

ENTWICKLUNG UND IMPLEMENTIERUNG VON BETRIEBSFÜHRUNGSSTRATEGIEN IN EINEM PLUSENERGIEGEBÄUDE

C. Betzold¹, A. Dentel¹ und S. Bordin¹

¹Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg, Deutschland

KURZFASSUNG

Der steigende Einsatz erneuerbarer Energien im Wohnungsbau erfordert intelligente Lösungen, um die lokal erzeugte Energie vor Ort nutzen zu können. Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, optimierte Betriebsführungsstrategien für modulierende Wärmepumpen (MWP) mit Speichern zu entwickeln und diese in einem Plusenergie-Reihenhauskomplex anzuwenden, um den Eigenverbrauch der Photovoltaikerzeugung (PV) und die Effizienz zu erhöhen. Der Betrieb und der Vergleich zweier optimierter Betriebsführungsstrategien zeigen, dass beide einen ähnlich hohen PV-Eigenverbrauch erzielen, aber zu unterschiedlichen Arbeitszahlen führen.

ABSTRACT

The increasing use of renewable energies in residential buildings requires intelligent solutions in order to be able to use the locally generated energy on site. The aim of this research is the development and the real application of optimized control strategies for modulating heat pumps (MHPs) with thermal storage tanks in plus energy terraced houses, built in 2017. The optimized control strategies aim an increase of PV self-consumption and efficiency. The operation and comparison of two optimized control strategies show, that both reach the same PV self-consumption but different seasonal performance factors.

EINLEITUNG

Seitdem die Einspeisvergütung sinkt und der Strompreis der Energieversorger steigt, wird der PV-Eigenverbrauch aus wirtschaftlicher Sicht der Hausbesitzer interessant. Intelligente Steuerungen, die die Kombination aus PV-Anlage, Wärmepumpe und thermischem Speicher nutzen, bieten das Potential Betriebskosten zu reduzieren, indem gezielt PV-Überschuss in Form von Wärme zwischengespeichert wird. Battaglia, M. et al. (2017) zeigt, wie Steuerungsstrategien Stromkosten durch Überhitzen des thermischen Speichers reduzieren können. Des Weiteren untersucht Psimopoulos, E. et al. (2016) Steuerungsalgorithmen und deren Beitrag zur Endenergie, solaren Anteilen, Eigenverbrauch und Arbeitszahlen in der Software TRNSYS. Die

Ergebnisse zeigen eine Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs auf 50,5 % beim Einsatz von Steuerungsstrategien in Kombination mit thermischen und elektrischen Speichern, wenn von einem Standardfall ohne Batterie und wärmegeführten MWP Betrieb ausgegangen wird.

Ein hohes Potential wird von der modellprädiktiven Regelung (model predictive control (MPC)) erwartet, da diese durch numerische Optimierung unter Berücksichtigung von Wetter- und Lastprognosen einen vorausschauenden Betrieb ermöglicht. In der Forschungsarbeit von Fischer, D. et al. (2017) wird eine MPC-Strategie entwickelt, die den jährlichen PV-Eigenverbrauch in einem Mehrfamilienhaus um bis zu 5 % erhöht und die Energiekosten um maximal 16 % bei variablen Strompreisen reduziert. Pichler, M. et al. (2017) zeigt in einer Jahressimulation, dass durch die gezielte MPC-Regelung einer Wärmepumpe der PV-Direktverbrauch in einem Einfamilienhaus um 30 % gesteigert werden kann. In realer Anwendung einer MPC ist es wichtig, dass neben der Evaluierung der Kostenersparnis auch der Betrieb der Anlage bewertet wird. Unterschiedliche Optimierungsansätze, insbesondere die Wahl der Modelle und Optimierungsalgorithmen, beeinflussen das Betriebsverhalten der Anlage. In Buderus et al. (2018) wird dargestellt, dass verschiedene Optimierungsansätze für den Betrieb einer Wärmepumpe in einem Hardware-in-the-Loop Prüfstand zu ähnlichen Ergebnissen kommen. Unter Verwendung einer realen Preiskurve eines Energieversorgers ergibt sich im Vergleich zu einem wärmegeführten Anlagenbetrieb eine durchschnittliche Einsparung von nur unter 1 % pro Tag.

In einer vorherigen Forschungsarbeit wurde eine Betriebsführungsstrategie, das Demand Side Management System (DMS), für ein Energiesystem in einem Plusenergie-Reihenhauskomplex in TRNSYS (2015) entwickelt und von Dentel, A. & Betzold, C. (2017) beschrieben. Das Energiesystem umfasst eine gemeinsame Anlage, bestehend aus einer PV-Anlage, zwei MWPs mit thermischer Speicherkaskade und einer Batterie. Die Bereitung des Trinkwarmwassers (TWW) befindet sich dezentral in jedem Reihenhaus und umfasst eine TWW-Wärmepumpe (Booster) mit einem 200 Liter TWW-Speicher. Das DMS wurde bei der Implementierung in die Gebäudeautomation an

das reale Energiesystem angepasst und optimiert, sodass die Weiterentwicklung der Regelung (Betzold, C. & Dentel, A. 2019) zu einer PV-optimierten Regelung (PVC) führte. Die PVC steuert zwei MWP, acht Booster sowie eine Batterie und ist seit Oktober 2018 in Betrieb.

Im Rahmen einer Simulationsstudie von Betzold, C. et al. (2021) wurden die PVC und eine MPC in einer Jahressimulation mit zwei wärmegeführten Regelungen verglichen und unter anderem hinsichtlich Gesamtenergieverbrauch und Betriebskosten bewertet. Eine effiziente wärmegeführte Regelung erreicht im Vergleich zur PVC eine Reduzierung der Betriebskosten um weitere 4,9 %, da diese einen geringeren Gesamtenergieverbrauch bei besserer Arbeitszahl bietet. Die MPC erzielt den geringsten Gesamtenergieverbrauch bei bester Arbeitszahl und reduziert die Betriebskosten um weitere 7,1 % im Vergleich zur PVC.

In dieser Forschungsarbeit wird, im Vergleich zur PVC, eine modellprädiktive Betriebsführungsstrategie für das Energiesystem in einem Reihenhaus-Komplex eingesetzt und das Betriebsverhalten der MWP hinsichtlich PV-Eigenverbrauch und Effizienz bewertet. Aufgrund des begrenzten Testzeitraums der MPC werden die Betriebskosten nicht bewertet, da keine übertragbaren Ergebnisse erzielt werden können. Zusätzlich wird der reale Betrieb mit den Ergebnissen aus Simulation und Modellbildung verglichen.

ENERGIESYSTEM UND REGELUNG

Das thermische Energiekonzept (siehe Abbildung 1) umfasst zwei geothermische MWP mit einer Pufferspeicherkaskade als zentrale Komponenten der Betriebsführung.

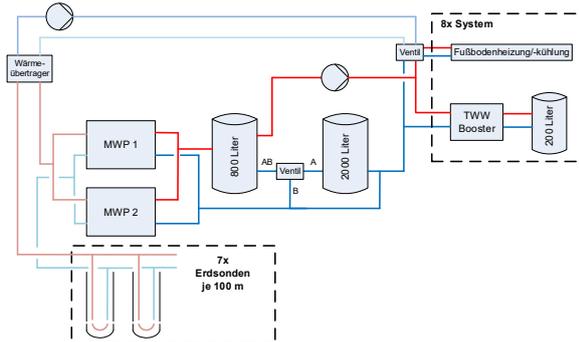


Abbildung 1: Thermisches Energiekonzept mit zentralem Heizungssystem und dezentraler TWW-Erzeugung

Die MWP sollen gezielt in Teillast betrieben werden um eine höhere Leistungszahl (Coefficient of Performance (COP)) zur Effizienzsteigerung der Anlage zu nutzen. Zudem ermöglicht die Flexibilität der MWP eine Anpassung an die thermische Last sowie an die verfügbare PV-Leistung. Zusätzlich

werden acht Booster zur TWW-Bereitung genutzt, um durch deren zeitlich versetzten Betrieb elektrische Lastspitzen zu reduzieren.

PV-optimierte Regelung (PVC)

Die PVC ist eine regelbasierte Regelung, die durch eine Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs eine Betriebskostensenkung erreichen soll. Die Wärmepumpen werden gezielt bei PV-Überschuss betrieben und die thermischen Speicher beladen. Eine detaillierte Beschreibung der Regelung sowie der Implementierung ist in Betzold, C. & Dentel, A. (2019) aufgeführt. Zusammengefasst gibt es vier verschiedene Modi:

1. Netzmodus: Die thermischen Speicher und die TWW-Speicher werden auf ein Minimum geladen, um den Komfort sicherzustellen.
2. PV-Modus: Die thermischen Speicher und die TWW-Speicher werden bei PV-Überschuss auf ein Maximum geladen.
3. Lastmanagement: Zur Reduzierung von Lastspitzen werden die Wärmepumpen für 15 Minuten abgeschaltet, wenn eine Lastspitze von 16 kW erreicht wird.
4. Prioritätsmodus: Zur Sicherstellung des Komforts werden bei Unterschreiten einer minimalen Temperatur in den thermischen und den TWW-Speichern die Wärmepumpen wieder angeschaltet. Dieser Modus ist normalerweise an das Lastmanagement gekoppelt.

Die PV-optimierte Regelung ist seit Oktober 2018 für die MWP und seit Januar 2019 für die Booster in Betrieb. In dieser Arbeit wird das Energiesystem in MATLAB als Energiebilanzmodell abgebildet. Die Darstellung des Modells geht aus Gleichungen 1 – 3 hervor.

Modellprädiktive Regelung (MPC)

Die MPC basiert auf einer numerischen Optimierung und auf Wetter- und Lastprognosen. Es wurde ein gemischt-ganzzahliger linearer Optimierungsalgorithmus (MILP) verwendet. Die Erstellung der MPC erfolgte in MATLAB (R2019a) mit der zusätzlichen Software GUROBI (Version 8), um die Option Special Ordered Set (SOS) zu nutzen. Die SOS Option ermöglicht eine Interpolation zwischen Betriebspunkten, damit das Polynom der MWP bei $B5\text{ }^{\circ}\text{C}/W35\text{ }^{\circ}\text{C}$ drehzahlvariabel abgebildet werden kann. So kann die Wärmeleistung der MWP zwischen 4,8 kW und 18,1 kW und die elektrische Leistung entsprechend zwischen 1,0 kW und 4,7 kW liegen. Die Trinkwassererwärmung hat eine Wärmeleistung von 2,2 kW und eine elektrische Leistung von 0,5 kW. Die Abbildung des Energiesystems basiert auf vereinfachten Modellen und wird durch eine Energiebilanz dargestellt.

Die Energiebilanz für das MWP-System ist in Gleichung 1 dargestellt:

$$\sum_{m=1}^2 Q_{MWP,m} + Q_{sp,kap,t-1} = Q_{sp,ver} + Q_{th} \quad (9)$$

Q_{MWP} = Wärmeenergie einer MWP; $Q_{sp,kap,t-1}$ = Wärmespeicherkapazität des vorherigen Zeitschritts; $Q_{sp,ver}$ = füllstandsabhängiger Verlust des Wärmespeichers; Q_{th} = Wärmeenergie des Gebäudes. In Gleichung 2 ist das Booster-System ($n = 1-8$) gezeigt:

$$Q_{B,n} + Q_{sp,T,kap,t-1} = Q_{sp,T,ver} + Q_{th,T,n} \quad (2)$$

Q_B = Wärmeenergie eines Boosters; $Q_{sp,T,kap}$ = Wärmespeicherkapazität des TWW-Speichers des vorherigen Zeitschritts; $Q_{sp,T,ver}$ = konstanter Verlust des TWW-Speichers; $Q_{th,T,n}$ = TWW-Last eines Haushaltes.

Gleichung 3 beschreibt das Batteriesystem:

$$E_{PV} * \eta_{Bat} + C_{Bat,t-1} = \sum_{m=1}^2 E_{MWP,m} + \sum_{n=1}^8 E_{B,n} \quad (3)$$

E_{PV} = PV-Überschuss; η_{Bat} = Wirkungsgrad der Batterie; C_{Bat} = elektrische Speicherkapazität des vorherigen Zeitschritts; E_{MWP} = elektrische Energie einer MWP; E_B = elektrische Energie der Booster.

Betriebsgrenzen werden durch die minimalen und maximalen Speicherkapazitäten sowie durch die vollständige Abdeckung der thermischen und elektrischen Last definiert. Die Kostenfunktion basiert auf Betriebskosten für den Stromverbrauch von Haushalt, MWPs und Booster in Abhängigkeit vom Netz-, PV- oder Batteriebezug sowie auf einem Bonus für die PV-Einspeisung.

In Gleichung 4 ist die Kostenfunktion beschrieben:

$$\begin{aligned} \min J = & \sum_{t=1}^{t_{ende}} E_{el,PV,t} * c_{PV} + \dots \\ & \sum_{t=1}^{t_{ende}} E_{el,Bat,t} * c_{Bat} + \dots \\ & \sum_{t=1}^{t_{ende}} E_{el,Netz,t} * c_{Netz} - \dots \\ & \sum_{t=1}^{t_{ende}} E_{el,Einsp,t} * c_{Einsp} \end{aligned} \quad (4)$$

c = Kosten für Strombezug in Abhängigkeit vom Netz-, PV- oder Batteriebezug sowie der Einspeisevergütung.

Gleichung 5 beschreibt die Summe der elektrischen Energie:

$$E_{el} = E_{el,Haus} + \sum_{n=1}^2 E_{el,MWP,n} + \sum_{n=1}^8 E_{el,B,n} \quad (5)$$

E_{el} = Gesamter elektrischer Verbrauch; $E_{el,Haus}$ = gesamter elektrischer Verbrauch der Haushaltsgeräte.

Zur Erstellung des Betriebsplans der Wärmepumpen werden Prognosedaten über einen Zeitraum von 24 Stunden von einer Wetterprognosestation empfangen. Die Ermittlung der PV-Leistung erfolgt anhand der prognostizierten solaren Einstrahlung und eines physikalischen Modells in MATLAB. Thermische, elektrische und TWW-Lastprognosen werden durch Künstliche Neuronale Netze (KNN) ermittelt. Diese wurden in MATLAB mit der Deep Learning Toolbox erstellt. Das Netz ist ein zweischichtiges Feedforward-Netz mit 20 Neuronen und 20 Layern und wurde mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus trainiert. Als Trainingsdaten dienten Monitoringdaten über die letzten 12 Monate. Die Eingabewerte zur Erstellung der Lastprognosen sind Außentemperatur, Stunde, solare Einstrahlung auf die Horizontale sowie die Unterscheidung in Wochentag und Arbeitstag. Bisherige Vergleiche von Prognose und Messwerten ergaben moderate Ergebnisse.

BETRIEB DER PV-OPTIMIERTEN REGELUNG

Betrieb und Simulation der PV-optimierten Regelung

Der Betrieb der MWPs wird für eine Woche im Februar 2019 in einer Simulation in einem 15-minütigen Zeitschritt abgebildet. Die Modellierung der Anlagentechnik und die Umsetzung der PVC erfolgen in der Software MATLAB. Für den Betrieb in der Februarwoche werden Monitoringdaten im 15 Minutenintervall verwendet. Die Randbedingungen, thermische und elektrische Lasten sowie Speicherfüllstände, werden aus den Monitoringdaten eingelesen.

In Abbildung 2 ist der Verlauf der thermischen Leistung der zwei MWPs (oben) und der Verlauf des Füllstandes des thermischen Speichers (unten) dargestellt. Im Netzmodus (wärmegeführt) ist ein ähnlicher Verlauf von Messung und Simulation zu erkennen. Im PV-Modus (graue Flächen) gibt es hingegen deutliche Unterschiede in den Betriebszeiten sowie der Wärmeleistung. Die Trägheit des Systems wird in der Simulation nicht abgebildet, da das Modell die Kapazität der MWPs und der Leitungen nicht berücksichtigt. Daher reagiert der Speicherfüllstand

bei Wärmepumpenbetrieb unmittelbar. In Messung und Simulation ist zu erkennen, dass in der betrachteten Woche die Pufferspeicherkaskade bei vollem Speicherfüllstand die thermische Gebäudelast für nur drei Stunden allein decken kann.

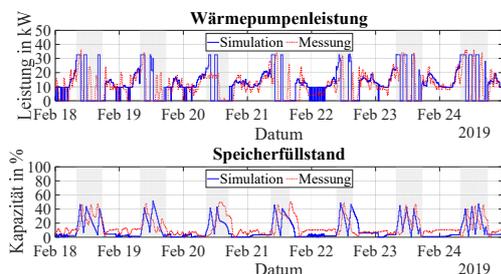


Abbildung 2: Thermische Leistung der MWP (oben) und Speicherfüllstand (unten) im Vergleich von Simulation zu Messung

Betriebsverhalten der MWP

Da das PVC-Modell die Temperaturniveaus nicht berücksichtigt, sollen im Folgenden der Temperaturverlauf im Pufferspeicher sowie die Kondensatorein- und -austrittstemperaturen der MWPI betrachtet werden. Abbildung 3 (oben) zeigt die vier gemessenen Temperaturen (1 oberste Schicht, 2 unterste Schicht je Pufferspeicher) in der Pufferspeicherkaskade und die gemessenen Kondensatorein- und -austrittstemperaturen der MWPI (unten) für einen Ausschnitt von 24 Stunden in der betrachteten Februarwoche.

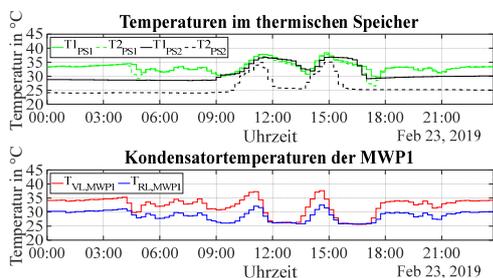


Abbildung 3: Messwerte der Temperaturschichtung der Pufferspeicherkaskade (oben) und Kondensatorein- und -austrittstemperaturen der MWPI (unten)

Im PV-Modus wird deutlich, dass beide Pufferspeicher beladen werden. Im Allgemeinen folgt der Verlauf der Temperatur in der obersten Speicherschicht des ersten Pufferspeichers (T_{1PS1}) dem Verlauf der Kondensatoraustrittstemperatur ($T_{VL,MWPI}$). Da die Kondensatorspreizung in diesem Ausschnitt konstant bei ca. 5 K liegt, sinkt der Kondensatorvorlauf bei Absinken der Rücklauf-temperatur ab. Folglich wird das Temperaturniveau im ersten Pufferspeicher auch reduziert (siehe Abbildung 3, von 6:00 Uhr bis 9:00 Uhr und ca 21:00 Uhr).

Vergleich von PVC-Simulation und Messung

Zur Bewertung der Simulation werden die Energiebilanzen von Erzeugung und Verbrauch der MWP und Booster den Messwerten gegenübergestellt. Die thermische Entzugsenergie aus den Pufferspeichern sowie die thermische Erzeugung, der elektrische Verbrauch und die Arbeitszahlen der MWP und der Booster sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 zu sehen. Die Speicherendstände werden bei der thermischen Erzeugung berücksichtigt und den Energien als Bonus wieder gutgeschrieben. Die thermische Entzugsenergie setzt sich aus Heizenergie und Quellenenergie der Booster zusammen. Beim Vergleich der gemessenen thermischen Entzugsenergie und Erzeugung wird deutlich, dass die Messgenauigkeit der Messgeräte in die Bilanz einfließt. Die Erzeugung weicht vom thermischen Entzug unter Berücksichtigung des Speicherstart- und -endstandes um -4,4 % ab. Die Abweichungen von Messung und PVC-Simulation sind insgesamt moderat. Die Arbeitszahl der MWP hat eine Abweichung von 6,8 % und die Arbeitszahl der Booster hat eine Abweichung von 2,4 %.

Abbildung 4 zeigt die Energieverteilung der PV-Anlage (oben) sowie des Verbrauchs (unten) im Vergleich von PVC-Simulation zur Messung. Eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten ergibt der Vergleich der Energieverteilung der PV-Anlage. Hingegen sind bei der Energieverteilung des Verbrauchs hinsichtlich der Batterieentladung sowie des Netzbezuges deutliche Abweichungen von -6,8 % und 8,5 % zu erkennen.

Tabelle 1: Vergleich von Erzeugung, Verbrauch und Arbeitszahlen der Wärmepumpen

	PVC	MESSUNG	ABWEICH.
Thermischer Entzug	1955 kWh	1910 kWh	+ 2,4 %
Thermische Erzeugung	1967 kWh	1830 kWh	+ 7,5 %
Elektrischer Verbrauch	417 kWh	421 kWh	- 1,1 %
Arbeitszahl MWP	4.7	4.4	+ 6,8 %

Tabelle 2: Vergleich von Erzeugung, Verbrauch und Arbeitszahlen der Booster

BOOSTER	PVC	MESSUNG	ABWEICH.
Thermische Erzeugung	619 kWh	616 kWh	0,5 %
Elektrischer Verbrauch	148 kWh	149 kWh	- 0.9 %
Arbeitszahl Booster	4.3	4.2	+ 2,4 %

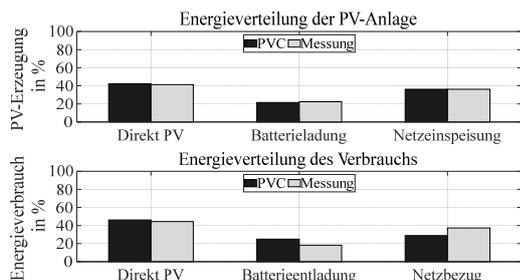


Abbildung 4: Energieverteilung der PV-Anlage (oben) und des Verbrauchs im Gebäude (unten) im Vergleich von Simulation zu Messung

BETRIEB DER MPC-REGELUNG

Der reale Betrieb der MPC erfolgt in Testphasen über mehrere Stunden, um die Ergebnisse der MPC und das Verhalten der Wärmepumpen überwachen zu können. Der gleitende Optimierungshorizont beträgt 23 Stunden mit einer Optimierung im 15 Minutenintervall. Zur Bewertung wird ein Testbetrieb über einen Zeitraum von sieben Stunden analysiert. Dabei werden die MWP's sowie fünf der acht Booster gezielt angesteuert. Aufgrund von nutzerseitigen Einstellungen der Booster können die übrigen drei Booster durch die Gebäudeautomation nicht angesteuert werden.

Vergleich der Prognosedaten

Die Prognosewerte und Ergebnisse des MPC-Betriebs werden abschließend den Monitoringdaten gegenübergestellt. In Abbildung 5 ist die Prognose für die PV-Leistung und die thermische Last, die in der MPC verwendet wird, den Ergebnissen des Monitorings gegenübergestellt. Es gibt abschnittsweise große Abweichungen zur Messung, insbesondere bei der PV-Prognose. Insgesamt wird der Trend der Lasten jedoch ausreichend gut abgebildet.

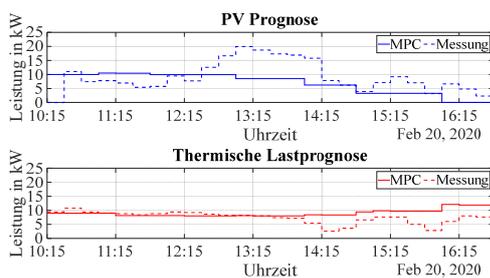


Abbildung 5: Gegenüberstellung von Prognose der PV-Leistung und der thermischen Last mit Monitoringdaten

Der RMSE und NRMSE für die vier Lastprognosen werden in Tabelle 3 dargestellt. Ein hoher RMSE ergibt sich bei der PV-Leistung von 5,6 kW sowie ein NRMSE von 28,1 %, welche insbesondere aus einer abweichenden Solarprognose der Wetterempfangsstation resultieren. Die Werte für den RMSE der

Lastprognosen, die auf Grundlage der erstellten KNN ermittelt wurden, liegen zwischen 1,3 kW und 3,0 kW, die Werte für den NRMSE liegen zwischen 22,6 % und 37,1 %. In Tabelle 4 sind die für den Zeitraum resultierenden Summen der Prognosewerte und der Messwerte gegenübergestellt. Die Prognose der TWW-Last weicht in der Summe geringfügig ab (um 2 %). Für die übrigen Prognosen treten deutliche Abweichungen von bis zu 24,6 % auf. Aufgrund der gleitenden Optimierung im 15 Minutenintervall werden die Abweichungen durch die neuen Startbedingungen relativiert.

Tabelle 3:

RMSE und NRMSE von Prognose und Messung

	RMSE IN KW	NRMSE IN %
PV- Leistung	5,6	28,1
Thermische Leistung	3,0	37,1
Elektrische Leistung	1,9	27,6
TWW Last	1,3	22,6

Tabelle 4:

Vergleich des Energieverbrauchs von Prognose (Prog.) und Messung (Mess.) sowie deren Abweichung (Abweich.)

	PROG. IN KWH	MESS. IN KWH	ABWEICH.
PV-Energie	45,0	59,7	- 24,6 %
Thermische Energie	61,4	50,3	+ 22,1 %
Elektrische Energie	22,5	28,7	- 21,6 %
TWW Last	25,0	24,5	+ 2,0 %

Betrieb und Vorgabe der modellprädiktiven Regelung

Der Betrieb der MWP's erfolgt über das Setzen der Soll-Rücklauftemperatur am Kondensatoreintritt, um die thermische Leistung zu beeinflussen. Ein direktes Einstellen der Kompressordrehzahl ist nicht möglich. Höheres oder niedrigeres Setzen zur aktuellen Rücklauftemperatur führt zu einem Ansteigen oder Absenken der Kompressordrehzahl. In Abbildung 6 ist die thermische und elektrische Leistung der MWP1 und MWP2 abgebildet.

In den ersten vier Stunden liegt die Messung etwas über der MPC-Vorgabe der thermischen Leistung. In den letzten drei Stunden ist die Messung deutlich niedriger als die MPC-Vorgabe. Hier kam es zu Abschaltungen der MWP's durch deren interne Steuerung, da die Soll-Rücklauftemperatur um 2 K überschritten wurde. Dies ist auf eine geringere Entladung als prognostiziert zurückzuführen (siehe Abbildung 5).

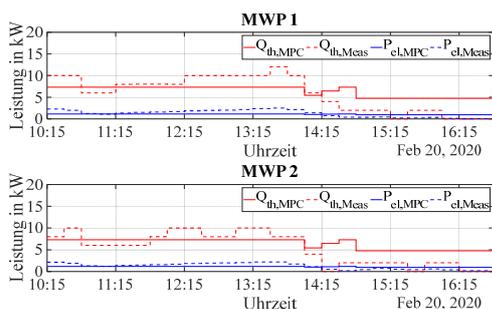


Abbildung 6: Thermische Leistung der MWP1 (oben) und MWP2 (unten) im Vergleich von MPC-Vorgabe zu Messung

Der Speicherfüllstand wird in Abbildung 7 dargestellt. Der durch die MPC im 15 Minutentakt fortlaufend vorgegebene Wert stimmt gut mit der Messung überein (grüne Kurven), insbesondere bei der Beladung. Zusätzlich ist der im ersten Zeitschritt vorhergesagte Fahrplan des Speicherfüllstands abgebildet (schwarze Kurve), der bereits wenig vom Verlauf der tatsächlichen Speicherbe- und -entladung abweicht. Der gute Verlauf der Beladung kommt aufgrund des gezielten Einstellens der thermischen MWP-Leistung und der guten Prognose der Entladeleistung in den ersten vier Stunden zustande. Bei der Entladung (ab 14:45 Uhr) ist die Prognose der Entladeleistung hingegen zu hoch und der Betrieb der MWPs wurde durch die interne Regelung häufig abgeschaltet. Im Folgenden wird daher das Betriebsverhalten der MWPs genauer untersucht.

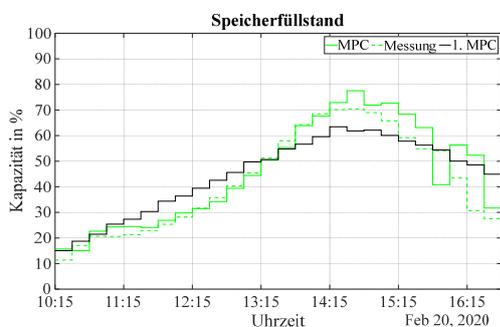


Abbildung 7: Speicherfüllstand im Vergleich von fortlaufender MPC-Vorgabe zu Messung sowie erster Vorgabe der MPC

Betriebsverhalten der MWPs

Da das MPC-Modell auf der Betrachtung eines Energiebilanzmodells beruht und die Temperaturniveaus nicht berücksichtigt, sollen im Folgenden der Temperaturverlauf in der Pufferspeicherkaskade sowie die Kondensatorein- und -austrittstemperaturen betrachtet werden. Abbildung 8 (oben) zeigt die gemessenen Temperaturen in der Pufferspeicherkaskade. Bei Beladung des Pufferspeichers hat die MWP1 eine Kondensatorspreizung von ca. 5 K und es stellt sich eine typische Schichtung der Temperaturen

ein. Bei Entladung der Pufferspeicherkaskade wird die thermische Leistung der MWP1 gesenkt, dabei stellt sich eine kleinere Kondensatorspreizung von 2-3 K ein. Der niedrigere Vorlauf verursacht eine Reduzierung der Speichertemperatur im ersten Pufferspeicher. Zusätzlich zu diesem Verhalten werden die MWPs mehrmals in den letzten Stunden des Testbetriebes durch die interne Regelung ausgeschaltet und durch die MPC-Vorgabe wieder eingeschaltet, was beim Anfahren ebenfalls zu einer Reduzierung der Speichertemperatur führt. Die in Abbildung 7 ersichtliche Entladung des Speicherfüllstands zwischen 15:45 Uhr und 16:30 Uhr ist hauptsächlich auf dieses Verhalten der MWPs zurückzuführen.

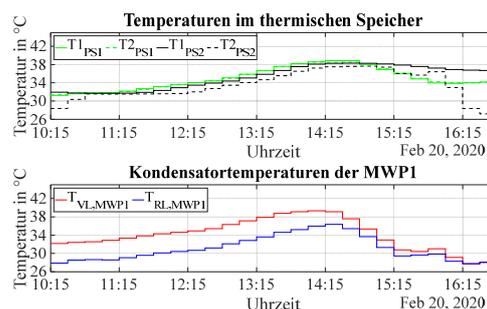


Abbildung 8: Messwerte der Temperaturschichtung der Pufferspeicherkaskade (oben) und Kondensatorein- und -austrittstemperaturen der MWP1 (unten)

Vergleich von MPC-Simulation und Messung

Abbildung 9 zeigt die Energieverteilung der PV-Anlage (oben) sowie des Verbrauchs (unten). Eine gezielte Be- und Entladung der Batterie durch eine MPC-Vorgabe wurde bisher nicht umgesetzt. Es zeigt sich, dass der PV-Eigenverbrauch eine Differenz von -8,9 % und der PV-Autarkiegrad eine Differenz von 2,7 % aufweisen. Die Arbeitszahlen der MWPs (siehe Tabelle 5) unterscheiden sich deutlich. Aufgrund der Ein- und Ausschaltvorgänge ab 14:15 Uhr sowie höherer Kondensatoreintrittstemperaturen im realen Betrieb (Messung) ergibt sich eine schlechtere Arbeitszahl. Die Arbeitszahl der Booster stimmt gut mit der Messung überein.

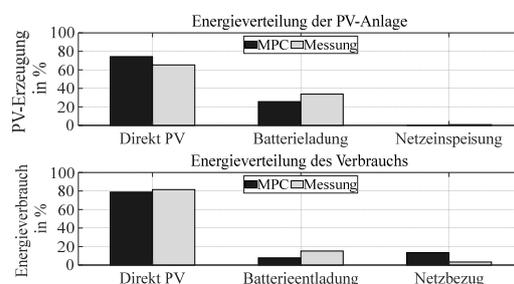


Abbildung 9: Energieverteilung der PV-Anlage (oben) und des Verbrauchs im Gebäude (unten) im Vergleich von Simulation zu Messung

Tabelle 5:
Vergleich der Arbeitszahlen der Wärmepumpen und Booster

ARBEITS-ZAHL	MPC	MESSUNG	AB-WEICHUNG
MWPs	5,9	4,9	+ 20,4 %
Booster	4,3	4,5	- 4,4 %

VERGLEICH DER REGELUNGEN

Betrieb der PV-optimierten und modellprädiktiven Betriebsführungsstrategien

Die Energieverteilung sowie das Betriebsverhalten der MWPs sollen unter Anwendung der PVC und der MPC miteinander verglichen werden. Im Folgenden wird der oben betrachtete Zeitraum von sieben Stunden durch die PVC in der Simulation abgefahren und den Messergebnissen beim MPC-Betrieb gegenübergestellt. In Abbildung 10 wird deutlich, dass die MWPs im PV-Modus eine höhere thermische Leistung bereitstellen und die Pufferspeicherkaskade zügig aufladen. Hingegen werden die MWPs im MPC-Betrieb mit einer niedrigeren thermischen Leistung betrieben, sodass die Pufferspeicherkaskade erst später geladen ist.

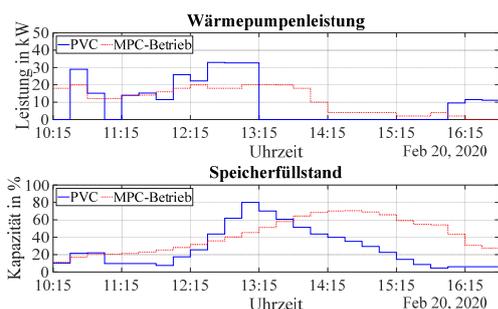


Abbildung 10: Thermische Leistung der MWPs (oben) und Speicherfüllstand (unten) im Vergleich von PVC-Simulation zu MPC-Betrieb

Vergleich von MPC-Betrieb und PVC-Simulation

Abbildung 11 zeigt die Energieverteilung der PV-Anlage (oben) sowie des Verbrauchs (unten). Da die Batterie im MPC-Betrieb nicht aktiv gesteuert wurde, wird im Folgenden nur die PV-Direktnutzung verglichen. Hinsichtlich der PV-Nutzung zeigen sich nur geringe Unterschiede. Der PV-Eigenverbrauch hat eine Differenz von -1,1 % und der PV-Autarkiegrad hat eine Differenz von 3,5 %.

Die Arbeitszahl der MWPs (siehe Tabelle 6) in der PVC-Simulation ist etwas geringer, da die MWPs häufiger im hohen Drehzahlbereich betrieben werden. Die Arbeitszahl der Booster ist der Messung im MPC-Betrieb ähnlich.

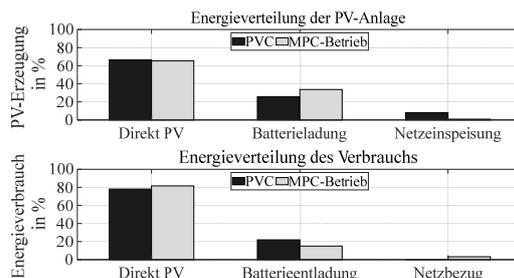


Abbildung 11: Energieverteilung der PV-Anlage (oben) und des Verbrauchs im Gebäude (unten) im Vergleich von PVC-Simulation zu MPC-Betrieb

Tabelle 6:
Vergleich der Arbeitszahlen der Wärmepumpen und Booster

ARBEITS-ZAHL	PVC-SIM.	MPC-BETRIEB	AB-WEICHUNG
MWPs	4,5	4,9	- 8,2 %
Booster	4,3	4,5	- 4,4 %

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Die Modelle der PVC und MPC sind gut geeignet um den thermischen Betrieb der MWPs und den PV-Eigenverbrauch zu bewerten. Die Abbildung der Batterie, insbesondere der Batterieentladung muss in weiteren Arbeiten überprüft und verbessert werden, da das Gebäude als Gesamtsystem verstanden und bewertet wird. Auch die Prognose der PV-Leistung sowie elektrischer, thermischer und TWW-Lasten muss verbessert werden. Ein Nachteil der Modelle ergibt sich aus der reinen Bilanzierung der Energieflüsse. Einflüsse von Temperaturen des Kondensators und der Pufferspeicher bleiben unberücksichtigt. Bei der Untersuchung beider Betriebsführungsstrategien konnte anhand von Messwerten gezeigt werden, dass die MWPs durch ein Absenken der Kondensatoraustrittstemperatur das Temperaturniveau im Pufferspeicher reduzieren. In der PVC wird die Kondensatoraustrittstemperatur durch einen geringeren Rücklauf aus dem Gebäude reduziert, da die MWPs eine Kondensatorspreizung von 5 K halten. Dies ist auf die direkte Kopplung von Rücklauftemperatur zur Kondensatoraustrittstemperatur zurückzuführen. Insbesondere bei Anwendung der MPC führt die gezielte Reduzierung der Leistungsvorgabe zu einer Verringerung der Kondensatorspreizung. Folglich reduziert die abgesenkte Kondensatoraustrittstemperatur das Temperaturniveau im Pufferspeicher. Die direkte Einbindung der MWPs an die Pufferspeicherkaskade ist daher mit Energieverlusten durch ungeeignete Temperaturbelastung verbunden.

Bei Auswertung des PVC-Betriebes für eine Woche konnte gezeigt werden, dass die Pufferspeicher-

kaskade bei vollem Speicherfüllstand die thermische Gebäudelast für nur drei Stunden decken konnte.

Der Vergleich der PVC-Simulation und des MPC-Betriebes zeigt, dass beide Betriebsführungen einen ähnlich hohen PV-Eigenverbrauch erzielen, jedoch ist die Effizienz der MWP's und Booster in der PVC-Simulation schlechter. Die Arbeitszahl der MWP's ist um 8,2 % und die der Booster um 4,4 % niedriger als im MPC-Betrieb. Dieser Unterschied ist auf einen hohen Leistungsbetrieb unter Anwendung der PVC zurückzuführen, der einen niedrigeren COP zur Folge hat. Ein langsames Beladen der Pufferspeicherkaskade in Teillast, wie in der MPC, ermöglicht eine bessere Arbeitszahl und damit einen effizienteren Betrieb der MWP's.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit zeigt die Entwicklung und Implementierung zweier Betriebsführungsstrategien für modulierende Wärmepumpen in einen Plusenergie-Reihenhauskomplex. Die Entwicklung und Bewertung der Betriebsführungsstrategien wurde in MATLAB umgesetzt. Anschließend wurde der reale Betrieb und insbesondere das Betriebsverhalten der MWP's mit der Simulation verglichen. Zudem wurden die Ergebnisse hinsichtlich PV-Eigenverbrauch und Effizienz der MWP's und Booster einander gegenübergestellt.

Unabhängig von der Betriebsführungsstrategie verursacht die direkte Einbindung der MWP's in die Pufferspeicherkaskade eine Temperaturabsenkung im Pufferspeicher, wenn die MWP's in einer niedrigeren Leistungsstufe fahren und dadurch die Kondensator-spreizung reduziert wird. Auch im leistungsgleichen Betrieb kann eine reduzierte Rücklauftemperatur aus dem Gebäude die Kondensatoraustrittstemperatur senken.

Der PV-Eigenverbrauch ist beim Vergleich beider Betriebsführungsstrategien ähnlich und zeigt einen geringen Unterschied von -1,1 %. Die Effizienz hingegen unterscheidet sich deutlich. Im MPC-Betrieb ist die Arbeitszahl der MWP's um 8,2 % und die der Booster um 4,4 % besser.

In weiteren Arbeiten muss überprüft werden, ob eine modifizierte Hydraulik zu einem effizienteren Betriebsverhalten der MWP's führen kann. Auch die Tatsache, dass eine Überbrückung mit der Pufferspeicherkaskade die thermische Last für nur drei Stunden abdeckt, stellt die Frage, ob andere Maßnahmen zur gezielten Nutzung von PV einen besseren PV-Eigenverbrauch zur Folge haben. Hierfür kommt die Ausnutzung der thermischen Gebäudemasse in Betracht.

DANKSAGUNG

Dieses Paper repräsentiert Ergebnisse aus dem Projekt „Herzo Opt - Monitoring der Gebäudehülle, des thermischen Raumkomforts und der Anlagentechnik mit Betriebsoptimierung“ (FKZ 03ET1641A). Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

LITERATUR

- Battaglia, M., Haberl, R., Bamberger, E. und Haller, M., 2017. Increased self-consumption and grid flexibility of PV and heat pump systems with thermal and electrical storage. *Energy Procedia* 135, 358-366.
- Betzold, C., Bordin S. und Dentel, A., 2021. Control strategies for modulating heat pumps in a plus energy building. *Heat Pump Conference 2021*. (Paper accepted for publication)
- Betzold, C. und Dentel, A., 2019. PV Optimized Control of Modulating Heat Pumps regarding PV Self-Consumption. *Building Simulation 2019*.
- Buderus, J., Betzold, C., Bordin, S., Kandasamy, K., Dentel, A., 2018. Gegenüberstellung zweier modellbasierter Optimierungen für den Wärmepumpenbetrieb. *BauSim 2018*.
- Dentel, A. und Betzold, C., 2017. Control Strategies for Geothermal Heat Pump Systems in Combination with Thermal and Electrical Storage Units. *Building Simulation 2017*.
- Fischer, D., Bernhardt, J., Madani, H., Wittwer, C., 2017. Comparison of control approaches for variable speed air source heat pumps considering time variable electricity prices and PV. *Applied Energy*.
- Gurobi Optimization, LLC., Gurobi Version 8
- Pichler, M., Heinz, A., Rieberer, R., 2017. Model predictive heat pump- and building control to maximize PV-power on site use. *12th IEA Heat Pump Conference 2017*.
- Psimopoulos, E., Leppin, L., Luthander, R. und Bales, C., 2016. Control algorithms for PV and Heat Pump system using thermal and electrical storage. *ISES International Solar Energy*.
- The MathWorks, Inc., MATLAB Version: 9.6.0.1072779 (R2019a)
- University of Madison-Wisconsin, 2015. TRNSYS-TRaNsient SYstems Simulation, Solar Energy Laboratory., Version 17.1.