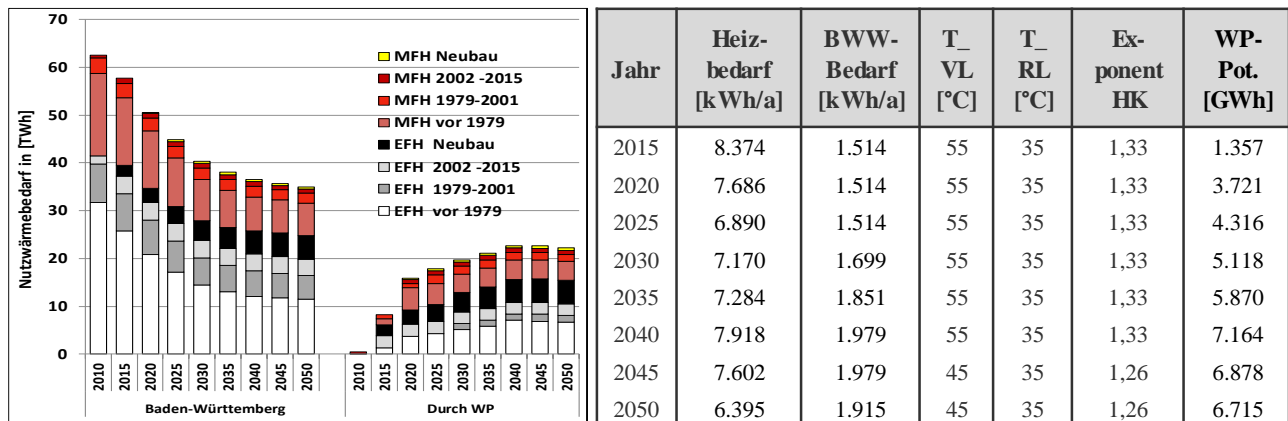


Abbildung 2-1: Entwicklung des Nutzwärmebedarfs der Haushalte und technisches Potenzial zur Deckung mit Wärmepumpen in Baden-Württemberg

Das heutige technische Potential der Wärmepumpen beträgt rund 8 TWh (ca. 14 % aller Wohneinheiten) und steigt bis zum Jahr 2030 auf rund 20 TWh an. Der Anstieg bis zum Jahr 2040 auf 23 TWh fällt bereits gering aus, da die energetischen Sanierungsmaßnahmen auch weiterhin an geeigneten Gebäuden durchgeführt werden können. Wird kein weiterer technischer Fortschritt bei den Wärmepumpen unterstellt, d.h. keine höheren Heiztemperaturen bei gleicher Effizienz, könnten aus technischer Sicht im Jahr 63 % aller Wohneinheiten in Baden-Württemberg mittels WP beheizt werden.

2.2 Betriebsmodi für Wärmepumpen (AP 2)

Kemmler, T.

Reutlinger Energiezentrum (REZ), Hochschule Reutlingen

2.2.1 Korrelationsfunktionen für Kennlinien von Wärmepumpen

Mit Hilfe von Korrelationsfunktionen sollen die Charakteristika der verschiedenen auf dem Markt erhältlichen Wärmepumpen (WP) zusammenfassend abgebildet werden. Hierfür werden für drei charakteristische Kennwerte – die thermische Leistung, die elektrische Leistung und den Coefficient of Performance (COP) – Kennlinien in Abhängigkeit der Quellen- und Vorlauftemperaturen ermittelt. Im Folgenden wird das Vorgehen erläutert.

2.2.1.1 Vorgehensweise

Die Grundlage für die Korrelationsgleichungen ist die Zusammenstellung einer Wärmepumpendatenbank. Die Basis hierfür bildet die Liste „Wärmepumpen mit Prüfnachweis eines unabhängigen Prüfinstituts“ des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (Stand April 2017). In dieser Liste sind alle förderfähigen Wärmepumpen aufgelistet und in Luft-Wasser- (LWP) und Sole-Wasser-Wärmepumpen (SWP) sowie Wasser-Wasser-Wärmepumpen aufgeteilt. Zudem sind gasbetriebene WP aufgeführt. Da sich das Projekt vornehmlich auf SWP und LWP fokussiert, sind die Korrelationsfunktionen nur für diese beiden WP-Typen erstellt worden. Anschließend erfolgt die Kategorisierung der WP in Leistungsklassen. Um das Verhalten der WP genau abbilden zu können, werden die WP in verschiedene (Heiz-)Leistungsklassen kategorisiert, und für jede Leistungsklasse werden eigene Korrelationsfunktionen erstellt. Heizleistungen zwischen 5 und 18 kW repräsentieren Anlagen in Einfamilienhäusern (EFH) und Anlagen mit einer Heizleistung zwischen 18 und 35 kW werden in Mehrfamilienhäusern (MFH) eingesetzt. Anlagen zwischen 35 und 80 kW werden im gewerblichen Bereich verwendet und Anlagen größer 80 kW stellen Sonderlösungen dar. Nach der Kategorisierung folgt die Datenrecherche und Datenaufbereitung. Damit die Kennwerte der Wärmepumpen über einen breiten Quelltemperaturbereich (Luft-, Soletemperatur im Boden) abgebildet werden können, fokussiert sich die Recherche auf Datenblätter, in denen Leistungskurven der WP über einen breiten Quelltemperaturbereich abgebildet sind. Die Recherche hat 25 Datenblätter für LWP und 40 Datenblätter für SWP hervorgebracht – die meisten Datenblätter mit Leistungskurven sind in der Leistungsklasse von 5-18 kW vorhanden. Die Leistungskurven werden anschließend in Excel übertragen und aufbereitet. Mittels multipler linearer Regression werden die Korrelationsfunktionen in MATLAB aus dem Excel-Datensatz erstellt. Sowohl für die SWP als auch die LWP sind die Korrelationsgleichungen für einen Quelltemperaturbereich zwischen -5 und 25°C erstellt worden. Zwar können auch Lufttemperaturen auftreten, die niedriger als -5°C sind, jedoch ist dies nur in wenigen Stunden des Jahres der Fall. Die Kennwerte für diese Temperaturbereiche können durch Extrapolation, unter Einbußen der Genauigkeit, trotzdem berechnet werden. Wichtig ist jedoch, dass die Korrelationsgleichungen im angegebenen Temperaturbereich zwischen -5 und 25°C möglichst genau sind, da diese Temperaturen über das Jahr verteilt am häufigsten auftreten. Für die SWP ergeben sich acht Korrelationsfunktionen, jeweils für die thermische und die elektrische Leistung in den vier Leistungsklassen. Da SWP eine annähernd lineare Kennlinie besitzen (vgl. Abbildung 2-2), werden die Korrelationsfunktionen ebenfalls linear angesetzt:

$$\dot{Q}_{th} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Sole} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Sole}) \cdot \dot{Q}_{thNenn} \text{ mit } \dot{Q}_{thNenn} \text{ bei } B0/W35$$

Um die Abtaucharakteristika von LWP im Temperaturbereich zwischen -5 und 10°C besser abbilden zu können, sind die LWP abschnittsweise korreliert. Der erste Bereich umfasst Lufttemperaturen zwischen -5 und 6°C, der zweite Bereich Temperaturen zwischen 7-10°C und der dritte Bereich Temperaturen von 11-25°C. Zudem werden teilweise polynomische Funktionen 2. und 3. Grades verwendet, um die Nicht-Linearität der LWP-Kennlinien besser abzubilden:

$$\dot{Q}_{th} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Luft} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Luft} + e \cdot T_{Luft}^2) \cdot \dot{Q}_{thNenn} \text{ mit } \dot{Q}_{thNenn} \text{ bei } A2/W35$$

Es ergeben sich insgesamt 18 Korrelationsfunktionen: Zwei für die elektrische und thermische Leistung mit jeweils drei Temperaturbereichen und dies in den drei Leistungsklassen von 5 bis 80 kW. Für die Leistungsklasse größer 80 kW sind keine Datenblätter mit Leistungskurven für LWP gefunden worden und somit konnten auch keine Korrelationsgleichungen für diese Klasse erstellt werden.

2.2.1.2 Ergebnisse

Wie zuvor erwähnt, weisen Sole-Wasser-Wärmepumpen ein lineares Verhalten der Kennwerte über der Quelltemperatur auf. Aufgrund dessen kann das Verhalten der WP gut mit den Korrelationsgleichungen abgebildet werden. Vor allem in den niedrigeren Leistungsklassen, bei denen viele Datenblätter für die Auswertung zur Verfügung stehen und die multiple lineare Regression somit eine gute Datengrundlage hat, bilden die Korrelationsfunktionen die Realität gut ab wie das linke Diagramm in **Abbildung 2-2** zeigt.

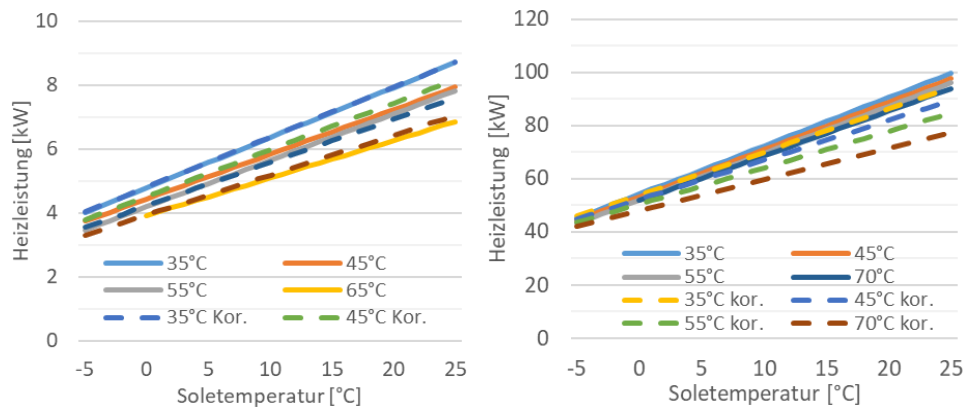


Abbildung 2-2: Gutes Ergebnis (links) und schlechtes Ergebnis (rechts) für die Korrelationsfunktionen bei SWP

Die durchgezogenen Linien stellen die Datenblattwerte dar, die gestrichelten Linien die korrelierten Werte. Man erkennt links, dass die korrelierten Werte fast deckungsgleich mit den Datenblattwerten sind. Bei den höheren Leistungsklassen bilden die Korrelationsfunktionen die Realität jedoch schlechter ab, wie in dem Diagramm rechts zu erkennen ist. Dies ist auf den Mangel vorhandener Daten zurückzuführen. Je weniger Daten verfügbar sind, desto mehr verlieren die Korrelationsgleichungen an Genauigkeit. Bildet man den Mittelwert aus den Abweichungen zwischen Datenblatt- und korrelierten Werten, so liegt die Abweichung bei den SWP bei 4,5 %. Insgesamt betrachtet bilden die Korrelationsgleichungen die Charakteristika der SWP gut ab und können für weitere Untersuchungen in diesem Projekt verwendet werden. Luft-Wasser-Wärmepumpen müssen im Temperaturbereich zwischen -5 und 10°C die sich durch gefrorene feuchte Luft bildende Eisschicht auf den Wärmetauschern abtauen. Aufgrund dessen senken sich in diesem Temperaturbereich die Kennlinien ab, was durch die Korrelationsgleichungen abgebildet werden muss. **Abbildung 2-3** zeigt auf der linken Seite ein gutes Ergebnis für die Korrelationsgleichungen der LWP, auf der rechten Seite ein schlechtes.

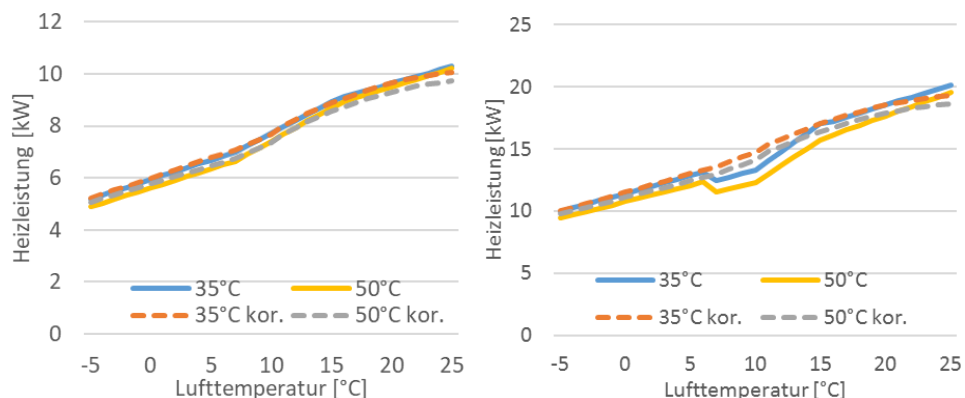


Abbildung 2-3: Gutes Ergebnis (links) und schlechtes Ergebnis (rechts) der Korrelationsgleichungen bei LWP

Links ist zu erkennen, dass die Korrelationsgleichungen den Abtaubereich sowie die Kennlinie der LWP gut abbilden. Lediglich im Temperaturbereich ab 20°C weicht die Korrelationsfunktion von den Datenblattwerten ab; jedoch wird in diesem Temperaturbereich ohnehin nicht geheizt, und die WP wird lediglich für die gelegentliche BWW-Erzeugung verwendet. Rechts ist ein Diagramm dargestellt, bei dem die Korrelationsfunktionen die Datenblattwerte nicht oder nur teilweise realitätsnah abbilden. Wie zu sehen ist, ist bei dieser WP die „Beule“ in der Kennlinie stärker ausgeprägt und die Korrelationsgleichung kann diese nur schwer abbilden. Im Temperaturbereich darüber und darunter bilden die korrelierten Werte die Realität gut ab. Die Schwierigkeit bei den LWP ist, dass die „Beule“ in den Kennlinien von

WP zu WP sehr unterschiedlich ausfällt und sich das Phänomen durch die Bildung der Korrelationsgleichungen „herausmittelt“. Bildet man auch bei den LWP die mittlere Abweichung zwischen Datenblatt- und Korrelationswerten, beträgt die Abweichung 4,4 %. Gesamt betrachtet können die LWP jedoch überwiegend gut mit den Korrelationsgleichungen abgebildet werden. Mit Hilfe der Korrelationsgleichungen können nun die Charakteristika von Wärmepumpen verschiedener Leistungsklassen abgebildet und für weitere Arbeitspakete (AP) verwendet werden.

2.2.2 Verfahren zur Bestimmung der Jahresarbeitszahlen und Stromlastgängen von Wärmepumpen

Um eine Aussage über die Effektivität einer Wärmepumpe in Gebäuden treffen zu können, wird oftmals die Jahresarbeitszahl (JAZ) herangezogen. Sie setzt die jährlich erzeugte thermische Energie der Wärmepumpe ins Verhältnis zum dafür jährlich eingesetzten Strom. Im Projekt wird die JAZ verwendet, um die Wärmepumpensysteme in den verschiedenen Referenzgebäuden zu bewerten. Zum Bestimmen der JAZ und der Lastgänge von WP ist ein Simulationstool in Excel entwickelt worden, welches im Folgenden erläutert wird.

2.2.2.1 Vorgehensweise

Die Simulation in Excel wird in stündlicher Auflösung über ein Jahr durchgeführt. Die Verbrauchsprofile der untersuchten Referenzgebäude werden mit Hilfe von Standardlastprofilen (SLP) abgebildet. Das Wärmebedarfsprofil der einzelnen Referenzgebäude wird nach dem Ansatz des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) aus dem Leitfaden „Abwicklung von Standardlastprofilen Gas“ abgebildet. Das Brauchwarmwasserprofil ist an die VDI-Richtlinie 4655 angelehnt, und das Stromlastprofil orientiert sich an den Strom-SLP des BDEW. Um die Vorlauftemperaturen zu bestimmen, werden die Heizkurven der Referenzgebäude verwendet, welche in Abhängigkeit der Außentemperatur die nötige Vorlauftemperatur zum Abdecken der Heizlast wiedergeben. Zusätzlich werden im Zuge der Nachtabsenkung zwischen 22:00 und 06:00 Uhr die Vorlauftemperaturen reduziert.

Mit Hilfe der SLP und der Heizkurven können nun, unter Verwendung der Außentemperaturwerte, die km²-scharf vom Deutschen Wetterdienst (DWD) verfügbar sind, die benötigten Vorlauf- und Wärmequellentemperaturen bestimmt werden. Damit errechnet sich mit Hilfe der Korrelationsgleichungen der COP, aus dem letztendlich die zur Bereitstellung der Heiz- und Trinkwarmwasserwärme benötigte elektrische Energie zu jeder Stunde des Jahres abgeleitet wird. Die folgende **Tabelle 2-2** stellt einen Auszug aus dem Simulationstool dar.

Tabelle 2-2: Auszug aus dem Simulationstool für die Bestimmung der JAZ von WP

Zeitstempel	Außen- temperatur [°C]	Sole- temperatur [°C]	Heizarbeit SLP [kWh]	BWW- Last [kWh]	T_VL Heiz [°C]	T_VL BWW [°C]	COP Heiz [-]	COP BWW [-]	W_el Heiz [kWh]	W_el BWW [kWh]
01.01.2015 01:00	0,6	-0,27	1,303	0,065	34,8	60,0	4,57	2,37	0,29	0,03
01.01.2015 02:00	-0,6	-0,44	1,333	0,065	36,3	60,0	4,42	2,36	0,30	0,03
01.01.2015 03:00	-1,4	-0,54	1,392	0,000	37,2	0,0	4,33	-	0,32	0,00
01.01.2015 04:00	-1,5	-0,55	1,535	0,000	37,3	0,0	4,31	-	0,36	0,00
01.01.2015 05:00	-1,5	-0,55	1,886	0,195	37,3	60,0	4,31	2,35	0,44	0,08

Die Simulation wird für jedes Referenzgebäude für SWP und LWP durchgeführt. Hierdurch erhält man den elektrischen Lastgang der Wärmepumpe sowohl für das Heizen als auch für die Brauchwarmwassererzeugung. Die JAZ berechnet sich letztendlich aus der Summe des Heiz- und BWW-Bedarfs dividiert durch die Summe der benötigten elektrischen Leistungen für Heizung und BWW-Bereitung.

2.2.2.2 Ergebnisse der Betriebsmodientwicklung

In der nachfolgenden Tabelle sind die Referenzgebäude mit dem entsprechenden Wärmepumpensystem und der mit dem Simulationstool erreichten JAZ aufgeführt. Die **Tabelle 2-3** zeigt, dass die Wärmepumpen in den Referenzgebäuden überwiegend gute Ergebnisse erzielen. Teils nimmt die JAZ zwischen 2025 und 2045 ab, was durch das Verhältnis von Heizwärmebedarf zu BWW-Bedarf erklärt werden kann: Der Heizbedarf sinkt durch immer besser werdende Sanierung, während der BWW-Bedarf annähernd konstant bleibt. Um den BWW-Bedarf zu bedienen, muss die WP mit höheren Vorlauftemperaturen arbeiten was sich negativ auf die JAZ auswirkt.

Tabelle 2-3: Ergebnisse der Excelsimulation zur Bestimmung der JAZ

	EFH				MFH			
	Leistung Wärmepumpe zw. 5-18 kW				Leistung Wärmepumpe zw. 18-35 kW			
	Vor 1979	1979-2001	2002-2015	Neubau	Vor 1979	1979-2001	2002-2015	Neubau
	SWP LWP	SWP LWP	SWP LWP	SWP LWP	SWP LWP	SWP LWP	SWP LWP	SWP LWP
2015	4,4 3,6		4,4 3,6	5,2 4,2	4,1 3,5	4,1 3,5		
2020	4,4 3,6		4,4 3,6	5,1 4,1	4,1 3,5	4,1 3,5	4,1 3,5	4,1 3,6
2025	4,3 3,5		4,4 3,6	5,0 4,0	4,0 3,5	4,1 3,5	4,1 3,5	4,0 3,5
2030	4,3 3,5	4,4 3,6	4,4 3,6	4,9 4,0	4,0 3,4	4,0 3,5	4,1 3,5	3,9 3,5
2035	4,2 3,5	4,4 3,6	4,4 3,6	4,8 4,0	4,2 3,6	4,3 3,7	4,1 3,5	3,8 3,4
2040	4,2 3,5	4,4 3,6	4,9 4,0	4,8 3,9	4,1 3,6	4,3 3,7	4,1 3,5	3,7 3,4
2045	4,6 3,8	4,4 3,6	4,9 4,0	4,8 3,9	4,1 3,6	4,3 3,7	4,0 3,5	3,7 3,4
2050	4,5 3,7	4,3 3,6	4,9 4,0	4,7 3,9	4,1 3,6	4,3 3,7	4,0 3,5	3,7 3,4

In den Jahren 2045 und 2050 steigt die JAZ teils wieder an: Dies liegt an den erreichbaren Vorlauftemperaturen, die durch weitere Sanierungen verringert werden können und somit die JAZ verbessern.

2.2.3 Technische Analyse von Wärmepumpe und Speicher

Der Beginn dieses Arbeitspakets war erst zum letzten Quartal des ersten Jahres geplant. Aufgrund fehlender Daten aus AP1 für die Bearbeitung von AP2 sind die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket vorgezogen worden.

Zur technischen Analyse wird in MATLAB-Simulink eine Simulationsumgebung für Wärmepumpensysteme in Verbindung mit thermischen und elektrischen Speichern geschaffen, die den Betrieb unter verschiedenen Zielgrößen und variablen Randbedingungen simulieren und optimieren soll. Ein Grundmodell existierte bereits aus einem Vorprojekt¹ und es wurde als Grundlage verwendet und für Wärmepumpensysteme angepasst und weiterentwickelt.

2.2.3.1 Simulationsmodell Simulink

Die nachfolgende Abbildung 2-4 zeigt das Schema des Simulationsmodells. Das Modell besteht aus vier Hauptkomponenten: **Vorhersage, Optimierung, Interne Steuerung** und **dynamische Modelle** wie Wärmepumpe, Haus und Photovoltaikanlage.

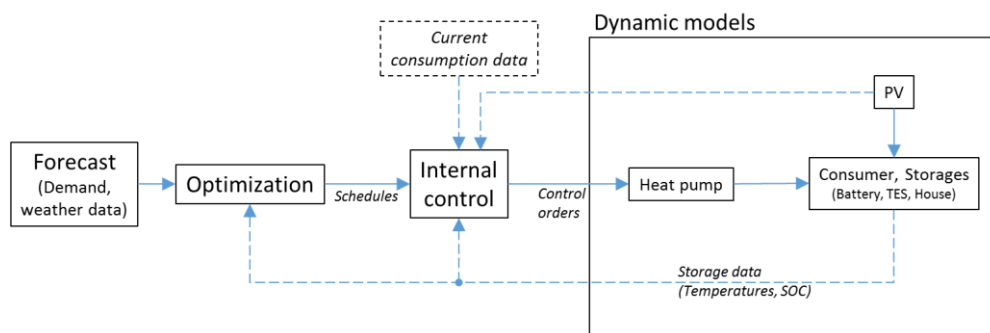


Abbildung 2-4: Schema des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell ist in Simulink aufgebaut und wird für Jahressimulationen verwendet, um auch saisonale Effekte berücksichtigen zu können. Die Vorhersage und Optimierung sind MATLAB-Funktionen, die in die Simulink-Umgebung eingebettet sind. Optimiert wird mit Hilfe eines heuristischen Verfahrens, dem Monte-Carlo-Verfahren. Hierbei werden unter bestimmten Randbedingungen zufallsbasiert eine große Anzahl an Fahrplänen erzeugt. Von diesen Fahrplänen wird jeweils der Fahrplan ausgewählt, der die ausgewählte Zielfunktion (z.B. PV-Eigenstromnutzung) am besten bedient. Dieser Fahrplan wird anschließend in die interne Steuerung der Wärmepumpe-

¹ Lödige, D., Thomas, B., Widmann, C.: Stromoptimierter Betrieb von KWK-Anlagen durch intelligentes Wärmespeichermanagement. Abschlussbericht zu BW-Plus-Projekt BWE 13002. 2016

pe – modelliert in der Stateflow-Umgebung von MATLAB – eingespeist. Die interne Steuerung wiederum sendet die Steuerbefehle an die Wärmepumpe, um die Raumtemperatur des betrachteten Hauses in einem bestimmten Bereich zu halten oder um den Brauchwarmwasserbedarf zu bedienen. Zusätzlich versorgt eine PV-Anlage die Wärmepumpe und den Verbraucher mit Strom. Falls der Ertrag der PV-Anlage zu niedrig ist, kann Strom aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen werden.

2.2.3.2 Ergebnisse erster Simulationen und Veröffentlichung

Im Rahmen einer eingereichten Veröffentlichung, die sich zurzeit im Review-Prozess befindet, wird die Anwendung des Simulationsmodells vorgestellt und am Beispiel eines Einfamilienhauses die Betriebsoptimierung eines Systems mit Wärmepumpe und PV-Anlage simuliert. Zusätzlich wird untersucht, in wie fern die Masse des Fußbodens als thermischer Speicher fungieren kann, um den Einsatz eines Heizungspufferspeichers zu vermeiden. Die untersuchte Zielgröße ist der Autarkiegrad des Gebäudes, d.h., inwieweit eine PV-Anlage in Verbindung mit einer WP sowohl den Heiz- als auch den Strombedarf eines EFH abdecken kann und wie viel Strom zusätzlich noch aus dem öffentlichen Netz bezogen werden muss. Im Rahmen der Simulationen werden 64 verschiedene Parameterstudien durchgeführt: Zum einen werden SWP und LWP untersucht, zum anderen variiert die Leistung der PV-Anlage zwischen 4, 6, 8 und 10 kW sowie die Raumtemperaturamplitude (RTA) zwischen $\pm 0,5$, ± 1 , $\pm 1,5$ und ± 2 K bei einer mittleren Raumtemperatur von 21°C . Zudem wird das System einmal mit und einmal ohne Batterie simuliert.

Die Simulationen zeigen, dass in einem System mit SWP bei einer RTA von $\pm 0,5$ K und 4 kW PV-Leistung der maximale Autarkiegrad ohne Batterie bei etwa 22 % liegt. Bei maximaler RTA von ± 2 K und maximaler PV-Leistung von 10 kW erhöht sich der Autarkiegrad auf knapp 35 %. Entsprechend fällt bei der LWP der Autarkiegrad durch den höheren Stromverbrauch etwas geringer aus: 20 % bei minimaler PV-Leistung und minimaler RTA und etwa 32 % bei maximaler PV-Leistung und maximaler RTA. Durch die Verwendung einer Batterie kann der Autarkiegrad der SWP auf etwas über 50 % bei einer PV-Leistung von 8 kW und RTA von ± 2 K erhöht werden; bei der LWP auf etwa 47 %.

Es zeigt sich, dass trotz Verwendung einer Batterie und des Fußbodens als thermischer Speicher noch immer knapp die Hälfte des Strombedarfs aus dem öffentlichen Netz bezogen werden muss. Ursache dafür ist der saisonale Gegensatz zwischen maximaler PV-Stromerzeugung im Sommer und maximalen Heizwärmebedarf im Winter. Wird ein höherer Anteil von regenerativ erzeugtem Strom zur Gebäudebeheizung mit Wärmepumpen angestrebt, so muss Strom aus anderen regenerativen Quellen wie Wind und Biomasse erzeugt werden, die auch oder gerade im Winter zur Verfügung stehen.

2.3 Prognosealgorithmen für lokalen Energiebedarf und PV-Erzeugung (AP 5)

Schulz, M.; Kumm, J.

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

Als Basis für die Steuerung des lokalen Systems aus PV-Anlage, Wärmepumpe und Wärmespeicher (**System**) in AP 6 werden in diesem AP Prognoseverfahren entwickelt und implementiert, mit denen PV-Stromerzeugung (**Erzeugung_{el}**), Strombedarf (**Last_{el}**) und Wärmebedarf (**Last_{th}**), unterteilbar in Brauchwarmwasser (**Last_{th,BWW}**) und Heizwarmwasser (**Last_{th,HWW}**), prognostiziert werden. Es wird hierbei auf grundsätzlich bekannte Methoden aus der Literatur zurückgegriffen, die jedoch so ausgewählt, neu kombiniert und adaptiert werden, dass sie für die geforderten Spezifikationen der Prognose hinsichtlich Aggregationsebene (Gebäudeebene), Prognosehorizont (rollierende Kurzfristprognose 1-3 Tage) und Prognoseauflösung (mind. 15-minütig) geeignet sind und zudem Möglichkeiten der Selbstadaptivität und probabilistischen Betrachtung bieten. Die verschiedenen Prognoseanwendungen (Erzeugung_{el}, Last_{el}, Last_{th}, Last_{th,BWW}, Last_{th,HWW}) weisen zudem unterschiedliche Charakteristika hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von externen Faktoren (z.B. Wetter) auf, so dass hierfür jeweils unterschiedliche Ansätze entwickelt werden. Je nach Anwendung werden sowohl univariate Methoden – d.h. nur auf historischen Ausprägungen der zu prognostizierenden Zeitreihe basierende Verfahren – als auch multivariate Methoden, die externe Faktoren nutzen, betrachtet; zudem werden regressive Methoden, White- und Black-Box-Modelle miteinander kombiniert.

2.3.1 Prognose des lokalen Strom- und Brauchwarmwasserbedarfs

2.3.1.1 Grundlegende Hypothesen und Entwicklung des Prognoseansatzes

Sowohl der Strombedarf $Last_{el}$ als auch der Bedarf an Brauchwarmwasser $Last_{th,BWW}$ hängen direkt vom spezifischen Verhalten der im Gebäude befindlichen Personen ab. Da dieses Verhalten wiederum von einer unüberschaubaren Zahl an internen und externen Einflussgrößen beeinflusst wird (z.B. Gewohnheiten, Stimmungen, Wetter, Job, Verhalten von Freunden und Bekannten, Events, etc.), deren Wirkungsgefüge auf den Verbrauch mit übertragbaren Methoden praktisch nicht zu ermitteln ist, wird davon abgesehen, dieses menschliche Verhalten direkt zu untersuchen oder dessen Einflussgrößen näher zu determinieren. Stattdessen wird die Hypothese getroffen, dass menschliches Verhalten stark von – nicht näher zu spezifizierenden – Routinen und Gewohnheiten geprägt ist und dass daher der Energieverbrauch im zeitlichen Verlauf **wiederkehrende Muster** aufweist. Diese Muster können z. B. durch einen Wochenzyklus geprägt sein, bspw. ähnliche Tagesabläufe an Montagen zeigen, jedoch kann dies nicht zwingend vorausgesetzt werden, bspw. aufgrund von Urlaub. Um – in Erweiterung zu den existierenden wochentags-basierten Ansätzen - einen universelleren Ansatz zu finden, wird hier die generalisierte Annahme zugrunde gelegt, dass das Verbrauchsverhalten am anstehenden Prognosetag dem Verbrauchsverhalten eines bzw. mehrerer vergangener Tagen ähnelt.

A Klassifizierung und Prognose

Zur **rollierenden Prognose** der $Last_{el}$ und der $Last_{th,BWW}$ werden daher **univariate Methoden** verwendet und ein Ansatz über eine Klassifizierung mit vier Schritten durchgeführt: Zunächst wird das bereits beobachtete Verbrauchsverhalten am Prognosetag analysiert und der Prognosetag bereits vergangene Tage mit ähnlichem Verbrauchsverhalten zugeordnet (**1. Klassifizierung der tageweisen historischen Verbrauchsdaten und 2. Klassierung des Prognosetags**); anschließend wird das Prognosemodell für den Prognosetag auf Basis der Verbrauchsdaten der ähnlichen Tage erstellt (**3. Parametrisierung Prognosemodell mit klassierten Daten**) und schließlich wird die Prognose mithilfe des erstellten Prognosemodells und unter Berücksichtigung des bereits beobachteten Verbrauchs am Prognosetags erzeugt (**4. Anwendung Prognosemodell**). Dieser Ansatz weist folglich die Eigenschaft auf, dass die Prognosen umso genauer werden, desto ähnlicher der Prognosetag bereits vergangenen Tagen ist und desto weiter er bereits fortgeschritten ist. Aus dem Grund könnte es später ggf. sinnvoll sein, diesen Ansatz bspw. für die frühen Morgenstunden mit einem wochentags-basierten Ansatz zu kombinieren.

B Auswahl des Klassifikationsverfahrens

Für die Anwendung des beschriebenen Ansatzes muss zudem noch festgelegt werden, mit welcher Methode die Klassifizierung umgesetzt wird, da hierfür prinzipiell mehrere Verfahren der - unüberwachten - Klassifizierung zur Verfügung stehen. Zudem muss festgelegt werden, in wie viele Klassen die Daten aufgeteilt werden sollen. Die optimale Wahl von Klassifizierungsmethode und Klassenanzahl kann für jeden Lastgang (unterschiedlicher Gebäude) unterschiedlich sein und sich zudem in Abhängigkeit des Prognosezeitpunktes mit steigender Verfügbarkeit der Messdaten im Laufe des Prognosetags verändern und soll hier daher selbstadaptiv für jeden Prognosezeitpunkt bestimmt werden. Um für jeden Prognosezeitpunkt die **anzuwendende Klassifikationsmethode und Klassenzahl** zu bestimmen, wird somit einmal zu Beginn des Prognosetags basierend auf den historischen Tageslastgängen für jeden Prognosezeitpunkt die **in der Vergangenheit optimale** Kombination von Klassifizierungsmethode und Klassenzahl ausgewertet. Hierzu werden **alle Kombinationen angewendet** und hinsichtlich der **Klassifikationsgüte bewertet**. Zur Bewertung von Klassifikationen können prinzipiell ‚Ähnlichkeitsmaße‘ wie Abstandsmaße, z.B. euklidische Distanz, verwendet werden, da sich eine gute Klassifizierung im Allgemeinen durch eine hohe Kompaktheit/Ähnlichkeit innerhalb der Klassenmitglieder und eine hohe Separation zwischen den Klassen auszeichnet. Für die vorliegende Anwendung ist hinsichtlich der Qualität der Klassifizierung jedoch mehr als ein Abstandsmaß entscheidend, ob die auf der Klassifizierung aufbauende Prognose (entsprechend der Beschreibung von A) eine hohe Genauigkeit aufweist. Daher soll die **Prognosegüte** einer auf der Klassifizierung angewendeten Prognose hier für die Auswahl des anzuwendenden Klassifikationsverfahrens und der zu verwendenden Klassenanzahl ausschlaggebend sein.

C Auswahl des Prognoseverfahrens

Das gesamte Prozedere aus Klassifikationsmethodenwahl und Klassifizierung und Prognose kann zudem mit unterschiedlichen Prognosemethoden durchgeführt und vergleichend bewertet werden, um selbstadaptiv die für den vorliegenden Lastgang am besten geeignete Prognosemethode auszuwählen. Die Prognosegüte kann in einem ersten Schritt mithilfe von üblichen Fehlermaßen bewertet werden.

Das beschriebene Verfahren wird zunächst mit Stromlastgängen zur Prognose von $Last_{el}$ entwickelt, soll jedoch aufgrund der methodischen Ähnlichkeit anschließend auch auf den Brauchwasserbedarf $Last_{th,BWW}$ angewendet werden.

2.3.1.2 Implementierung des Prognoseansatzes

Der beschriebene Ansatz wird in Matlab umgesetzt und es wurden bislang Routinen für die Auswahl des Klassifikationsverfahrens und für die Klassifikation und Prognose implementiert wie im Folgenden beschrieben.

Die historischen 15-minütigen Lastgangdaten LG eines Gebäudes über die aufgezeichneten Tage $d = 1 \dots D$ werden zunächst tageweise in LG_d aufgeteilt und an das **Modul B ‚Auswahl des Klassifizierungsverfahrens‘** übergeben. Hier werden diese zur Bewertung der Klassifizierungsverfahren zu verschiedenen **Prognosezeitpunkten ZP**, $ZP \in \{4:00, 8:00, 12:00, 16:00, 20:00\}$, jeweils bis zu diesem Zeitpunkt gekürzt in LG_{ZP} (bspw. enthält $LG_{4:00}$ die 15-minütigen Lastgangdaten aller Tage von 0:15 bis 4:00 Uhr, d.h. $LG_{4:00} = \{LG_{1,4:00}, LG_{2,4:00}, \dots, LG_{D,4:00}\}$). Anschließend werden für jeden ZP die LG_{ZP} mit verschiedenen **Klassifikatoren K** und mit unterschiedlichen **Klassenanzahlen kAnz**, d.h. mit allen möglichen **Kombinationen der Klassifizierung (K, kAnz)** klassifiziert. Die Anzahl der Klassen wird dabei aktuell zwischen 1 und 5 variiert, d.h. $kAnz = 1 \dots 5$, und es werden zwei verschiedene Methoden des unüberwachten Lernens (unsupervised Machine-Learning-Algorithmen) als Klassifizierungsmethoden K eingesetzt. Diese erkennen für einen vorliegenden Input selbständig eine zugrundeliegende Struktur, in diesem Fall mehrere **Klassen $k = k_1 \dots k_{kAnz}$** . Konkret werden hierfür der Self-Organizing-Map-Algorithmus **SOM** und das Clusteranalyse-Verfahren **k-Means** in Form ihrer Matlab-Implementierung verwendet, d.h. $K \in \{k\text{-Means}, SOM\}$. Der SOM-Algorithmus, der aus dem Bereich der Neuronalen Netzen stammt, ordnet den Inhalt eines Eingabevektors in einer höheren Dimension in einer Karte an, bei der ähnliche Datenpunkte einen geringeren Abstand aufweisen. Der k-Means-Algorithmus unterteilt hingegen den Datensatz in $kAnz$ Klassen, wobei die einzelnen Daten ihrem nächsten Klassenmittelpunkt, also dem mit dem geringsten Abstand, aller Klassen zugeordnet werden. Jede Klassifikation $(K, kAnz)$ ordnet somit für alle ZP jedem $LG_{d,ZP}$ eine Klasse k zu, $k(LG_{d,ZP})_{(K,kAnz)}$. Für jeden ZP soll nun bewertet werden, welches die **optimale Klassifizierung $(K^*, kAnz^*)_{ZP}$** ist. Für jede Klassifizierung $(K, kAnz)_{ZP}$ wird daher für jeden Tag $d^* \in D$ (es sei $k(LG_{d^*,ZP})_{(K,kAnz)} = k^*$) eine Prognose für LG_{ZP,d^*} auf Grundlage der klassierten Daten durchgeführt, d.h. das Prognosemodell wird mit allen $LG_{ZP,d} : d \neq d^*$ und $k(LG_{d,ZP})_{(K,kAnz)} = k^*$ trainiert und auf LG_{ZP,d^*} angewendet. Die Prognosegüte wird anschließend mit dem Mean absolute percentage error (**MAPE**) bewertet. Zur Bestimmung von $(K^*, kAnz^*)_{ZP}$ werden für jeden $d^* \in D$ die MAPE-Werte aller $(K, kAnz)_{ZP}$ verglichen und die Klassifizierung $(K, kAnz)_{ZP}$ mit dem kleinsten MAPE ist die Gewinnerklassifizierung des Tages d^* . Die Klassifizierung $(K, kAnz)_{ZP}$, die die meisten Tage gewinnt, wird als optimale Klassifizierung $(K^*, kAnz^*)_{ZP}$ festgelegt.

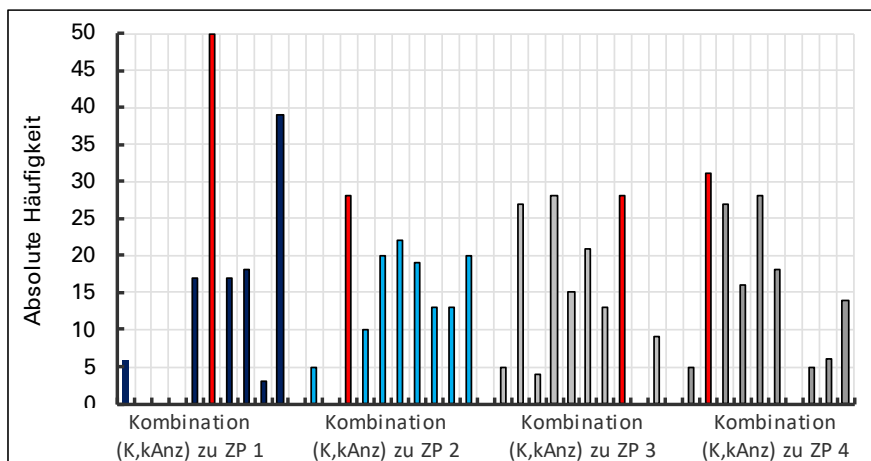


Abbildung 2-5: Häufigkeitsverteilung des besten $(K, kAnz)$ (rot dargestellt) nach Zeitpunkt ZP (Erste 5 Abschnitte der X-Achse pro ZP mit $K = SOM$ und $kAnz = 1 \dots 5$, folgenden 5 Abschnitte mit $K = k\text{-Means}$ mit $kAnz = 1 \dots 5$)

In **Abbildung 2-5** ist eine exemplarische Häufigkeitsverteilung der Gewinnerklassifizierungen $(K, kAnz)_{ZP}$ für 4 verschiedene Zeitpunkte ZP 1 bis ZP 4 dargestellt. Dies wird für jeden Zeitpunkt ZP durchgeführt und für jeden ZP bestimmt der Modalwert der Verteilung welche Klassifizierung die optimale $(K^*, kAnz^*)_{ZP}$ ist. Die Auswahl des Klassifikationsverfahrens, das einmal täglich durchgeführt wird, ist damit abgeschlossen und die ermittelten $(K^*, kAnz^*)_{ZP}$ für alle ZP können an das **Modul A ‚Klassifizierung und Prognose‘**, übergeben werden, wie in **Abbildung 2-6** gezeigt.

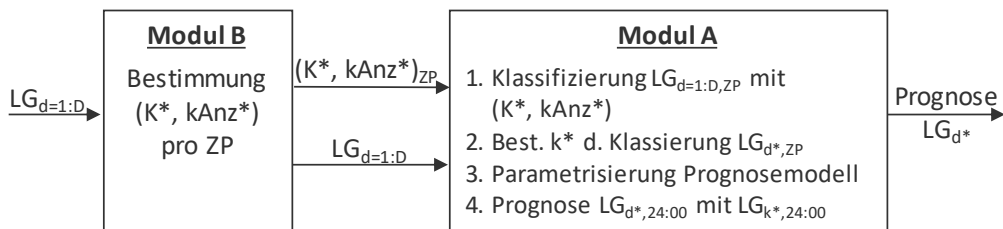


Abbildung 2-6: Darstellung des zweiteiligen Prognoseprozess der Last_{el}

Im Modul A wird für den jeweils aktuellen Zeitpunkt ZP* des anstehenden Prognosetags d* die eigentliche Prognose durchgeführt. Hierfür wird die im Modul B ermittelte optimale Klassifizierung (K*, kAnz*)_{ZP*} des Zeitschritts ZP* auf die historischen Lastgänge LG_{ZP*} angewendet. Der Prognosetag d* wird klassiert und das Prognosemodell wird analog zum Prognosevorgehen in Modul B mithilfe aller Lastgänge dieser Klasse k* (alle LG_{ZP,d} : k(LG_{d,ZP})_(K,kAnz = k*)) trainiert und dann auf LG_{ZP,d*} angewendet um die Prognose für den aktuellen Prognosetag zu erhalten.

In der aktuellen Implementierung wird als Prognoseverfahren das Decision-Tree-Verfahren von Matlab angewendet, bei dem durch bekannte Input- und Outputdaten ein gewichteter Entscheidungsbaum trainiert wird, dessen Knoten den Entscheidungen und die Blätter den gewichteten Antwortmöglichkeiten entsprechen. Es gibt jedoch auch eine Reihe weiterer Prognoseverfahren der Zeitreihenanalyse und der Machine-Learning-Ansätze, die aktuell und im weiteren Verlauf des APs anhand von mehreren Gebäudelastgängen untersucht werden.

2.3.2 Prognose der lokalen PV-Erzeugung und des Heizwärmebedarfs

Die Prognosen von Last_{th,HWW} und Erzeugung_{el} erfolgen aufgrund der unmittelbaren Abhängigkeit vom Wetter mittels multivariater Verfahren, d.h. es werden hierfür jeweils Hybrid-Modelle entwickelt, die grundsätzliche physikalische Zusammenhänge abbilden und mit selbstlernenden – standortspezifischen - Modellteilen kombinieren.

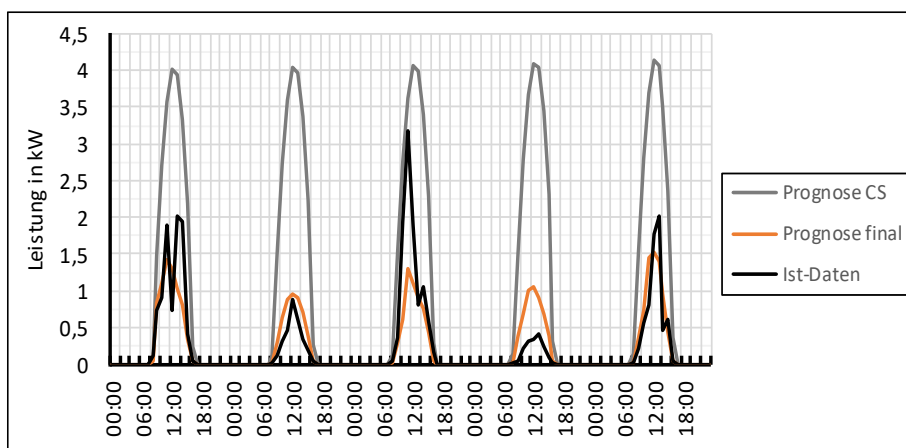


Abbildung 2-7: Prognoseergebnis des Hybrid-Modells (orange) für die lokale PV-Erzeugung zusammen mit modellierter Clear-Sky-Leistung (grau) und gemessener Leistung (schwarz) für 5 Wintertage.

Für die Prognose der lokalen PV-Erzeugung wird aktuell ein Modell mit zwei Bausteinen in Matlab implementiert, 1. ein Clear-Sky-Modell für die Prognose der PV-Leistung bei wolkenlosem Himmel und 2. ein selbstlernendes Modell mit Wetterdaten zur Berücksichtigung des Wettereinflusses. Die aktuelle Implementierung verwendet ein Fast-Forward-Netz und ein exemplarisches Prognoseergebnis ist gemeinsam mit der modellierten Clear-Sky-Leistung und der gemessenen PV-Leistung in Abbildung 2-7 dargestellt. Sie zeigt, dass das Modell mittlere PV-Leistungen bereits mit recht hoher Genauigkeit prognostizieren kann, jedoch sehr hohe oder niedrige Erzeugungswerte noch nicht adäquat abbildet. Hier werden aktuell und im weiteren Laufe des APs weitere Methoden untersucht.

3. Projektstatus

In AP 1 wurde mit Modellrechnungen über Gebäudetypisierungen der zu erwartende Wärmebedarf in BW bis ins Jahr 2050 ermittelt. Auf Basis von Annahmen zur Gebäudesanierung und zur Ausstattung der Gebäude mit Wärmeverteilungssystemen wurde abgeschätzt, wie sich das technische Potenzial für die Gebäudewärmebereitstellung mithilfe von Wärmepumpen in BW bis 2050 entwickeln wird. AP 1 ist hiermit planmäßig und erfolgreich abgeschlossen.

In AP 2 wurden verallgemeinerte Wärmepumpen-Kennlinien für thermische und elektrische Leistung über Korrelationsfunktionen erstellt und davon ausgehend die Jahresarbeitszahlen von Referenzgebäudesystemen berechnet. Aufgrund einer Verzögerung der Datenbereitstellung aus AP 1 begann die Entwicklung der Betriebsmodi für die Wärmepumpensysteme in AP 2 erst verspätet, dafür wurde der Beginn der technischen Analyse in AP3 vorgezogen. Dennoch ist AP2 mit Tabelle 2-3 erfolgreich abgeschlossen. In der Tabelle sind die Gebäudetypen aus AP1 nach Einfamilien- und Mehrfamilienhaus sowie Gebäudealter aufgeführt ebenso wie die jeweilig passende Leistungsklasse der Wärmepumpen sowie die erreichten JAZ je Gebäudetyp. Generell empfiehlt es sich, auch die Wärmepumpen in Verbindung mit thermischen Speichern zu betreiben. Vorteilhaft ist zudem die Verwendung eines Batteriespeichers, wenn das Gebäude über eine PV-Anlage verfügt. Im vorgezogenen AP3 wurde ein Simulationsmodell weiterentwickelt und am Beispiel eines Einfamilienhauses für die Betriebsoptimierung eines Systems mit Wärmepumpe und PV-Anlage angewendet.

In AP 5 wurden methodische Konzepte jeweils für die Prognosen von elektrischer Last und Brauchwarmwasser (univariate Black-Box-Modelle) und für Heizwärmebedarf und PV-Erzeugung (multivariate Grey-Box-Modelle) entwickelt und teilweise implementiert. Aufgrund eines personellen Wechsels befindet sich das AP in leichtem Rückstand gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan. Dies geht jedoch mit einer ebenfalls geringeren Mittelverwendung für das AP im Jahr 2017 einher, so dass die geplanten Ergebnisse mit etwas Verzögerung in vollem Umfang erreicht werden sollten.