

Smarte Gebäude im Energiesystem

Der Gebäudesektor trägt mehr als 36 % zum Endenergieverbrauch Deutschlands bei. Dieser Anteil wird im Wesentlichen durch die Energie für Wärme und Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden bestimmt. In diesem Segment ist die Energiewende noch nicht weit vorangeschritten, sodass ein Großteil dieses Energieverbrauches derzeit noch aus fossilen Energieträgern gedeckt wird. Neben energetischen Sanierungsmaßnahmen bietet ein effizienter Betrieb der Gebäudetechnik großes Potenzial zur Senkung des Energieverbrauches.

In diesem Beitrag werden aktuelle Forschungsansätze vorgestellt, die aufzeigen, welche Potenziale die Digitalisierung bietet, den Gebäudeenergieverbrauch zu senken, den Nutzer mit einzubeziehen und wie das Gebäude dem Energiesystem dienlich sein kann.

Welchen Beitrag kann die Digitalisierung zur Reduzierung der CO₂-Emissionen der Gebäudeenergieversorgung leisten?

Gebäudeenergieversorgungssysteme werden zunehmend komplex, insbesondere, wenn dabei erneuerbare Versorgungskonzepte umgesetzt werden sollen. Aber auch schon herkömmliche Gaskessel und Wärmepumpen bieten zunehmende Möglichkeiten der Parametrierung. Werden diese Geräte nicht den Anforderungen im Gebäude angepasst, kann dies zu einem ineffizienten Gebäudebetrieb und somit zu einem erhöhten Energieverbrauch führen. Um solche Fehleinstellungen identifizieren zu können, ist ein kontinuierliches Monitoring dieser Systeme notwendig, denn auch die Anforderungen im Gebäude können sich im Laufe der Zeit ändern.

Das Internet der Dinge (Internet of Things, IoT) und der digitale Gebäudewilling (Building Information Modeling, BIM) sind die nächsten Stufe bei der Betriebsführung von Gebäuden. Diese Technologien ermöglichen es, zusätzliche Informationen über den Zustand von Anlagen kontinuierlich zu erfassen, zu kommunizieren und digital zu verwalten. Sie haben das Potenzial, mehr Transparenz in die zunehmende Komplexität der Gebäudeversorgung zu bringen und die Anforderungen hinsichtlich Komfort und Energieeffizienz besser zu erfüllen. Sie sind auch die Lieferanten von hochaufgelösten Messdaten und von Metadaten für innovative Analyse- und Diagnosemethoden. Somit können Verfahren aus

dem Bereich des maschinellen Lernens, die den Betrieb von Anlagen und Komponenten kontinuierlich überwachen, trainiert und angewandt werden. Im Betrieb der Anlagen werden folglich Fehler und suboptimale Betriebszustände zeitnah erkannt und frühzeitig mit allen für eine Behebung des Problems relevanten Informationen über geeignete Benutzerschnittstellen und Webplattformen bereitgestellt.

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Projekts OBserve (www.ob-serve.de) hat das Fraunhofer ISE eine selbstlernende Methode auf Basis von qualitativen Modellen für die Fehlererkennung in gebäudetechnischen Anlagen entwickelt. In Zusammenarbeit mit einem deutschen Gebäudeautomationshersteller wurde diese Methode zur Überwachung einer bestehenden Heizungsanlage erfolgreich eingesetzt. Qualitative Modelle beschreiben das dynamische Verhalten von Systemen näherungsweise und können durch einen stochastischen Automaten dargestellt werden. Dieser beschreibt die Wahrscheinlichkeiten, mit denen das System von einem Zustand in den nächsten wechselt. Bei richtig trainierten Modellen weisen unwahrscheinliche Zustandsänderungen auf einen möglichen Fehlbetrieb der Anlage.

Nach Erreichen eines fehlerfreien Betriebs ermöglichen modellprädiktive Regelungsstrategien, die Anlagen vorausschauend auf Basis von detaillierten Wetter-, Belegungs- und Netzbelastungsprognosemodellen zu regeln und somit ein technisch-wirtschaftliches Optimum zu erreichen. Eine solche prädiktive Steuerung wurde im Energy Efficiency Center des ZAE Bayern umgesetzt: Für die Kältebereitstellung wird eine Passive Infrarote Kühlung (PINC) zur Klimatisierung der Büroräume über Kühldecken eingesetzt. Hierbei wird Kälte bereitgestellt indem Wasser in der Nacht auf dem Dach verrieselt wird und seine Wärme durch Strahlung, Konvektion und Verdunstung an die Umgebung abgibt. Eine einfache Betriebsstrategie für dieses System wäre eine regelbasierte Steuerung (RBC). Sie stellt Kälte bereit, sobald die Solltemperatur des Kältetanks überschritten ist und unterbindet eine Verrieselung bei Sonneneinstrahlung sowie wenn die Pumpleistung größer als die zu erreichende Kälteleistung ist. Zur Optimierung wurde hier eine modellprädiktive Regelung (MPC) eingesetzt, die weitere Faktoren, wie den Kältebedarf der letzten Tage, mit entsprechenden Wetterdaten korreliert sowie die Wetterprognose für die Zukunft mit einbezieht. Durch die prädiktive Regelung wird die benötigte Kältemenge



ISFH

Dr. Tobias Ohrdes
ohrdes@isfh.de

DBFZ

Daniel Büchner
daniel.buechner@dbfz.de
Henryk Haufe
henryk.haufe@dbfz.de

DLR

Marco Zobel
marco.zobel@dlr.de

Fraunhofer IEE

Jan von Appen
jan.vonappen@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE

Nicolas Rehault
nicolas.rehault@ise.fraunhofer.de

Jülich

Dr. André Xhonneux
a.xhonneux@fz-juelich.de

KIT

Prof. Andreas Wagner
wagner@kit.edu

ZAE Bayern

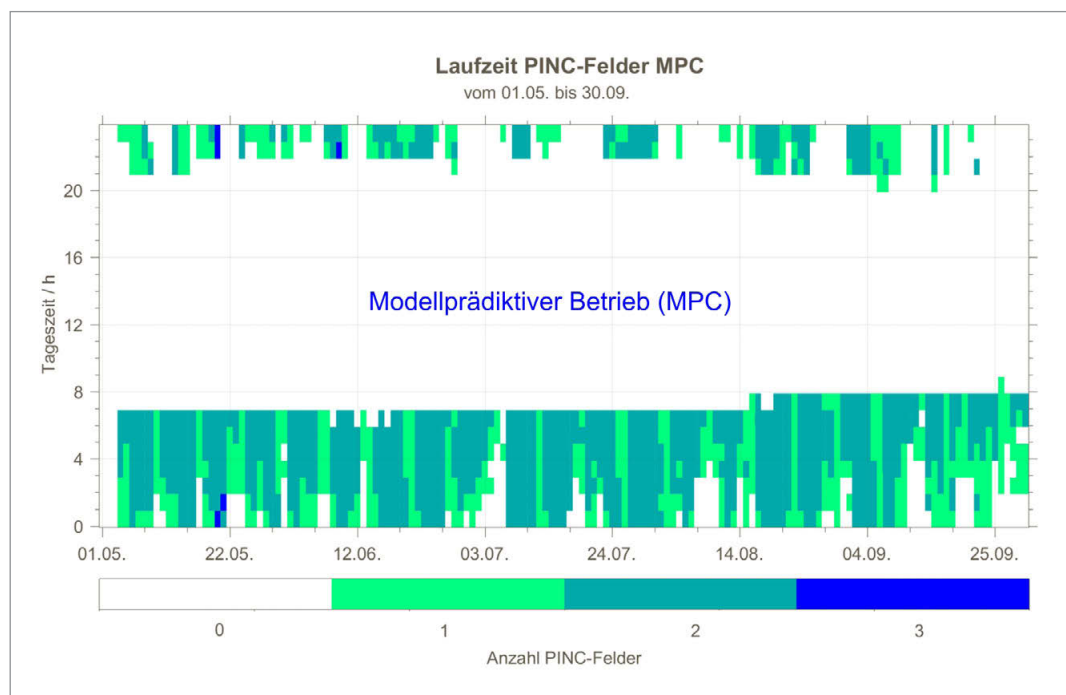
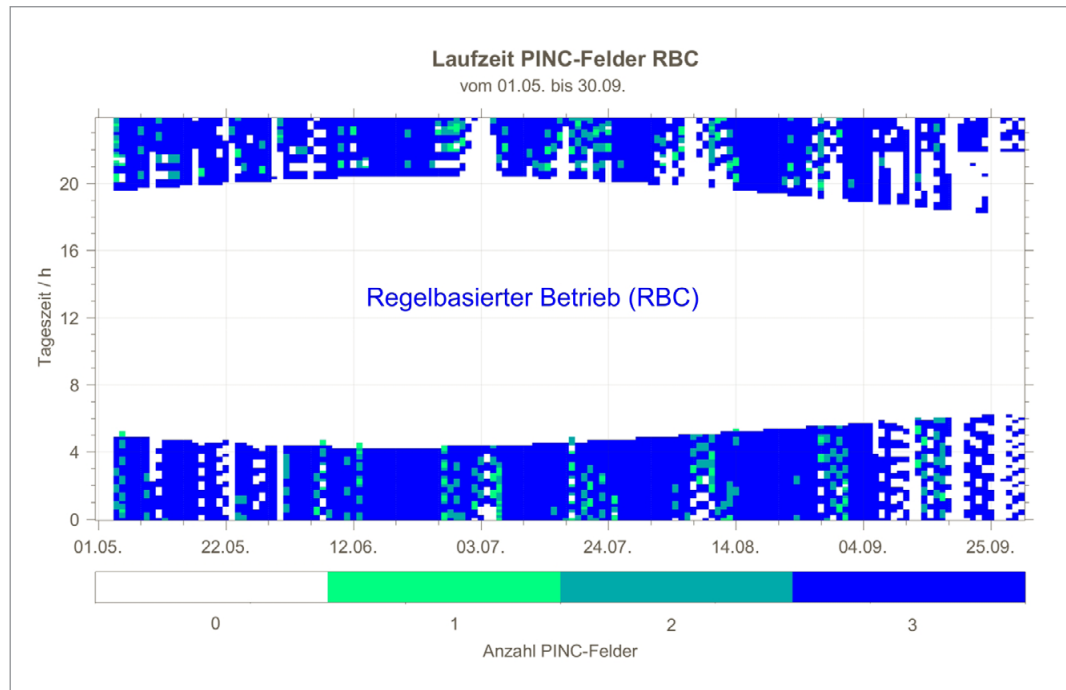
Dr. Bastian Büttner
bastian.buettner@zae-bayern.de

prognostiziert, so dass die Bereitstellung dementsprechend reduziert werden kann – ohne dass es zu Komforteinbußen kommt. Zugleich kann die reduzierte Kältemenge flexibel zu solchen Zeiten erzeugt werden, an denen besonders günstige Verhältnisse für das regenerative Kältesystem auftreten.

► **Abbildung 1a** zeigt die Ergebnisse einer Co-Simulationen mit den Simulationstools MATLAB und TRNSYS, die das Gesamtsystem aus Verbraucher, Schichtspeicher und Kälteerzeugung einbezie-

hen, für eine ausgewählte Sommerperiode. Wie in ► **Abbildung 1b** ersichtlich, kann durch Verwendung der modellprädiktiven Regelung der effektive Volumenstrom bzw. die Anzahl der durchströmten PINC-Felder im Vergleich zur RBC reduziert und somit Strom für Pumpen eingespart werden. Dadurch kann eine relevante Systemkennzahl, die „Seasonal Energy Efficiency Ratio“ (SEER) von 8,9 auf 15,0 gesteigert wird, sodass das Gesamtsystem die Energie bei gleicher Performance für den Nutzer um ca. 70% effizienter nutzt.

Abbildung 1
Rasterdiagramme
 mit Tageszeit/Datum als
 Ordinate bzw. Abszisse:
 farbkodiert ist der
 effektive Volumenstrom
 für den
 a) regelbasierten
 Kühlbetrieb und
 b) modellprädiktiven
 Kühlbetrieb
 in den Sommermonaten.
 Der effektive Volumen-
 strom korreliert mit der
 Anzahl verwendeter
 PINC-Felder. Je geringer
 der notwendige
 Volumenstrom ist, desto
 weniger Hilfsenergie
 wird für die Pumpen
 benötigt.



Nutzer im smarten Gebäude

Viele Untersuchungen zeigen, dass die Nutzer den Energieverbrauch von Gebäuden entscheidend beeinflussen. Dabei spielen – neben der Nutzung von Geräten (z. B. Haushaltsgeräte, IT-Ausstattung) und technischen Anlagen (Aufzüge u. a.) – besonders komfortbedingte Handlungen der Nutzer eine bedeutende Rolle. So wird z. B. der Energieaufwand zur Raumkonditionierung zu einem großen Anteil durch die Bedürfnisse und Erwartungen der Nutzer beeinflusst. Unzureichende Kenntnisse über die Bedürfnisse und das Verhalten der Nutzer führen in der Praxis jedoch häufig dazu, dass eine große Differenz zwischen prognostizierten und tatsächlich gemessenen Energiekennzahlen auftritt. Um diesen sogenannten „Performance Gap“ zu minimieren, muss das Komfortempfinden und das Nutzerverhalten besser verstanden werden. Dazu stehen immer mehr Daten aus der Gebäudeautomation oder personenbezogenen Geräten (z. B. Smart Watch) zur Verfügung, die zur Modellierung des Nutzerverhaltens und dessen Vorhersage herangezogen werden können. Diese Prognosen können sowohl bei der Gebäudeplanung, als auch im Gebäudebetrieb verwendet werden.

Eine Maßnahme besteht z. B. darin, dem Nutzer in Echtzeit Handlungsvorschläge zur Optimierung von Komfort und Energieverbrauch zur Verfügung zu stellen.

In einem Laborexperiment am KIT konnte so gezeigt werden, dass der Nutzerkomfort durch den individuellen Zugang zu einem Deckenventilator deutlich gesteigert werden kann. Die Abbildung dieses Verhaltens in einer Gebäudesimulation zeigt, dass die Anzahl der Stunden mit Raumtemperaturen außerhalb des Komfortbereichs über das Jahr etwa halbiert werden kann. Aktuelle Forschungsarbeiten – international u. a. verankert im IEA EBC und Annex 79 – umfassen experimentelle Arbeiten zu Komfortempfinden und Nutzerverhalten, neue Ansätze zur Modellierung auf Basis von Big Data-Methoden sowie die Implementierung der Modelle in digitale Planungswerkzeuge und Regelungs-/Automationssysteme in Gebäuden.

Neben einer adäquaten Abbildung des Nutzerverhaltens für Planung und Betrieb, bieten sich damit neue Möglichkeiten den Nutzer aktiv mit einzubinden und Transparenz hinsichtlich des Energieverbrauchs zu schaffen. Eine auf diese Weise verbesserte Nutzersensibilisierung ermöglicht somit eine bewusste Einbindung der Endverbraucher in die Energiewende.

Das Fraunhofer IEE hat in diesem Kontext verschiedene Konzepte entwickelt, Endverbraucher mittels Einsatz von Spiel-Design-Elementen zur Mitwirkung bei der Optimierung der Energieversorgung zu motivieren.

Das „Social Energy Management-Konzept“ (sema) kombiniert ein spielorientiertes Anreizkonzept („Gamification“) mit einer Social Community, um eine stärkere Flexibilisierung der Energienachfrage sowie Energieeinsparungen zu erreichen. Der Gamification-Ansatz belohnt die Endverbraucher für die Anpassung ihres Strombezugs an die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energie-Erzeugern (EE-Erzeuger), indem mehr Punkte für Stromverbrauch bei hoher EE-Erzeugung vergeben werden. In Zeiten geringer EE-Stromerzeugung können dagegen weniger Punkte gesammelt werden. Im Wärmebereich werden die Verbraucher durch optimiertes Heizverhalten mittels programmierbarer Heizkurven und Lüften zum Punktesammeln ange-regt. Die Wirksamkeit des sema-Konzepts wird im Rahmen eines Feldtests überprüft. Hierzu wurden 35 Haushalte mit verschiedenen Aktoren (z. B. Funk-Heizthermostate), Sensoren (z. B. Anwesenheitssensoren und Echtzeitstromverbrauchsmessung) und einer Energiemanagementsoftware, die auf der OGEMA-Plattform des Fraunhofer IEE aufsetzt, ausgestattet. So erhalten die Teilnehmer täglich eine neue Punktekurve, die auf Basis der EE-Erzeugungs- und einer Außentemperaturprognose erstellt wird. Die auf der sema-Plattform hinterlegten Algorithmen werten dann in Echtzeit aus, ob Verbrauchsänderungen stattgefunden haben und be-punkten diese entsprechend. Anschließend werden den Teilnehmern Rankings und individualisierte Energieauswertungen zur Verfügung gestellt. Aktuelle Feldtestauswertungen zeigen, dass das Bewusstsein der Verbraucher für einen EE-orientierten Stromverbrauch damit erhöht werden kann. Obwohl in einzelnen Stunden mit hohem sema-Level Verbrauchsverlagerungen von bis zu 50% identifiziert werden konnten, ist der generelle Ansatz maßgeblich durch die Anwesenheit der Verbrauch beeinflusst. Um die Flexibilität weiter zu erhöhen, werden aktuell vor allem größere Verbraucher, wie bspw. Wärmepumpen und E-Autos, optimiert und automatisiert in das sema-System eingefügt. Die Auswertung ergibt, dass durch die Kombination von automatischer Heizungssteuerung und spielerischem Wettbewerb Energieeinsparungen im Wärmebezug realisiert werden können. In einzelnen Haushalten konnte so der Wärmebedarf um bis zu 20% gesenkt werden.

Wie können smarte Gebäude dem Gesamtenergiesystem dienen?

Neben der Senkung des Energiebedarfs durch einen effizienten Gebäudebetrieb und angepasstes Nutzerverhalten können Gebäude durch Bereitstellung von Flexibilität auch dem Gesamtsystem dienen: Für die Transformation des Energiesystems hin zu erneuerbaren Energien ist es erforderlich, den Energiebedarf zeitlich an das EE-Angebot anzupassen bzw. weitere Speichermöglichkeiten zur Verfügung zu stellen. Gebäude bieten hier durch Kopplung des Wärme- und Stromsektors erhebliches Potenzial, fossile Brennstoffe im Bereich der Wärmeversorgung durch Strom aus erneuerbaren Energien zu ersetzen.

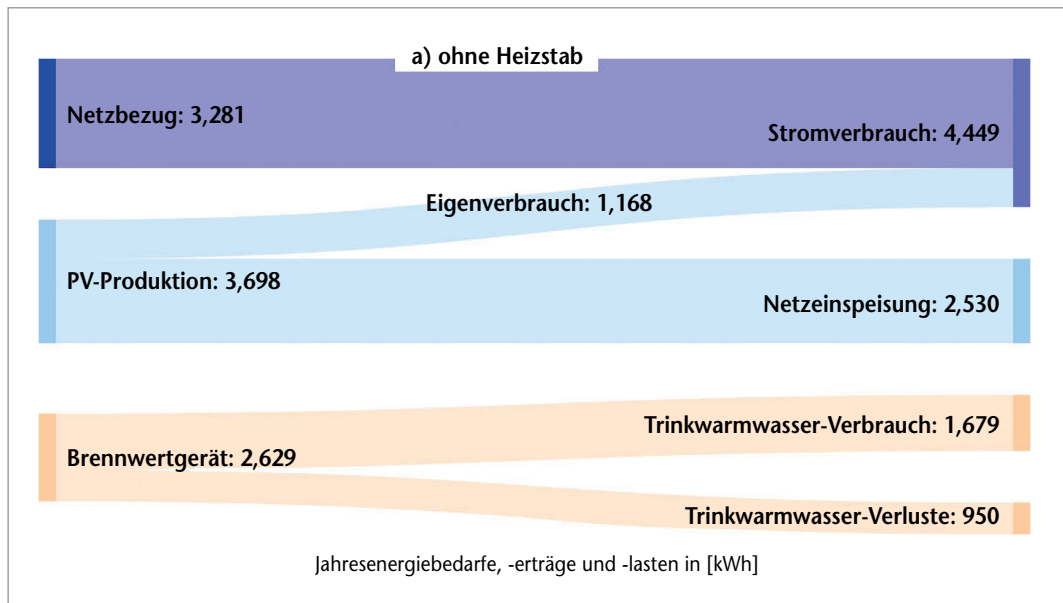
Eine mögliche Anwendung besteht in der Speicherung von Strom aus PV-Anlagen in thermischen

Speichern mittels einfacher elektrischer Heizstäbe solange kein weiterer elektrischer Energiebedarf besteht. Durch den Einsatz eines thermischen Speichers werden allerdings die Charakteristiken der Energiebezüge aus dem Strom- und Gasnetz deutlich verändert und sind schwieriger vorhersagbar. Dies gilt gleichermaßen für das thermische Verhalten des Gesamtsystems und die erreichbare Effizienz. Am DLR wurde daher ein Systembenchmark entwickelt, mit dem die erreichbaren Potenziale ermittelt werden können. Hierfür wurde ein Realaufbau realisiert, welcher alle Heizungskomponenten inkl. eines 200 l Trinkwasserspeichers und Simulatoren für Erzeuger und Lasten beinhaltet. Eigenentwickelte Zeitraffertests erlauben die Abbildung eines Jahresszenarios in 35 Tagen. Zum Vergleich sind die Energieflüsse der beiden Szenarien ohne und mit Heizstab in ► *Abbildung 2* dargestellt.

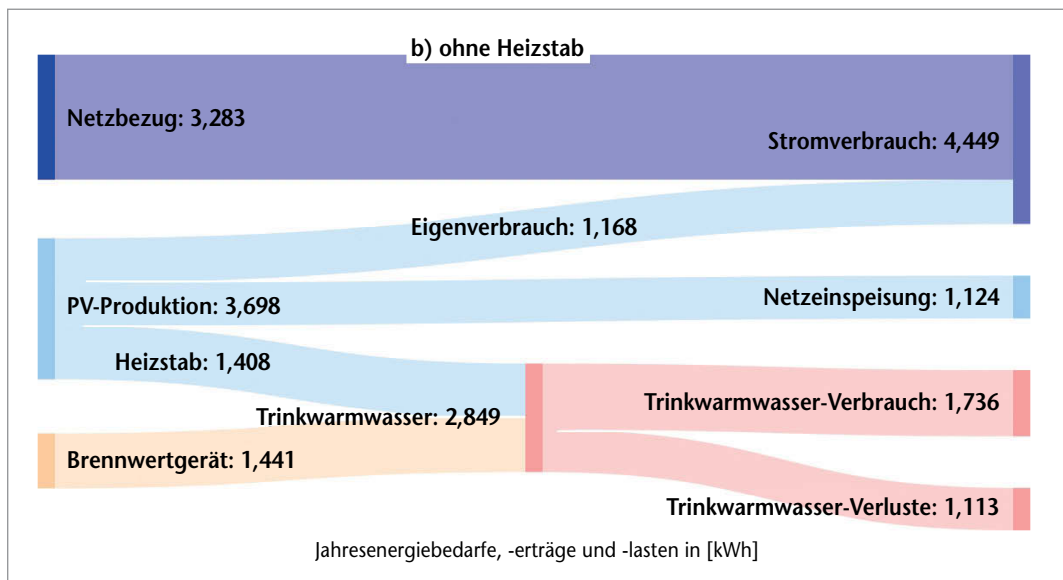
Abbildung 2

Energieflüsse eines Einfamilienhauses:

a) Der generierte PV-Strom wird direkt genutzt bzw. ins Netz eingespeist.



b) Ein signifikanter Anteil des Überschussstromes kann zur Trinkwassererwärmung mittels Heizstab genutzt werden.



Bereits mit dem bewusst einfach ausgeführten technischen Aufbau und konservativen Randbedingungen wurde im Testaufbau eine Reduzierung der Netzeinspeisung um 56% erreicht bei gleichzeitiger Absenkung des Gasverbrauches um 45%.

Die Nutzung von Photovoltaik-Strom für thermische Anwendungen beschränkt sich allerdings auf die Zeiträume mit hoher solarer Einstrahlung. Um auch in Zeiten geringer solarer Einstrahlung das elektrische Verteilnetz entlasten zu können, werden am DBFZ im Forschungsschwerpunkt SmartBiomass-Heat gezielt die verschiedenen Bausteine zukunftsfähiger Wärmeerzeuger auf Basis biogener Festbrennstoffe untersucht.

Ein Beispiel ist der bedarfsgerechte Einsatz dezentraler wasserführender Holzöfen als sektorübergreifende Flexibilitätsoption zur Vermeidung kurzfristiger Bedarfsspitzen im Strom- oder Gasnetz. So muss beispielsweise in Zeiten geringer erneuerbarer Stromproduktion nicht auf Strom zurückgegriffen werden. Durch den Einsatz zusätzlicher Stromerzeugungstechnologien, wie beispielsweise thermoelektrische Generatoren, lassen sich zusätzliche positive Effekte erzielen. Neben der langfristigen Mobilisierung der Nutzer stellen die einfache und fehlerfreie Inbetriebnahme sowie die Kommunikation zwischen den verschiedenen Anlagenkomponenten die größten Hürden bei solchen komplexen Versorgungskonzepten dar. Schwerpunkt der aktuellen Forschung ist daher neben der Komponentenentwicklung auch die Regelungsentwicklung sowie die Standardisierung von Schnittstellen.

Eine wichtige Rolle in der Energiewende spielt die Wärmepumpe (WP): Sie ermöglicht unter Nutzung von Wärme aus der Luft oder dem Erdboden die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser. Hierbei werden bei aktuellen Geräten aus einer Kilowattstunde Strom etwa 3-5 Kilowattstunden Wärme erzeugt. Wenn dieser Strom auch aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden kann, lässt sich ein Großteil fossiler Brennstoffe im Gebäudebereich ersetzen. Stromerträge aus Wind- und Solarenergie weisen zwar jeweils eine starke saisonale Abhängigkeit auf, diese ergänzen sich aber im Monatsmittel im Jahresverlauf sehr gut, wie in ► *Abbildung 3* dargestellt. Die Fragen, zu welchem Anteil der Strom aus erneuerbaren Quellen aber zu jedem Zeitpunkt des Jahres gedeckt werden kann und welchen Einfluss eine flächendeckende Verbreitung von Wärmepumpen auf die Stromnetze hat, werden am ISFH im Projekt Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartieren (www.wpuq.de) untersucht.

In zwei Quartieren werden in ca. 50 Gebäuden Messungen der elektrischen Leistungen von WP- und Haushaltslasten mit einer zeitlichen Auflösung von bis zu einer Sekunde durchgeführt. Gleichzeitig werden die regional erzeugte erneuerbare Energie (Wind- und Sonnenstrom) erfasst und Messungen am Ortsnetztransformator durchgeführt. Auf diese Weise wird zu jedem Zeitpunkt bestimmt, wie viele Wärmepumpen gleichzeitig laufen und wie hoch die erneuerbare Deckung ist.

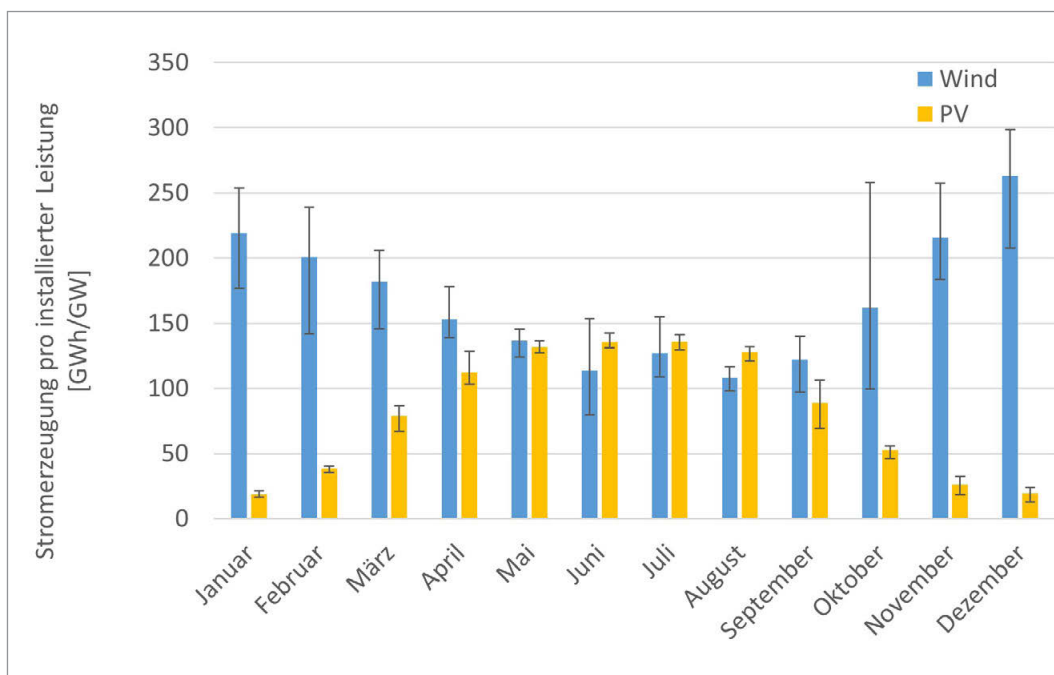


Abbildung 3
PV- und Windstromerzeugung in Deutschland
 bezogen auf die installierte Anlagenleistung von PV- und Windkraftanlagen im Jahresverlauf (Monatsmittelwerte aus den Jahren 2015-2017). Die Fehlerindikatoren zeigen, dass insbesondere die Windkraft starke Schwankungen zwischen den Jahren aufweist.
 Datenquelle: energy-charts.de

Basierend auf den Messdaten werden Betriebsstrategien für Wärmepumpen-Quartiere entwickelt, die z. B. einen koordinierten Betrieb innerhalb des Quartiers ermöglichen, um das elektrische Verteilnetz zu entlasten und die erneuerbare Deckung zu erhöhen. Das Einzelgebäude kann so, mit seinen thermischen und elektrischen Speichern und Lasten, Flexibilität anbieten. Eine wichtige zu beantwortende Fragestellung ist dabei auch, welche Potenziale zur Primärenergiesenkung zentrale, quartiersweite Betriebsstrategien gegenüber dezentralen Strategien einzelner Gebäude haben. Hieraus lassen sich dann auch Erkenntnisse ableiten, zu welchem Grad Gebäude zukünftig untereinander oder mit Leitstellen vernetzt werden müssen.

Zusammenfassung

Die Betriebsführung von Gebäuden bietet großes Potenzial zu Energieeinsparungen.

Monitoring- und Fehlererkennungsverfahren können solche Einsparungen dauerhaft sicherstellen. Erste Ansätze mit modellprädiktiven und selbstlernenden Steuerungen zeigen, dass die Energieeffizienz von Gebäudeenergiesystemen weiter gesteigert werden kann, wobei hier aktuell großer Forschungsbedarf besteht.

Der Nutzer ist ein wesentlicher Faktor im Gebäudebetrieb. Sein Verhalten muss einerseits bereits bei Planung und auch in der Steuerung berücksichtigt werden. Andererseits zeigen Ergebnisse unter Verwendung von Gamification-Ansätzen, dass das Verhalten des Nutzers auch aktiv beeinflusst werden kann.

Schließlich ist das Gebäude auch immer als Teil des Gesamtenergiesystems zu betrachten. Insbesondere die Kopplung von elektrischen und thermischen Systemen eröffnet neue Speicheroptionen und Möglichkeiten der Flexibilitätsbereitstellung. Aktuell gibt es verschiedene Ansätze, wie die Vielzahl an Komponenten in einem solchen System vernetzt werden können und wie hoch der Grad an Vernetzung sein muss. Die Digitalisierung bietet hier viele technische Möglichkeiten, Hürden bestehen aber weiterhin in den vielfältigen Interessenslagen der Akteure.