

Wärmepumpen in vernetzten Gebäuden

Einleitung

Beim Thema „Wärmepumpen in vernetzten Gebäuden“ stellt sich zunächst die Frage, worin diese Vernetzung besteht. Es gibt mehrere Ebenen, mit denen Wärmepumpen (WP) physisch und/oder datenbasiert vernetzt sein können (► *Abbildung 1*): Die oberste Ebene ist das „Gesamtsystem“. Danach folgen die Subsysteme Verteilnetz und Quartier, anschließend die gebäudebezogenen Subsysteme, wie bspw. Verbrauch, Solarthermie, Photovoltaik, Speicher, Abwärme etc.

Auf jeder Netzebene bestehen wiederum mehrere Optimierungsanforderungen. Diese können z.B. (netz)technischer, ökonomischer oder ökologischer Natur sein. Die Forschungsprojekte der Partner zeigen, dass durch die Digitalisierung die Vernetzung und die Optimierung des Wärmepumpenbetriebs unterstützt werden können; Zielkonflikte zwischen den Optimierungsparametern aber nicht aufgelöst werden können.

Im Zuge der steigenden Stromerzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Energien (fEE) werden Wärmepumpen als Option zur Nachfrageanpassung diskutiert. Simulations- und Optimierungsstudien für das gesamte Energiesystem zeigen, dass eine flexible Fahrweise von WP basierend auf Signalen aus den Strommärkten zu einer verbesserten Systemintegra-

tion beitragen kann [z.B. [1] Patteeuw 2016]. Dies betrifft nicht nur die verbesserte Integration der fEE in die Energiemärkte, sondern auch die Reduktion von Lastspitzen und Systemkosten sowie die Vermeidung kritischer Netzsituationen. Um die notwendige Flexibilität bereitzustellen, muss die Stromnachfrage von WP vom Wärmeverbrauch unter Ausnutzung der thermischen Gebäudemasse und ggf. thermischen Speichern partiell entkoppelt werden.

Die Digitalisierung eröffnet die Möglichkeit, das Potenzial von WP zur Nachfrageanpassung z. B. via Real-Time-Pricing-Mechanismen zu heben. Hierbei werden mit Hilfe eines Smart Meters Schwankungen des Großhandelspreises von Strom als stetiges oder gestuftes Preissignal in Echtzeit bzw. am Vortag an den Endkunden weitergegeben, wodurch ein Anreiz entsteht, den Stromverbrauch nach dem aktuellen Großhandelspreis zu richten. Das Energiesystem soll in der Folge in kritischen Situationen, etwa bei hohen Strompreisen aufgrund geringer Einspeisung durch EE, entlastet werden.

Ob echtzeitbasierte Strompreise für WP auch in der Realität die gewünschte Wirkung erzielen, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zunächst entscheidet der Verbraucher über den Umfang seiner Reaktion auf das Preissignal. Bei WP ist insbesondere zu beachten, dass eine flexible Betriebsweise die Raum-



IZES
Eva Hauser
hauser@izes.de

DLR
Evelyn Sperber
evelyn.sperber@dlr.de

Fraunhofer IEE
Dr. Michael Krause
michael.krause@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
Dr. David Fischer
david.fischer@ise.fraunhofer.de

ISFH GmbH
Fabian Hüsing
huesing@isfh.de

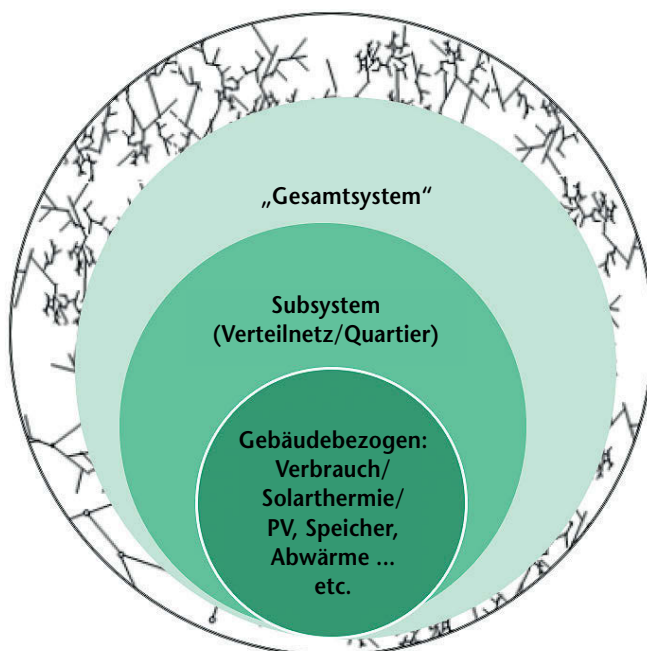


Abbildung 1
Ebenen der Vernetzung von Wärmepumpen

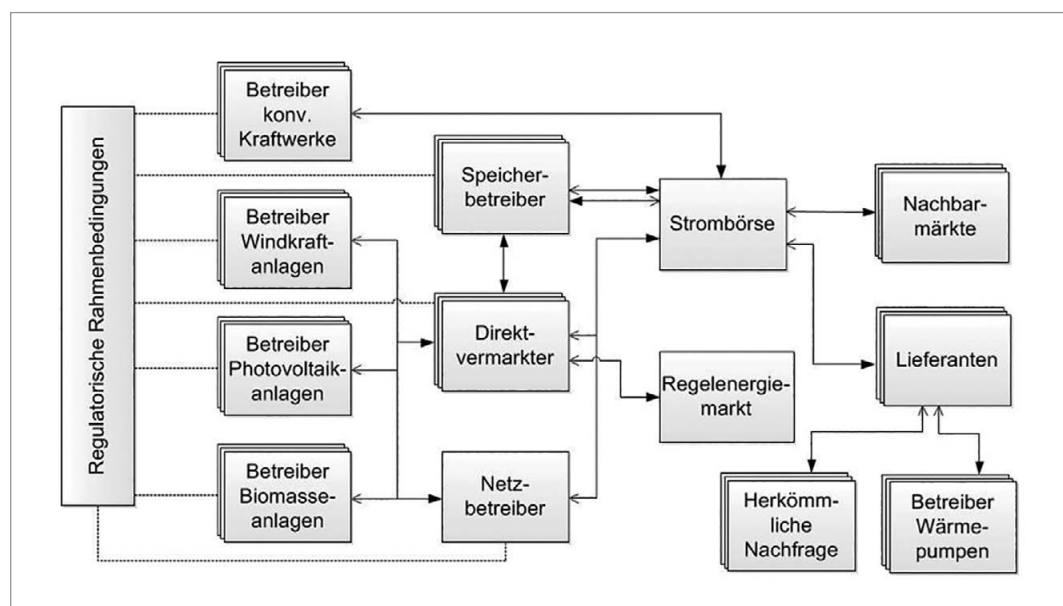
temperatur sowie die Effizienz der WP beeinflussen kann, was das nutzerbedingte Potenzial der Lastverschiebung begrenzt. Darüber hinaus bestimmen die Anreizstrukturen die Effektivität von Real-Time-Pricing mit. Hierbei ist entscheidend, ob auch nicht-marktliche Komponenten des Strompreises, insbesondere Umlagen und Abgaben, dynamisiert werden können. Letztlich werden Interventionen im Energiesystem oftmals von (unintendierten) Neben- und Wechselwirkungen begleitet. So beeinflusst der Einsatz von WP bei hoher Marktdurchdringung die Großhandelspreise des Stroms und hat damit einen selbst-rückwirkenden Effekt auf Real-Time-Pricing.

Um energiepolitische Instrumente zur Marktintegration der fEE im Simulationskontext bewerten zu können, hat das DLR gemeinsam mit IZES, ZIRIUS und Thomas Kast Simulation Solutions ein agentenbasiertes Modell des deutschen Strommarktes (AMIRIS) entwickelt. Im Zentrum stehen die Akteure („Agenten“) des Stromsystems mit ihren Wahrnehmungen, Handlungsmustern und Wechselbeziehungen (► *Abbildung 2*). Im Gegensatz zu Gleichgewichts- und Optimierungsmodellen existiert keine zentral vorgegebene Zielfunktion, sondern das Systemverhalten resultiert aus dem Verhalten der einzelnen Agenten sowie deren Interaktion untereinander und mit ihrer Umwelt ([2] Deissenroth et al. 2017). Am DLR wird AMIRIS derzeit in Richtung Sektorenkopplung mit Wärmepumpen weiterentwickelt, um anreizbasierte Instrumente aus einer ganzheitlichen Energiesystemperspektive bewerten zu können. Dabei werden das Akteursverhalten der WP-Betreiber und Lieferanten sowie das thermische Verhalten der unterschiedlichen Gebäudetypen explizit berücksichtigt.

WP-Einsatz zur Vermeidung von Netzüberlastung bzw. übermäßigem Verteilnetz-Ausbau

Im Rahmen der Systemtransformation sollen sowohl die elektrische Energiebereitstellung als auch die Wärmebereitstellung auf fEE basieren. So sollte es indirekt über die Stromnutzung auch für WP der Fall sein, die dann ebenfalls zur Dekarbonisierung des Wärmebereichs beitragen können. Allerdings besteht das Problem, dass die Wärmebedarfe selten synchron mit der fEE-Erzeugung auftreten. Dadurch können- bei entsprechend hohem EE-Ausbau an einzelnen Netzknoten Frequenz- und Spannungsprobleme auftreten – insbesondere in Situationen von hoher PV-Einspeisung im Niederspannungsnetz. Welche Rolle WP bei der Vermeidung solcher Frequenz- und Spannungsprobleme spielen können, mit denen ggf. ein übermäßiger und ggf. teurer Netzausbau vermieden werden kann, wird vom Fraunhofer IEE im Projekt Lage-EE (BMW, FKZ 0325794) untersucht. Hierzu werden lastangepasste Algorithmen zum Betrieb von Wärmepumpen in Abhängigkeit von der am Hausanschluss auftretenden Netzspannung entwickelt, mit denen eine optimale Nutzung der vorhandenen Speicher- und Verschiebepotenziale (Warmwasser- und Pufferspeicher sowie die thermische Gebäudemasse) ermöglicht wird. Die auf Basis von numerischen Simulationen entwickelten Algorithmen werden sowohl im Labor als auch in einem Feldtest bei Endkunden hinsichtlich ihrer Verschiebepotenziale, Speicherpotenziale und Systemperformance bewertet (vgl. ► *Abbildung 3*). Weiterhin erfolgt eine ökonomische Bewertung, auf deren Basis mögliche Geschäftsmodelle entwickelt werden können. Der Abschluss des Projekts ist für August 2019 geplant.

Abbildung 2
AMIRIS:
Modellstruktur des agentenbasierten Modells des deutschen Strommarktes



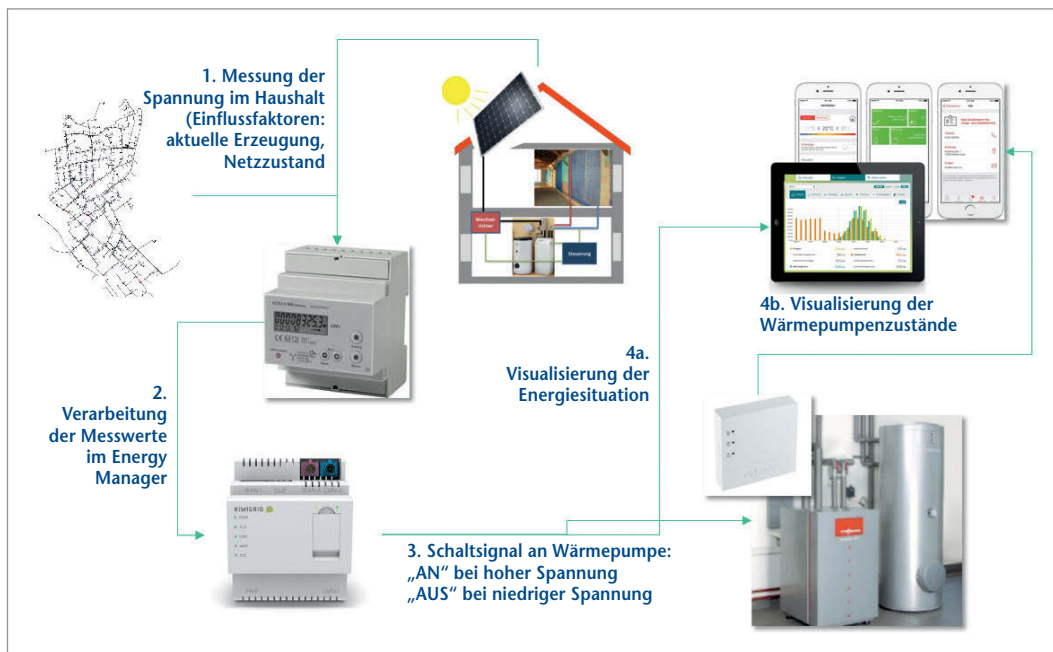


Abbildung 3

WP zur Vermeidung von Netzüberlastung und übermäßigem Netzausbau:
technische Umsetzung des Praxistests im Projekt „Lage-EE“



Abbildung 4

Hardware-in-the-loop-Teststand
[ISFH]

WP-Einsatz zur lokalen Steigerung der EE-Anteile in der Strom- und Wärmeversorgung eines Quartiers

In diesem Bereich forscht unter anderem das ISFH im Projekt „Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier WPuQ¹“. Hier werden in zwei Quartieren mit 70 Gebäuden die Strom- und Wärmeverbräuche, der Zustand im Strom- und Wärmenetz sowie die Erzeugung der lokale PV- und Windkraftanlagen gemessen. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, das Verhalten und die Auswirkungen des Betriebs vieler WP innerhalb eines Ortsnetzes zu analysieren. Wichtig ist dabei die Frage, mit welcher Gleichzeitigkeit die WP in der Siedlung laufen. Auf Basis der gemessenen Haushaltslastprofile soll ermittelt werden, ob und in welchem Umfang der Strombedarf eines solchen Ortsnetzes aus Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen zeitgleich gedeckt werden kann, bzw. wel-

che zusätzlichen elektrischen oder thermischen Speicher erforderlich sind. Des Weiteren wird untersucht, ob durch einen abgestimmten Betrieb der WP der Strombedarf des gesamten Ortsnetzes an die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien angepasst werden kann und Leistungsspitzen vermieden werden können.

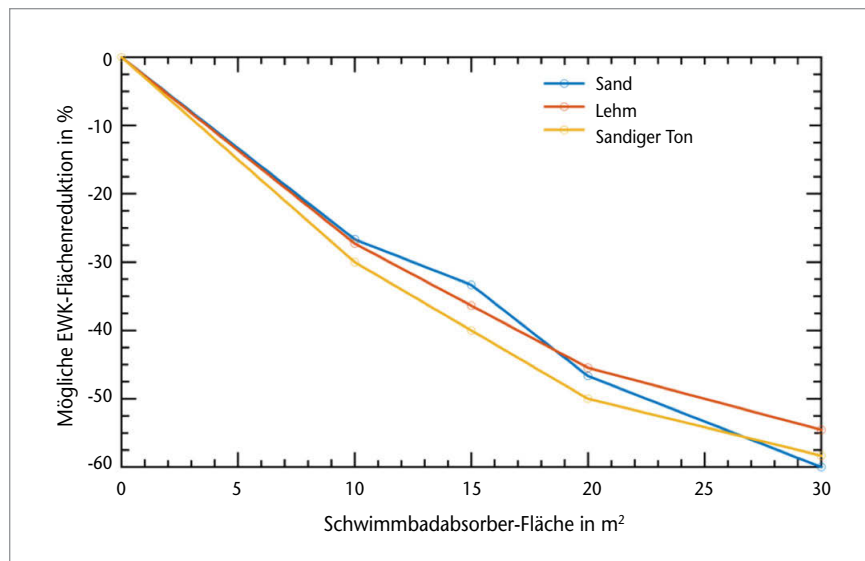
Das übergeordnete Projektziel ist es, Planungsgrundlagen für Wind-Solar-Wärmepumpensiedlungen zu erarbeiten. Zur Entwicklung und Erprobung von Betriebsstrategien wird ein Hardware-in-the-Loop-Teststand des ISFH genutzt (► *Abbildung 4*). Damit liegt der Optimierungsschwerpunkt des Wärmepumpenverhaltens auf der Ebene des Quartiers bzw. des Ortsnetzes.

WP-Einsatz zur Optimierung verschiedener Gebäude-Parameter

Innerhalb eines Gebäudes bzw. der Konfiguration seines Wärmeversorgungssystems wird von den

¹ Das Verbundvorhaben wird vom BMWi gefördert (FKZ 03ET1444A) und von den Partnern ISFH, TU Clausthal – IEE, STIEBEL ELTRON und Energieservice Westfalen Weser durchgeführt.

Abbildung 5
**Mögliche
 EWK-Flächenreduzierung
 durch Einsatz
 unverglaster
 Solarkollektoren**
 [ISFH]



Instituten des FVEE an mehreren Fragestellungen geforscht: Diese betreffen z. B. die Parameter „Optimierung der Pufferspeichergröße“ (unter Nutzung einer strompreisbasierten Speicherüberhitzung) oder die Erhöhung des PV-Eigenverbrauchsanteils, die wichtige Informationen zu einer – im Hausbereich optimierten Konfiguration von WP und ihrer Peripherie liefern können. Diese Fragen beziehen sich somit auf die Nutzungsphase der WP.

Weitere Optimierungspotenziale bestehen bezüglich der Auswahl und Dimensionierung der Wärmequelle.

Am ISFH wird beispielsweise im Projekt „Terra-Solar-Quelle²“ die Kombination von Sole/Wasser-Wärmepumpen und Solarthermie untersucht, um herauszufinden, inwieweit die Dimensionierung von Erdwärmekollektoren (EWK) durch den Einsatz von Solarthermie (unverglaste thermische sowie photovoltaisch-thermische Kollektoren) reduziert werden kann. Die Motivation ist, dass die Nutzung von Wärmequellen mit geringer saisonaler Temperaturschwankung vorteilhaft für Lastsituation im elektrischen Netz ist. Es konnte gezeigt werden, dass die thermische Regeneration des Erdwärmekollektors Flächenreduzierungen derselben von über 50% bei gleicher Effizienz ermöglicht. Insbesondere unverglaste Solarkollektoren erwiesen sich als geeignet, um hierfür Niedertemperaturwärme bereitzustellen. Die Reduktion des Flächenbedarfs wird hauptsächlich durch kleinere Verlegeabstände der Erdwärmekollektorrohre ermöglicht. Kleinere Bedarfe an unversiegelter Bodenfläche führen zu erweiterten Anwendungsmöglichkeiten für EWK.

2 Das Verbundvorhaben wird vom BMWi gefördert (FKZ 03ET1275A) und gemeinsam mit den Partnern twag GmbH und Bundesverband Wärmepumpe (BWB) e.V. durchgeführt.

WP-Vernetzung als Möglichkeit zur einzelwirtschaftlichen Optimierung

Nicht zuletzt können Wärmepumpen auch zur monetären Optimierung (auf Einzelhausebene) dienen. Im Projekt „Power to Heat for the Greater Region’s Renewables Integration and Development – Pth4GR2ID³“ geht es darum, anhand von Simulationen zu zeigen, ob und in welchem Ausmaß gesteuerte WP in energetisch sanierten Einfamilienhäusern künftig zu einer höheren Integration von erneuerbaren Energien (EE) und zu einer Entlastung der (Verteil-)Netze beitragen können. Die Steuerung der WP soll u. a. anhand der Strompreise am Spotmarkt optimiert werden.

Derzeit liegen erste Ergebnisse für das ausgewählte Modellgebäude in Deutschland vor. Hierbei handelt es sich um ein Einfamilienhaus der Gebäudeklasse E (Baujahre 1958 bis 1968). Es wurde angenommen, dass das Gebäude auf den KfW 55-Standard saniert und mit einer Luft-Wasser-WP mit thermischem Speicher als Heizsystem ausgestattet wird. Bei der WP handelt es sich um ein 5 kW-Gerät mit Heizstab in Kombination mit einem 830 l Wärmespeicher. In einem Fall wird die WP klassisch temperaturgeführt gesteuert, im anderen Fall wird ein sog. Einsatzoptimierer verwendet, welcher viertelstündlich rollierend z. B. untertägige Temperaturänderungen, das Nutzerverhalten, den aktuellen Heizwärmebedarf und die Preissignale des Vortageshandels an der EPEX Spot⁴ berücksichtigt.

3 Das Projekt wird über das europäische Programm Interreg VA Großregion (teil)finanziert und im Grenzgebiet zwischen Frankreich, Deutschland, Luxemburg und Belgien (der sog. Großregion) umgesetzt.

4 Momentan werden historische Preisreihen aus dem Jahr 2015 verwendet.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass bereits heute über einen Lebenszyklus von 30 Jahren und unter Integration aller Fördermittel die optimierte gegenüber der nicht optimierten WP einen leichten Kostenvorteil aufweist. Das liegt u. a. daran, dass im ersteren Fall die günstigen Preise aufgrund hohen Aufkommens an fEE aus dem kurzfristigen Stromhandel an die Betreiber der WP weitergegeben werden. Direkte Erlöse aus dem Strommarkt durch z. B. Lastverlagerungen wurden hierbei noch nicht eingerechnet, ebenso wenig wie eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung im Gebäude selbst.

Die nächsten Schritte werden nun sein, alle anderen Gebäudetypen der Großregion zu modellieren. Außerdem soll die Entwicklung der Marktdiffusion von WP bis 2050 abgeschätzt und deren Lastverlagerungspotenziale für die gesamte Großregion bestimmt werden. Sodann wird eine Abschätzung getroffen, in welchem Ausmaß WP künftig die Strommärkte beeinflussen werden, sowohl auf der Nachfrageseite wie auch bzgl. ihrer Flexibilisierungspotenziale. Hieraus sollen sich auch Auswirkungen auf die Verteilnetze der Großregion ableiten lassen.

Fazit

Grundsätzlich bieten Wärmepumpensysteme vielfache Potenziale, die erneuerbare Wärmeversorgung voranzubringen. Gleichzeitig bestehen aber vielfache Erwartungen, dass WP auch weitere Dienstleistungen im Energiesektor erbringen können und sollen. Dafür sind jedoch geeignete Rahmenbedingungen für und der passende Einsatz von weiteren Energiequellen sowie von Speicherkapazitäten auf verschiedenen Ebenen erforderlich. Wichtig ist es auch, die Erwartungen und (Investitions-)Entscheidungen der Nutzer*innen dabei zu beachten.

Die Digitalisierung ermöglicht die Integration komplexer Algorithmen, die Erfassung, die Vernetzung sowie die Verarbeitung der erforderlichen Daten für einen systemdienlichen Einsatz von WP. Hierfür sind die Definition und Etablierung standardisierter Schnittstellen notwendig, die (Geräte-, Haus-, Netz-) übergreifende Regelungen möglich machen.

Es muss jedoch bedacht werden, dass digitale Technik „nur“ ein Hilfsmittel zur Umsetzung dieser Regelstrategien ist. Es können dabei vielfache Zielkonflikte auftreten: Vermeidung von Lastspitzen, Versorgung individueller Bedarfssituationen, wirtschaftliche Wärmebereitung, nachhaltige Nutzung von Umweltwärme, nachhaltige Nutzung von (lokal erzeugter) Elektrizität, Bereitstellung von Flexibilität, Netzdienlichkeit etc. Daher muss die bestmögliche Balance hinsichtlich konträrer Ziele noch weiter erforscht werden.

Literatur

- [1] D. Patteeuw, "Demand response for residential heat pumps in interaction with the electricity generation system," Arenberg Doctoral School, 2016.
- [2] M. Deissenroth, M. Klein, K. Nienhaus, and M. Reeg, "Assessing the Plurality of Actors and Policy Interactions: Agent-Based Modelling of Renewable Energy Market Integration," Complexity, vol. 2017, 2017.