BauSIM 2024 in Wien
23. September – 26. September

Einfluss der Wettervorhersagegüte auf ein PV-unterstütztes MPC-geregeltes Wärmepumpenheizsystem

Christina Betzold, Sebastian Hummel, Arno Dentel
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg, Deutschland,
christina.betzold@th-nuernberg.de

Kurzfassung

Dieser Beitrag beschreibt den Einfluss der Wettervorhersagegüte auf ein PV-unterstütztes und durch eine modellprädiktive Regelungsstrategie (MPC) gesteuertes Wärmepumpenheizsystem sowohl in Simulationsstudien, Laborexperimenten als auch in einem Reallabor. In einem Hardware-in-the-loop Prüfstand wird der 4-tägige Betrieb einer MPC-Regelung für eine perfekte Wettervorhersage im Vergleich zu zwei fehlerbehafteten Wettervorhersagen aus unterschiedlichen Bezugsquellen (Internet und Langwellenempfänger) durchgeführt. Der Langzeitbetrieb einer MPC-geregelten Wärmepumpenheizzentrale wird in einem Reallabor, bestehend aus einem Reihenhaus (acht Wohneinheiten) und gemeinschaftlich genutzter Wärmezentrale, untersucht und bewertet. Die MPC regelt sowohl die beiden modulierenden als auch die acht dezentralen Booster-Wärmepumpen. Über einen Zeitraum von mehreren Wochen konnte die MPC-Regelung unter realistischen Bedingungen untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass der PV-Eigenverbrauch bei fehlerbehafteten Wettervorhersagen im Vergleich zu einer perfekten MPC um bis zu 20 % niedriger ausfällt. Die Betriebskosten steigen um bis zu 48 % an. Im Reallabor zeigte der fehlerfreie Langzeitbetrieb deutlich unterschiedliche Betriebskosten bzw. Gewinne. Die positiven Einflüsse der MPC sind abhängig von Steuerbarkeit der Wärmepumpen und ebenfalls von der Wettervorhersagegüte.

Abstract

This paper describes the influence of the weather forecast quality on a PV-supported heat pump heating system controlled by a model predictive control strategy in simulation studies, laboratory experiments and under real operation. In a hardware-in-the-loop test rig, the 4-day operation of an MPC controlled heating system is carried out for a perfect, a high-quality and a low-quality weather forecast profile. The long-term operation of a MPC-controlled heat pump heating system is investigated and evaluated in a terraced house (eight residential units) with a jointly used heating system. The MPC controls both the two modulating and the eight decentralized booster heat pumps. The MPC control system was tested under realistic conditions over a period of several weeks. The results show that PV self-consumption is up to 20 % lower for faulty weather forecasts compared to a perfect MPC. The operating costs increase by up to 48 %. In the field installation, error-free long-term operation showed increased PV self-consumption by using a MPC control strategy. However, in real operation, the positive effects of a MPC are heavily dependent on the model depth and the quality of the weather forecast.

Einleitung

Eine nachfrageseitige Flexibilität von Wohngebäuden wird immer wichtiger für die Erhöhung der Resilienz des Stromnetzes. Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern bieten dieses Potential auf volatile regenerative Energieerzeuger, wie zum Beispiel Photovoltaik, bedarfsorientiert zu reagieren. So kann Überschussstrom direkt durch die Speicherung elektrischer Energie in Batteriespeichern oder über eine Wärmepumpe in thermischen Energiespeichern nutzbar gemacht und eine Lastverschiebung realisiert werden. Der Wärmebedarf eines Gebäudes kann daher als flexibel angesehen werden. Um diese Flexibilität und auch das finanzielle Potenzial bestmöglich zu nutzen, sind prädiktive Steuerungsstrategien, wie die modellprädiktive Regelung (MPC), erforderlich. Für diese sind Wettervorhersagedaten unerlässlich.

Eine MPC beruht im Wesentlichen auf der periodischen Lösung eines Optimierungsproblems, indem Wettervorhersagedaten in Kombination mit einem Anlagenmodell berücksichtigt werden, um die Betriebsführung zu optimieren. MPC-Strategien haben in der jüngsten Forschung großes Interesse geweckt (Péan et al., 2019, Thieblemont et al., 2017), da sie Vorteile in Bezug auf Betriebskosteneinsparungen, Systemleistung,

Raumkomfort und Energieflexibilität bieten. Fischer et al. (2017) ermittelten Betriebskosteneinsparungen für eine MPC-Strategie von bis zu 11 % bzw. 16 % für konstante bzw. flexible Strompreise im Vergleich zu einer regelbasierten Standardsteuerung. Für einen ähnlichen Vergleich wiesen Bechtel et al. (2020) Kosteneinsparungen von bis zu 24 % für ein Einfamilienhaus (EFH) und flexible Strompreise aus. Pichler et al. (2017) führten eine Jahressimulationsstudie für ein MPC-gesteuertes Wärmepumpenheizsystem durch. Sie ermittelten eine Steigerung des PV-Eigenverbrauchs von bis zu 30 % in einem EFH.

In der Literatur über MPC-Strategien, die sich mit der Wettervorhersage im Allgemeinen befasst, werden Schlagworte wie "perfekte", "idealisierte" oder "optimale" MPC verwendet, um auf Betriebsbedingungen zu verweisen, die eine Übereinstimmung zwischen der Wettervorhersage und den gemessenen ("realen") Wetterbedingungen aufweisen. Derartige Bedingungen können nur in Simulationen erfüllt werden, bei denen die Vorhersagedaten bekannt sind. Daher kann eine perfekte MPC als Benchmark für andere Steuerungsstrategien betrachtet werden, um die Obergrenzen des Nutzens unter optimalen Vorhersagebedingungen zu bestimmen. Sie ist im Allgemeinen nicht auf den Feldtestbetrieb übertragbar. Eine solche Benchmark-Studie wurde von Mendoza-Serrano & Chmielewski (2014) durchgeführt. Die Autoren verglichen ein MPC-gesteuertes Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystem, das mit perfekten und keinen Prognoseinformationen ausgestattet war. Im Vergleich zu ihrer Referenzsituation wiesen sie für die perfekte und die "Null"-Prognose Kostensenkungen von bis zu 31 % bzw. 27 % auf. Die Autoren betonen den starken Einfluss der Prognoseinformationen auf die Systemleistung. Allen et al. (2018) ermittelten Kosteneinsparungen von bis zu 13,1 % bei einer perfekten Prognose und 11,1 % bei einer nicht-idealen Prognose. Löhr & Mönnigmann (2018) verglichen eine "gestrige" Vorhersage, die die Wetterdaten des Vortages als Vorhersage für den Folgetag verwendet, mit einem Regler mit perfekter Vorhersage. Beide Steuerungen schnitten gut ab. Sie kamen zu dem Schluss, dass die Systemleistung nur geringfügig abnimmt, wenn historische Wetterdaten als Vorhersage für den morgigen Tag verwendet werden. Péan et al. (2020) führten eine experimentelle Studie durch, um die Qualität der Wettervorhersage auf die Leistung einer MPC-gesteuerten Luft/Wasser-Wärmepumpe im Kühlbetrieb in einem Wohngebäude zu bewerten. Innerhalb eines dreitägigen Testprofils verglichen sie eine perfekte Wettervorhersage mit einer Vorhersage eines kommerziellen Dienstes. Der Durchgang mit ungenauer Vorhersage führte zu einem Anstieg des gesamten elektrischen Energiebedarfs und der Betriebskosten um 5,8 % bzw. 11,2 %.

Die Literaturrecherche zeigt, dass eine perfekte MPC-Strategie im Allgemeinen sowohl mit einem regelbasierten Algorithmus als auch mit einer MPC-Strategie ohne Wettervorhersagedaten verglichen wird. Heutzutage sind immer mehr Geräte und Steuerungen mit dem Internet verbunden oder können mit Empfangsantennen ausgestattet werden und haben somit Zugang zu historischen oder prognostizierten Wetterdaten. Insbesondere die Qualität der Wettervorhersagedienste, die im Wesentlichen vom Vorhersagehorizont und dem verwendeten Vorhersagemodell abhängen und deren Einfluss auf ein Wärmepumpen-Heizsystem sind zu untersuchen. Darüber hinaus basieren die meisten der rezensierten Artikel auf simulativen Untersuchungen und berücksichtigen nicht den Betrieb in einem realistischen Wärmepumpen-Heizsystem. So verglichen Betzold et al. (2020) in einer Simulationsstudie verschiedene Regelungsstrategien eines geothermischen Wärmepumpenheizsystems. Die Autoren betonten Kosteneinsparungen von 3 % bis 10 % durch den Einsatz eines MPC-Reglers anstelle einer regelbasierten Regelstrategie. Aufgrund der geringen Differenzen in den Simulationen ist eine experimentelle Verifizierung des Kosteneinsparungspotenzials in einer realistischen Betriebsumgebung von besonderer Bedeutung. Daher untersucht dieser Beitrag den Einfluss der Wettervorhersagegüte auf ein PV-unterstütztes Wärmepumpenheizsystem in Simulationsstudien, Laborexperimenten und in einem Reallabor.

Laborexperimente

Methodik

Für die Umsetzung von MPC-Strategien sind Kenntnisse über das thermische Verhalten des Gebäudes (Heizwärme- und Warmwasserbedarf), den Anteil des regenerativen Energiegewinns und das Betriebsverhalten der technischen Gebäudeausrüstung notwendig. Zusätzlich müssen für wetterbasierte MPC-Strategien Wettervorhersagedienste oder historische Wetterdaten implementiert werden.

Wetterdaten

Die Grundvoraussetzung für eine wetterabhängige MPC-Strategie sind Wettervorhersagedaten in guter Qualität, um Kosteneinsparungen oder eine Steigerung der Systemleistung zu erzielen. Für diese Studie werden drei verschiedene Quellen von Wetterdaten genutzt: gemessene („reale“) Wetterdaten und zwei Arten von Vorhersagediensten.

Alle Quellen liefern die solare Bestrahlungsstärke G und die Umgebungstemperatur T_a in 15-Minuten-Intervallen für den Standort des Stadtteils "Herzo Base" der Stadt Herzogenaurach (Deutschland) für den Zeitraum vom 7. bis zum 11. März 2021, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Die gemessenen Wetterdaten (Abk. und Index MEAS), die mit entsprechenden Sensoren auf dem Dach eines EFH am genannten Ort aufgezeichnet wurden, werden in den Experimenten und Simulationen als perfekte Wettervorhersage verwendet. Darüber hinaus liefern ein internetbasierter Wettervorhersagedienst (WFS) und eine fest installierte Wettervorhersagestation (WFC) Vorhersagedaten für den gegebenen Ort und Zeitraum. Letzteres stellt einen Langwellenempfänger dar, der seine Daten von einem kommerziellen Dienst empfängt.

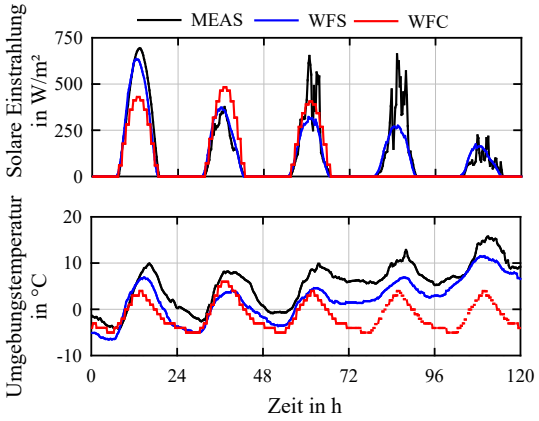

Abbildung 1 - Horizontale Bestrahlungsstärke und Umgebungstemperatur der drei verschiedenen Wetterdatenquellen für fünf aufeinanderfolgende Tage vom 7. bis 11. März 2021.

Es ist zu beachten, dass der WFC ab 1 Uhr des 4. Tages keine gültigen Wetterdaten liefert. Die empfangenen Daten zeigen konstante Werte von G = 0 W m^{-2} und keine validen Daten für T_a, was auf Kommunikationsstörungen hinweist. Eine Überprüfung der empfangenen Daten aus 2021 zeigt, dass Kommunikationsstörungen regelmäßig und häufig auftreten. In 25,6 % der Zeit wurden keine oder fehlerhafte Daten empfangen. Darüber hinaus wird die Übertragung in der Regel in längeren aufeinanderfolgenden Zeitintervallen unterbrochen. Das für diese Auswertung gewählte Zeitintervall stellt somit die typische Datenverfügbarkeit für diesen Wettervorhersagedienst dar. Eine praxisnahe Lösung der Kommunikationsstörungen wurde auch hier umgesetzt, in dem die Einstrahlung weiterhin so gesetzt wird, wie sie empfangen und die Umgebungstemperaturen auf die 24 Stunden zuvor aufgezeichneten Werte gesetzt wurden.

Qualitativ ähneln sich die drei Profile im zeitlichen Verlauf, weisen aber einige große Unterschiede in ihren absoluten oder integralen Werten auf. Die horizontale Einstrahlung für die gesamten fünf Tage summiert sich auf 13,3 kWh m^{-2}, 11,7 kWh m^{-2} und 9,3 kWh m^{-2} für das gemessene, das WFS- bzw. das WFC-Profil. Die mittlere Umgebungstemperatur kann für das gemessene, das WFS- und das WFC-Profil jeweils mit 5,4 °C, 2,2 °C und - 1,2 °C berechnet werden. Eine maximale Differenz von bis zu 10 K kann zwischen den gemessenen Werten und dem WFC-Profil festgestellt werden. Während der zeitliche Verlauf der Temperatur nur den Wärmebedarf des simulierten Gebäudes beeinflusst, wirkt sich die solare Bestrahlungsstärke sowohl auf die Gebäudesimulation als auch auf die PV-Erzeugung aus.

Da das WFC-Profil die höchste Abweichung zu den gemessenen (perfekten) Wetterdaten aufweist, wird dieser Wetterdatensatz als "(qualitativ) ausreichend" in Bezug auf die Vorhersagequalität bezeichnet. Im Gegensatz dazu ist das WFS-Profil "(qualitativ) hochwertig" und wird dementsprechend betitelt.

Gebäudesimulation

Mittels TRNSYS-Gebäudesimulationen wird der Verlauf der Gebäudeheizlast eines EFH auf Basis der drei vorgegebenen Wetterdatensätze simuliert. Als grundlegendes System- und Gebäudekonzept wird das im IEA SHC TASK32 von Heimrath & Haller (2007) beschriebene EFH und Heizsystem verwendet. Für diese Untersuchung wird der Gebäudestandard SFH60 und kein Warmwasserbedarf betrachtet. Dieser Gebäudestandard ist den Gebäuden des Stadtteils "Herzo Base" sehr ähnlich. Die beheizte Bruttowohnfläche beträgt 140 m².

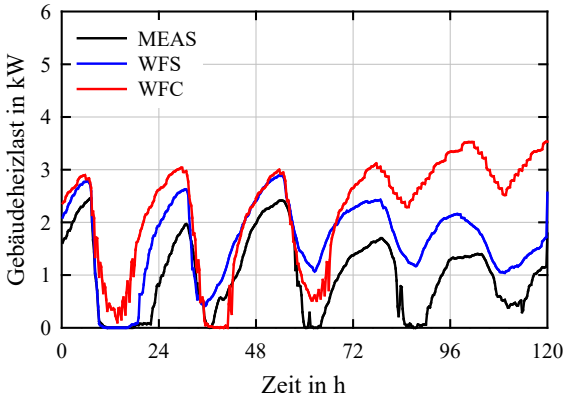

Abbildung 2 - Gebäudeheizlastprofile für den Gebäudestandard SFH60 und die drei betrachteten Wetterdatensätze.

Die Profile der Gebäudeheizlast auf Basis der drei betrachteten Wetterdatensätze sind in Abbildung 2 graphisch dargestellt. Da die gemessenen Wetterdaten die höchste Einstrahlung und

mittlere Umgebungstemperatur aufweisen, sind die Heizlasten und der Heizwärmebedarf entsprechend niedrig. Aufgrund der teilweise nicht validen Wetterdaten des WFC-Profils steigt die Gebäudeheizlast nach 72 h allmählich an und führt zu einem deutlich erhöhten Heizwärmebedarf.

Photovoltaik-Erzeugungsprofile

Für jeden Wetterdatensatz wird das photovoltaische (PV) Erzeugungsprofil im Vorfeld der experimentellen Untersuchung simuliert. Die PV-Last wird nach einem isotropen Himmelsstrahlungsmodell von Shukla et al. (2015) auf Basis der horizontalen Bestrahlungsstärke, der PV-Fläche (20 m²), des Neigungswinkels (60°) und des Wirkungsgrads der PV-Module (17,89 %) und des Wechselrichters (95 %) berechnet.

Die daraus resultierenden PV-Erzeugungsprofile sind in Abbildung 3 mit Maximalwerten von bis zu 3,8 kW zu sehen. Die Gesamtmenge der PV-Erzeugung innerhalb des Zeitraums von fünf Tagen beträgt 62,9 kWh, 51,7 kWh bzw. 46,7 kWh für das gemessene, das WFS- und das WFC-Wetterdatenprofil.

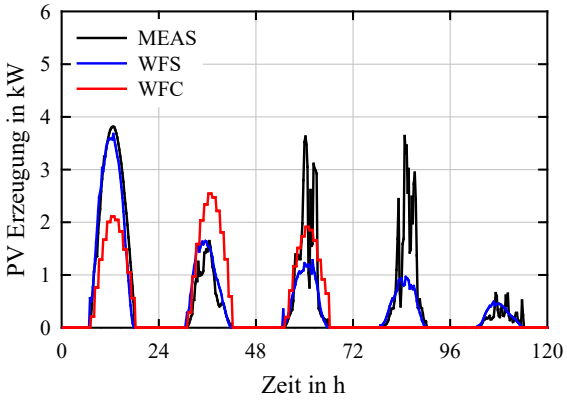

Abbildung 3 - Photovoltaik-Erzeugungsprofile für die drei betrachteten Wetterdatensätze.

Haushaltslastprofil

Sowohl für die Simulationsstudie als auch für die experimentellen Untersuchungen ist ein Haushaltslastprofil maßgebend. In Kombination mit der PV-Erzeugung kann ein Überschuss an elektrischer Energie im Gebäude entstehen. Dies ermöglicht es dem Regler, die Wärmepumpe flexibel und dynamisch zu betreiben oder den Batteriespeicher zu beladen. Das Haushaltslastprofil basiert auf Messdaten eines der Gebäude auf „Herzo Base“, an dem auch das gemessene Wetterprofil aufgenommen wurde. Die Zeitspanne ist identisch mit der des Wetterprofils. Das Haushaltslastprofil und das PV-Erzeugungsprofil für den gemessenen Wetterdatensatz sind in Abbildung 4 ersichtlich. Der Gesamtverbrauch des Haushaltes beträgt 48,1 kWh mit einer Grundlast von ca. 0,2 kW.

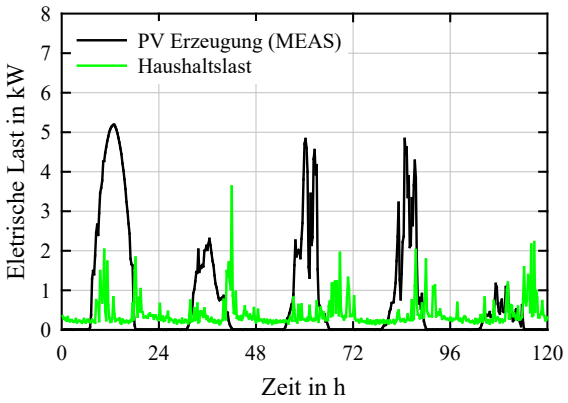

Abbildung 4 - Haushaltslast- und PV-Erzeugungsprofil.

Hardware-in-the-Loop Prüfstand

Die experimentelle Studie wird auf einem Hardware-in-the-Loop (HiL)-Prüfstand durchgeführt, der mehrere Wärmeerzeugungseinheiten mit verschiedenen thermischen Energiespeichersystemen (TES) und einem batterieelektrischen Speicher (BESS) kombiniert. Der Heizwärmebedarf und die Quelltemperatur der Wärmepumpe werden emuliert.

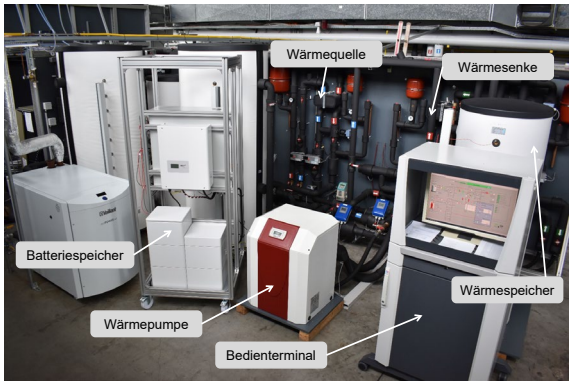

Abbildung 5 - HiL-Prüfstand für innovative Heizsysteme an der TH Nürnberg.

In dieser Studie wird eine Sole/Wasser-Wärmepumpe (WP) in Kombination mit einem 500 Liter TES eingesetzt. Die WP hat eine Standard-Heizleistung von 10,9 kW und eine elektrische Leistungsaufnahme von 2,2 kW in ihrem Betriebspunkt B0/W35. Es wird ein Coefficient Of Performance (COP) von 4,9 erreicht. Der BESS besitzt eine nutzbare Kapazität von 8,64 kWh und eine maximale Be- und Entladeleistung von 6 kW. Der Prüfstand und seine Hauptkomponenten sind in Abbildung 5 ersichtlich. Ein hydraulisches Schema und die installierten Sensoren sind in Abbildung 6 dargestellt.

Damit die externe Regelstrategie (MPC) die WP ordnungsgemäß ein- und ausschalten kann, ohne vom internen WP-Regler übergangen zu

werden, wird der Rücklauftemperatursollwert auf 55 °C gesetzt. Quellenseitig werden nahezu konstante Temperaturen $T_{evap,FL}$ von 10 °C bereit gestellt.

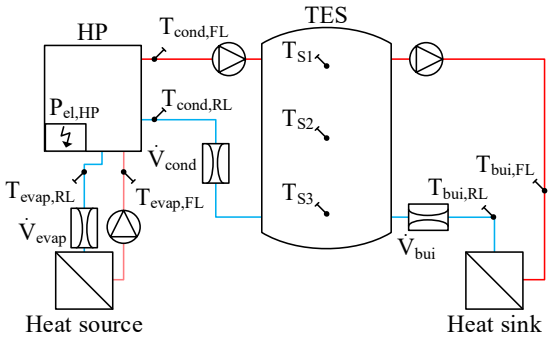

Abbildung 6 - Hydraulik- und Sensorschema des HiL-Prüfstandes.

Zur detaillierten Auswertung des thermischen Verhaltens der WP-Heizungsanlage sind im HiL-Prüfstand entsprechende Sensoren installiert (siehe Abbildung 6). Sowohl der abgehende Wärmebedarf als auch die abgegebene Wärmelast an den TES können separat bewertet werden. Die elektrische Leistung der WP als auch die Be- und Entladeleistung des BESS werden mit einem Energiezähler gemessen. Zusätzlich sind drei Temperatursensoren in gleichmäßigen Abständen über die Höhe im Inneren des TES installiert, um den Ladezustand (SoC) zu berechnen.

Systemmodell

Für die MPC ist ein Simulationsmodell des WP-Heizungssystems erforderlich, um den SoC des TES und BESS zu bewerten. Der SoC ist ein Hauptmerkmal jeder Regelungsstrategie, um den Betrieb der WP zu regulieren. Wie von Hummel et al. (2020) und Betzold & Dentel (2021) beschrieben, ist ein vereinfachtes Systemmodell bei häufigen Aktualisierungsintervallen ausreichend genau.

In Übereinstimmung mit Betzold et al. (2020) wird der TES als vollständig durchmischt angenommen. Er kann in der Systemrepräsentation des vereinfachten Systemmodells als ein einzelner Temperaturknoten dargestellt werden.

Die Heizleistung der WP wird als konstant angenommen und auf einen typischen mittleren Betriebspunkt eingestellt, der während der Voruntersuchungen und Experimente auftritt (B10/W40). Basierend auf Effizienzmessungen der Wärmepumpe am Prüfstand werden die Heizleistung und die elektrische Leistungsaufnahme im Betrieb der Wärmepumpe auf konstante Werte von 12,94 kW_{th} und 2,45 kW_{el} gesetzt.

Der BESS wird im vereinfachten Modell als ein einzelner Bilanzknoten dargestellt. Auf Grundlage von Effizienzmessungen wurden leistungsabhängige Umwandlungswirkungsgrade bestimmt, welche sich jedoch nicht linear verhalten und mit dem implementierten Optimierungsalgorithmus nicht korrespondieren. Für die Be- und Entladewirkungsgrade wurden daher jährliche Mittelwerte in Höhe von 0,897 und 0,892 angenommen.

Modellprädiktive Regelung

In dieser Untersuchung wird ein Optimierungsalgorithmus der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung (MILP) verwendet (siehe Betzold et al., 2020), der auf dem beschriebenen vereinfachten Systemmodell basiert. Die MPC ist in MATLAB realisiert. Die Betriebsgrenzen sind durch eine minimale und maximale Speichertemperatur von 25 °C bzw. 45 °C sowie durch die vollständige Deckung der thermischen und elektrischen Last definiert. Die Kostenfunktion basiert auf den Betriebskosten für die Haushaltslast, die elektrische Leistung der Wärmepumpe und die PV-Erzeugung aufgeteilt nach Netzeinspeisung, Netzbezug, Batteriebezug oder PV-Eigenverbrauch. Die angenommenen Preise sind in Tabelle 1 aufgeführt. Der Preis für den PV-Eigenverbrauch beinhaltet Steuern und Versicherungen. Die Batteriebezugskosten ergeben sich aus dem PV-Preis mit Aufschlag des Wirkungsgrades der Batterie von ca. 90 %.

Tabelle 1 - Für die MPC-Kostenfunktion verwendete Strompreise.

Strompreis	**Preis in € / kWh**
Netzbezug	0.291
PV-Eigenverbrauch	0.02
Batteriebezug	0.02*1.1
PV-Netzeinspeisung	-0.082

Der Optimierungshorizont wird auf 24 Stunden festgelegt, mit einem Optimierungszeitschritt und einem -intervall von jeweils 15 Minuten. Somit wird die MPC alle 15 Minuten mit aktuellen Startbedingungen neu gestartet, um einen aktualisierten Betriebsplan zu generieren. Da der Optimierungshorizont auf 24 Stunden festgelegt ist und die Wetterprofile einen Zeitraum von fünf Tagen abdecken, können die Experimente und Simulationen nur vier aufeinanderfolgende Tage (96 Stunden) andauern.

Bewertungsmetrik

Eine Bewertung der experimentellen Untersuchung findet auf Grundlage von aussagekräftigen Kennzahlen statt, welche nachfolgend erläutert werden.

PV-Eigenverbrauch: Der Anteil der PV-Erzeugung, der direkt im Gebäude verbraucht wird (Haushalts- oder Wärmepumpenstrom).

Autarkiegrad: Der Anteil des gesamten elektrischen Energiebedarfs des Gebäudes, der durch die PV-Erzeugung und elektrischer Energie aus dem BESS gedeckt werden kann.

Betriebskosten: Die Betriebskosten ergeben sich aus den Anteilen von PV-Direktverbrauch, Batterieentladung, Netzbezug und PV-Einspeisung. Die Energiepreise sind in Tabelle 1 aufgetragen.

Validierung

In einer Untersuchung von Hummel et al. (2022) wurden Messergebnisse aus Experimenten mit unterschiedlichen Regelungsstrategien zu einem simulierten Anlagenbetrieb abgeglichen, um die Methodik am Laborprüfstand zu validieren. Neben der MPC (ideal) wurden eine PV-Eigenverbrauchsoptimierte (PVC) und eine wärmegeführte Regelungsstrategie (HC) sowohl in MATLAB als auch im Laborprüfstand implementiert. Die Autoren schlussfolgerten eine qualitativ hohe Übereinstimmung zwischen den Labormessergebnissen und der Simulation, wodurch die Methodik und Funktionalität des Prüfstandes bestätigt werden konnten.

Daher wurde in diesem Beitrag die Abbildung der verschiedenen Regelungsstrategien nur simulativ bewertet. Hierfür wurde der Betrieb der MPC, PVC und HC über vier Tage mit dem Heizbedarfsprofil des Gebäudes SFH60 und des gemessenen PV-Profils abgebildet. Zusätzlich zur vorangegangenen Untersuchung von Hummel et al. (2022) wurde der BESS in die Simulation integriert. Die Ergebnisse zeigen gute Einsparpotentiale beim Einsatz einer MPC. Die Betriebskosten belaufen sich auf 4,47 €, wohingegen Kosten in Höhe von 4,73 € und 5,06 € beim Einsatz einer PVC bzw. HC entstehen. Im Vergleich zur HC sind die Betriebskosten einer PVC um 6,5 % und der MPC um 11,6 % geringer.

Experimente

Es werden drei experimentelle Messungen auf dem HiL-Prüfstand durchgeführt, um den Einfluss der Wettervorhersagequalität auf die MPC und damit auf die Leistung des WP-Heizsystems zu untersuchen. Der verwendete MPC-Algorithmus verwendet die Lastprofile, die sich entweder aus dem perfekten Wetterdatensatz (MEAS), dem hochwertigen WFS-Profil oder dem ausreichenden WFC-Profil ergeben. Die Messungen erstrecken sich über einen Zeitraum von je vier Tagen.

Im Allgemeinen können mit der idealen MPC und dem perfekten Wetterdatensatz (MEAS) die höchsten Effizienzkennzahlen in den Experimenten erreicht werden. So werden für den PV-Eigenverbrauch als auch für den Autarkiegrad Höchstwerte durch die ideale MPC von 77,5 % und 74,4 % ermittelt (siehe Abbildung 7). Mit zunehmender Verschlechterung der Wettervorhersagegüte sinken beide Metriken signifikant ab. Für den noch hochwertigen WFS-Datensatz sinkt der Eigenverbrauch um 16,4 Prozentpunkte auf 61,1 % und der Autarkiegrad um 16,7 Prozentpunkte auf 57,7 % ab. Ähnliche aber leicht erhöhte Werte können im Vergleich hierzu beim ausreichenden WFC-Datensatz berechnet werden. Betrachtet man die entstehenden Betriebskosten so ist ein klarer Verlauf hin zu steigenden Kosten bei geringerer Wettervorhersagegüte erkennbar. Die Betriebskosten für den 4-tägigen Betrieb steigen von 5,72 € bei perfekten auf bis zu 8,44 € bei ausreichenden Wettervorhersagedaten an. Dies entspricht einer Kostensteigerung um bis zu 48 %.

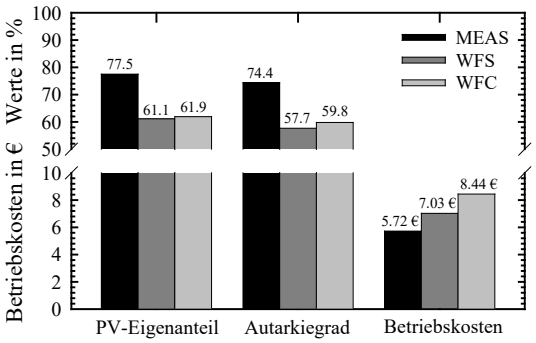

Abbildung 7 - Bewertungsmetriken der drei Wetterdatensätze im Vergleich.

Ein Bewertungskriterium des BESS sind sogenannte „Fehlladungen“, welche sich erheblich auf die Betriebskosten auswirken. Die Be- oder Entladeleistung des BESS wird durch den optimierten Fahrplan der MPC für die Zeitschrittweite von 15 Minuten festgelegt. So können sich elektrische Lasten einstellen, welche den BESS aus dem Stromnetz beladen oder in das Stromnetz entladen. In Abbildung 8 sind die kumulierten Fehlladungen des BESS für die drei Wetterdatensätze aufgetragen. Es ist eine deutliche Tendenz hin zu höheren fehlerhaften Be- oder Entladevorgängen bei minderwertigeren Wetterdatensätzen erkennbar. Die Beladung des BESS aus dem Netz beträgt bei einem perfekten Wetterdatensatz (MEAS) rund 0,5 kWh und für das qualitativ ausreichende Profil (WFC) ca. 8,7 kWh. Fehlladungen in das Stromnetz sind zwar vorhanden, fallen im Verhältnis zur Beladung aber deutlich geringer aus. So konnte eine maximale Entladung in das Stromnetz von 1,8 kWh für den ausreichenden WFC-Datensatz ermittelt werden.

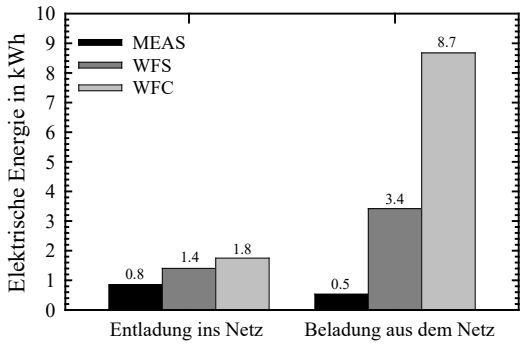

Abbildung 8 – Fehlladungen des Batteriespeichers durch Energieaustausch mit dem Netz.

Die Fehlladungen des BESS können auf zwei Hauptursachen zurückgeführt werden: die allgemeine Verringerung der Vorhersagegüte und modellbedingte Fehlerursachen. Erstere ist für mehr als 90 % der Fehlladungen verantwortlich. Die Entladung ins Netz kann weiterhin durch die Annahme einer konstanten elektrischen Leistungsaufnahme des Verdichters der Wärmepumpe erklärt werden. Da die elektrische Verdichterleistung mit steigendem Temperaturniveau während des Beladevorganges des TES zunimmt, kann der Sollwert der Batterieentladung zu Beginn höher sein, als der tatsächliche Verbrauch, was zu einer Einspeisung ins Stromnetz führt.

Realer Betrieb

Um die Regelungsstrategien im realen Betrieb zu testen, wird die MPC in einem Energiesystem von acht Reihenhäuser implementiert. Simulativ und im realen Betrieb wurden bereits verschiedene MPC-Ansätze getestet, die zu ähnlichen Ergebnissen kamen (Betzold & Dentel, 2021). Die zwei MPC-Ansätze mit Optimierungsalgorithmus MILP und GA werden in den Reihenhäusern betrieben. Sie unterscheiden sich hauptsächlich durch verschiedene Modelltiefen und Rechenzeiten.

Im realen Betrieb der prädiktiven Regelungen wird die MPC zu einem bestimmten Zeitpunkt in MATLAB gestartet. Die MPC-MILP startet stündlich, die MPC-GA nur zweimal am Tag um 12 Uhr und 0 Uhr. Der erstellte Betriebsplan wird über eine SQL-Datenbank an die Steuerung der WP weitergereicht. Gleichzeitig wird der Betrieb der Anlage auf Störungen und Abweichungen vom Betriebsplan geprüft und setzt ggf. Sollwerte zum Ein- oder Ausschalten. Dadurch wird die Betriebssicherheit im Zeitfenster der nächsten Sollwerte sichergestellt. In früheren Arbeiten von Betzold & Dentel (2022) sowie Betzold & Dentel (2021) wurde der MPC-Ablaufprozess bereits erfolgreich getestet und stellte sich als betriebssicher heraus.

Für die Auswertung wurden die MPC-MILP und MPC-GA über mehrere Wochen betrieben, sodass ein direkter Vergleich aufgrund der kurzen Zeitspanne und der unterschiedlichen Randbedingungen (z. B. Wetter oder Nutzerverhalten) nicht möglich ist. Um einen Eindruck von der Regelungsstrategie zu erhalten, werden Kennwerte aus der Sollvorgabe (Simulation) und aus Messwerten aus dem realen Betrieb der MPC gegenübergestellt.

Der MPC-MILP Betrieb erfolgte über fast sechs Wochen vom 08.03. bis 23.04.2022. Hinsichtlich der PV-Erzeugung wurde real 7,1 % mehr PV-Strom erzeugt. Gleichzeitig wurde 7,0 % mehr Energie verbraucht. Der Gewinn, der sich durch die Verbrauchskosten und Einspeisungsvergütung ergibt, ist real nur etwa halb so groß wie in der Simulation.

Der MPC-GA Betrieb erfolgte über fast neun Wochen vom 29.04. bis 06.07.2022. Die PV-Erzeugung weicht real um 1,4 % ab und der Energieverbrauch deutlich um 48,0 %. Auch hier ist der Gewinn aus Verbrauchskosten und Einspeise-vergütung nur etwa halb so hoch.

Beide MPC Betriebsphasen zeigen unterschiedliche und zum Teil sehr deutliche Abweichungen von Simulation und Messung. Dementsprechend unterscheiden sich auch deutlich die Betriebskosten / Gewinne. In beiden Fällen ist der Gewinn nur halb so hoch wie in der Simulation. Ausschlaggebend sind hierfür die Prognosegüte sowie Steuerbarkeit der WP. Die prognostizierte PV Erzeugung und Lastprognosen basieren auf einer Internetwettervorhersage, die, wie in den Laborexperimenten gezeigt, einen erheblichen Einfluss nehmen kann. Des Weiteren können die Ergebnisse aus der Simulation, die Leistungswerte darstellen, nicht direkt an die Wärmepumpen übergeben werden. Da die Sollwertvorgaben nur in Form von Sollwerttemperaturen an die reale Wärmepumpensteuerung übertragen werden können, kann der Betriebsplan nicht vollständig umgesetzt werden. In der Messung zeigt sich eine Arbeitszahl von 4.0 / 4,1 im Vergleich zur Simulation von 4.9 /5.0.

Zusammenfassung

Der Einfluss der Wettervorhersagegüte auf ein PV-unterstütztes und durch ein MPC gesteuertes WP-Heizsystem wurde sowohl in Simulationen, Laborexperimenten als auch in einem Reallabor untersucht. Es stehen hierfür gemessene und Wetterdaten von zwei unterschiedlichen Bezugsquellen zur Verfügung.

Die Ergebnisse der Labormessungen zeigen, dass der PV-Eigenverbrauch bei fehlerbehafte-

ten Wettervorhersagen im Vergleich zu einer perfekten MPC um bis zu 20 % niedriger ausfällt. Dabei steigen die Betriebskosten um bis zu 48 % an. Der Batteriespeicher hat bei nur ausreichend hoher Wettervorhersagegüte eine 17-fach höhere Fehlladung aus dem Netz und eine 2-fach höhere in das Stromnetz gezeigt. Die Labormessungen zeigten auf, dass je höher die Wettervorhersagegüte ist, desto höher ist im Allgemeinen auch die Systemeffizienz.

Im realen Betrieb der MPC in einem Reihenhauskomplex zeigen sich unterschiedliche und zum Teil sehr deutliche Abweichungen von Simulation und Messung. Dementsprechend unterscheiden sich auch deutlich die Betriebskosten bzw. der Gewinn, der nur halb so hoch ist wie in der Simulation. Ausschlaggebend sind hierfür die Prognosegüte sowie die Übertragung der Sollwerte aus der Simulation an die Wärmepumpen aufgrund von Limitierungen in der Steuerung.

Danksagung

In diesem Beitrag werden Ergebnisse aus den Projekten „sEnSys“ (FKZ 03EN1053A), "Herzo Base" (FKZ 03ET1364A) und "Herzo Opt" (FKZ 03ET1641A) vorgestellt. Diese Projekte werden / wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Literatur

Allen J., Halberstadt A., Powers J., El-Farra N. H. Supervisory Model Predictive Control of Flexible Building Loads with On-site Solar Generation. Proceedings of the Annual American Control Conference, Milwaukee, USA. 2018;4622–4627.

Bechtel S., Rafii-Tabrizi S., Scholzen F., Hadji-Minaglou J.-R., Maas S. Influence of thermal energy storage and heat pump parametrization for demand-side-management in a nearly-zero-energy-building using model predictive control. Energy and Building. 2020;226.

Betzold C., Dentel A. Comparison and implementation of MPC and simple predictive control into a heat pump system. REHVA 14th HVAC World Congress Clima, 22nd – 25th May 2022, Rotterdam, The Netherlands. 2022.

Betzold C., Bordin S., Dentel A., Harhausen G. Control strategies for modulating heat pumps in a plus energy building. 13th IEA Heat Pump Conference, Jeju, Korea. 2020, May;11-14.

Betzold C., Dentel A. Evaluation and test operation of different model predictive control approaches for an energy system. The 17th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2021, Bruges, Belgium. 2021.

Fischer D., Bernhardt J., Madani H., Wittwer C. Comparison of control approaches for variable speed air source heat pumps considering time variable electricity prices and PV. Applied Energy. 2017;204:93–105.

Heimrath R., Haller M. Project Report A2 of Subtask A: The Reference Heating System, the Template Solar System. Task 32, Solar Heating and Cooling Programme, International Energy Agency (IEA). 2007

Hummel S., Betzold C., Kandasamy K., Bordin S., Dentel A. Experimentelle Validierung von Simulationsmodellen an einem Hardware-in-the-loop Wärmepumpenprüfstand. The 8th Conference of IBPSA Germany and Austria, Graz, Austria. 2020.

Hummel S., Betzold C., Dentel A. Impact of the Weather Forecast Quality on a MPC-driven Heat Pump Heating System. CLIMA 2022, REHVA 14th HVAC World Congress, Rotterdam, The Netherlands. 2022.

Löhr Y., Mönnigmann M. Receding horizon heat flow control in domestic buildings- Yesterday-based disturbance predictions. Proceedings of the European Control Conference (ECC), Limassol, Cyprus. 2018;404–409.

Mendoza-Serrano D. I., Chmielewski D. J. Smart grid coordination in building HVAC systems: EMPC and the impact of forecasting. Journal of Process Control. 2014;24:1301–1310.

Péan T., Bellanco I., Salom J. Impact of the weather forecast on a predictive controller performance: experimental studies with a residential heat pump for space cooling. 13th IEA Heat Pump Conference, Jeju, Korea. 2020, May;11-14.

Péan T., Salom J., Costa-Castelló R. Review of control strategies for improving the energy flexibility provided by heat pump systems in buildings. Journal of Process Control. 2019;74:35–49.

Pichler M., Heinz A., Rieberer R. Model predictive heat pump- and building control to maximize PV-power on site use. 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam, Netherlands. 2017.

Shukla K., Rangnekar S., Sudhakar K. Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for Bhopal, India. Energy Reports. 2015;1:96-103.

Thieblemont H., Haghighat F., Ooka F., Moreau A. Predictive control strategies based on weather forecast in buildings with energy storage system: A review of the state-of-the art. Energy and Building. 2017;153:485–500.