

Wärmepumpen im zukünftigen Strom- und Wärmesektor



Fraunhofer ISE

Dr. Marek Miara
marek.miara@ise.fraunhofer.de

Thore Altersdorf
thore.altersdorf@ise.fraunhofer.de

Constanze Bongs
constanze.bongs@ise.fraunhofer.de

ISFH

Carsten Lampe
c.lampe@isfh.de

Fraunhofer IWES

Fabian Thalemann
fabian.thalemann@iwes.fraunhofer.de

IZES

Patrick Hoffmann
hoffmann@izes.de

Einführung

Wärmepumpen sind ein fester Bestandteil im Wärmeerzeugermarkt. Die mittlerweile ausgereifte Technologie bringt gegenüber fossil betriebenen Heizgeräten in den meisten Fällen nicht nur primär-energetische sondern auch ökologische Vorteile. Im Jahr 2014 lag der Marktanteil der Wärmepumpen im Segment Neubau bei 32%. Die Bandbreite in den einzelnen Bundesländern erstreckt sich von 5,1% in Bremen bis hin zu 46,3% in Thüringen.

Vieles spricht dafür, dass Wärmepumpen zur technischen Standardlösung für Heizsysteme in Neubauten werden. Nicht zuletzt wird die (ab dem 1. Januar 2016 verschärfte) Energieeinsparverordnung dazu beitragen. Sowohl Branchenprognosen als auch Simulationsstudien weisen auf einen zukünftig stark wachsenden Wärmepumpenbestand hin [1].

Ein Beispiel dafür ist die Studie „Regenerative Energien Modell – Deutschland REMod-D“, die am Fraunhofer ISE angefertigt wurde [2]. Bei der Entwicklung von Heizungstechnologien auf dem Weg zu einem System mit dominantem Anteil erneuerbarer Energien und unter Berücksichtigung minimaler Transformationskosten, sieht die Studie mittelfristig (im Jahr 2030) einen Anteil der Wärmepumpen an allen Heizungsanlagen von 34% und langfristig (im Jahr 2050) von über 80%.

Bei der Transformation des Energiesystems kann der Wärmepumpe nicht nur aus Effizienzgründen, sondern auch als Koppler der Sektoren Strom und Wärme eine entscheidende Rolle zukommen. Der zunehmend fluktuierenden Einspeisung durch Windkraft und Photovoltaik muss auch mit einer Flexibilisierung der Nachfrageseite begegnet werden. Aufgrund der vorhandenen Speicherkapazitäten können Wärmepumpenanlagen hierfür einen Beitrag leisten. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, den zunehmend regenerativ erzeugten Strom effizient für Wärmeanwendungen in Gebäuden zu nutzen.

Neben einem zentral geregelten Demand Side Management (DSM), bei dem Wärmepumpen ausgleichende Regelernergie bereitstellen, können Wärmepumpen auch auf der Ebene der Prosumenten, also der Endnutzer, die nicht nur die elektrische

Energie konsumieren sondern auch produzieren, Vorteile generieren. Im Jahr 2005 war die Solarstromvergütung mehr als dreimal so hoch wie der Preis für den Strom aus der Steckdose. In den letzten zehn Jahren hat sich die Relation massiv geändert. Die Vergütung für die selbst produzierte Kilowattstunde beträgt nur noch die Hälfte des durchschnittlichen Strompreises. Eine Wärmepumpe kann den Selbstnutzungsanteil der produzierten elektrischen Energie steigern und dem Prosumenten somit ökonomische Vorteile verschaffen. Ebenfalls führt es zur Verminderung der eingespeisten Energiemenge und kann indirekt zur Abschwächung der Netzfluktuation beitragen.

Wärmepumpen und die Stromversorgung der Zukunft

Die günstigen Rahmenbedingungen für regenerative Energietechnik haben im Stromsektor zu einem massiven Ausbau der Photovoltaik (PV)- und der Windenergie geführt. Im Jahr 2015 betrug die installierte Anschlussleistung für PV 39.700 MW und für Windkraftanlagen 43.780 MW. Die höchste Einspeisespitze der PV lag in dem Jahr bei 27.300 MW, die der Windkraft bei 35.600 MW [3]. Bezogen auf mittlere Netzlasten von 50.000 MW, greifen diese fluktuierenden Erzeuger bereits heute massiv in die etablierte Erzeugungsstruktur ein.

Es gibt vier wesentliche Maßnahmen, den Herausforderungen durch die fluktuierende Einspeisung zu begegnen:

1. Netzausbau
2. flexiblere konventionelle Kraftwerke
3. zusätzliche Speicher
4. Flexibilisierung der Nachfrageseite (DSM).

Elektrisch angetriebene Wärmepumpen können als Instrument des Demand Side Managements zu letztgenannter Maßnahme beitragen. Die Nutzung thermischer Speicher ermöglicht die Entkopplung von Heizwärme- und Elektroenergiebedarf, wodurch die Wärmepumpenbetriebszeit optimiert werden kann. Ende 2015 waren in Deutschland über 600.000 Wärmepumpen installiert. Für das Jahr 2020 werden 1.200.000 Wärmepumpen mit einer Anschluss-

leistung von 3.600 MW prognostiziert [1]. Nach dieser Studie besteht ein signifikantes DSM-Potenzial für Wärmepumpen, gleichzeitig jedoch auch großer Forschungsbedarf, u. a. hinsichtlich der Kommunikation, den Marktmodellen sowie den Einflüssen von DSM auf die Wärmepumpenanlagen.

Potenzial der Lastverschiebung

Die durchgeführte Studie [4] hat den Mehrbedarf an Elektroenergie einer Wärmepumpenanlage infolge des veränderten Betriebs durch ein externes Signal quantifiziert. Dieses DSM-Signal wurde aus dem Verlauf der Residuallast in Deutschland gebildet und soll den Wärmepumpenbetrieb dahingehend optimieren, die Residuallast zu glätten. Der Mehrbedarf wird durch Effizienzminderung der Wärmepumpe sowie höheren Speicherverlusten verursacht, da die gewünschte Lastverlagerung durch eine Anhebung der Solltemperatur in den Pufferspeichern für Raumheizung und Trinkwassererwärmung realisiert wird.

In verschiedenen Szenarien wurden unterschiedliche DSM-Signale (Residuallasten für 2012 und 2023), Heizleistungen der Wärmepumpen (5,4 kW; 10,8 kW) sowie Volumina des Heizungspufferspeichers (0,5 m³; 2,0 m³) miteinander kombiniert und Jahressimulationen durchgeführt.

Grundsätzlich trägt die Solltemperaturanhebung zur Betriebszeitoptimierung bei. Die Effizienz der Wärmepumpe hat sich in allen Szenarien mit smarterer Rege-

lung, infolge der höheren Wärmesenktemperatur, verringert. Der Effizienzminderung durch die Solltemperaturanhebung wirkt jedoch gleichzeitig entgegen, dass keine ineffizientere Heizwärmebereitstellung mit dem Elektroheizstab erfolgen muss. Im Extremfall wurde die Effizienzminderung komplett kompensiert. Die Aktivierung weiterer Speicherkapazität führte bei beiden Speichern zu zusätzlichen Wärmeverlusten. Die Verluste des Heizwasserpufferspeichers (PS-H) wurden im Auslegungsfall (0,5 m³) maximal verdoppelt, bei Überdimensionierung (2,0 m³) verfünffacht.

Beispielhafte Ergebnisse

Die Hauptergebnisse der Simulation bestehen aus der Optimierung der Betriebszeit sowie dem notwendigen Mehrbedarf an Elektroenergie infolge der Effizienzminderung der Wärmepumpe und höherer Speicherverluste.

In *Abbildung 1* wird für jedes Szenario der Elektroenergiebezug der Wärmepumpe als absoluter Wert, sowie verteilt nach DSM-Signal-Bereichen dargestellt. Die grünen Bereiche kennzeichnen die zu Zeiten günstigen DSM-Signals bezogene Elektroenergie. Die smarte Regelung, die eine gezielte Anhebung der Solltemperatur in den Pufferspeichern resultiert, trägt in allen Szenarien zur gewünschten Lastverschiebung bei, wobei diese in ihrem Ausmaß sehr unterschiedlich ausfällt. Bereits ohne Änderungen der Dimensionierung von Anlagenkomponenten ist ein positiver Einfluss durch die smarte Regelung festzustellen.

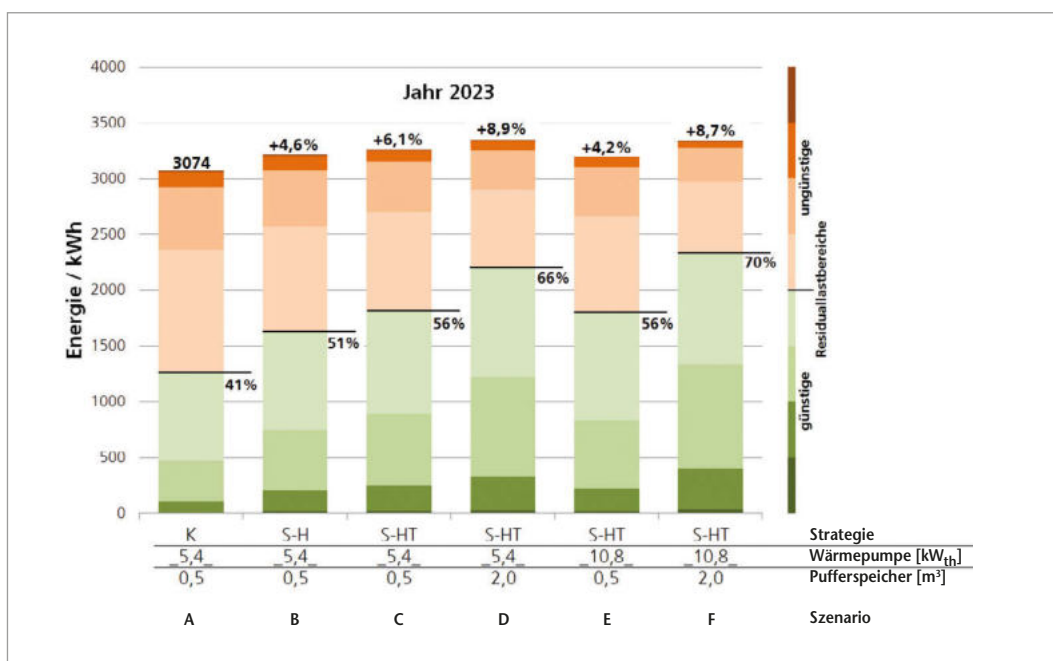


Abbildung 1
Elektroenergiebedarf der Wärmepumpe: Absolutwert und Aufteilung nach DSM-Signal-Bereichen in den Szenarien für 2023

Wird nur der Heizungspufferspeicher in die smarte Regelung eingebunden (Szenario B: S-H_5,4_0,5), steigt der energetische Anteil in Zeiten negativer DSM-Signale auf 51 %, bei zusätzlicher smarter Nutzung des Pufferspeichers für die Trinkwassererwärmung auf 56 % (Szenario C: S-HT_5,4_0,5).

Eine signifikante Zunahme der Lastverschiebung wird durch die Vergrößerung des Speicherpotenzials erzielt. Beim Einsatz des 2 m³ Pufferspeichers (Szenario D: S-HT_5,4_2,0) werden 66 % der Elektroenergie bei negativem DSM-Signal bezogen.

Dennoch stellt sich keine zusätzliche Verbesserung gegenüber der Basisauslegung ein, wenn nur die Wärmepumpe – nicht aber gleichzeitig auch der Pufferspeicher – größer dimensioniert wird. So erreicht Szenario E: S-HT_10,8_0,5 – ebenso wie Szenario C: S-HT_5,4_0,5 – einen Anteil von lediglich 56 %.

Um die größere Wärmepumpenleistung nutzen zu können, wird eine Vergrößerung der Speicherkapazität benötigt, wie in Szenario F: S-HT_10,8_2,0 (70 %).

Die Optimierung der Betriebszeit führt in allen Szenarien zu einem finanziellen Mehraufwand für zusätzliche elektrische Energie. Dieser und etwaige weitere Investitionskosten (Überdimensionierung von Wärmepumpe und Speicher) müssen bei der Entwicklung von Marktmodellen für die Anwendung von Wärmepumpen als DSM-Instrument berücksichtigt werden.

Stand der Technik – Ergebnisse aus Wärmepumpen-Monitoringprojekten

Seit 2005 untersucht das Fraunhofer ISE Wärmepumpenanlagen unter realen Bedingungen. In drei bereits abgeschlossenen und ausgewerteten Projekten wurde unter anderem die Effizienz von ca. 220 Anlagen bestimmt [5].

Die große Mehrheit aller Wärmepumpenanlagen wurde in Einfamilienhäusern installiert. Die untersuchten Wärmepumpen realisierten immer sowohl die Beheizung der Räume als auch die Brauchwassererwärmung. Die untersuchte thermische Leistung erstreckt sich von ca. 6 bis 25 kW. In dem Projekt „Wärmepumpen im Gebäudebestand“ wurden Wärmepumpenanlagen in älteren, überwiegend unsanierten Häusern untersucht.

In zwei weiteren Projekten – „WP-Effizienz“ und „WP Monitor“ waren die Häuser meist nicht älter als drei Jahre. Der mittlere Heizenergieverbrauch beträgt entsprechend 120 kWh/(m²a) in älteren bzw. 70 kWh/(m²a) in neuen Häusern.

Prinzipiell sind bei der Berechnung der Arbeitszahlen unterschiedliche Bilanzgrenzen möglich. Bei den folgenden Ergebnissen wurden für den Elektroenergieaufwand der Kompressor, die Steuerung und Regelung, die Ventilatoren bei Außenluft-Wärmepumpen bzw. Solepumpen bei Erdreich-Wärmepumpen und die Elektroheizstäbe in der Bilanz berücksichtigt. Die bereit gestellte thermische Energie wurde direkt nach der Wärmepumpe (vor dem Pufferspeicher bzw. Trinkwasserspeicher) gemessen.

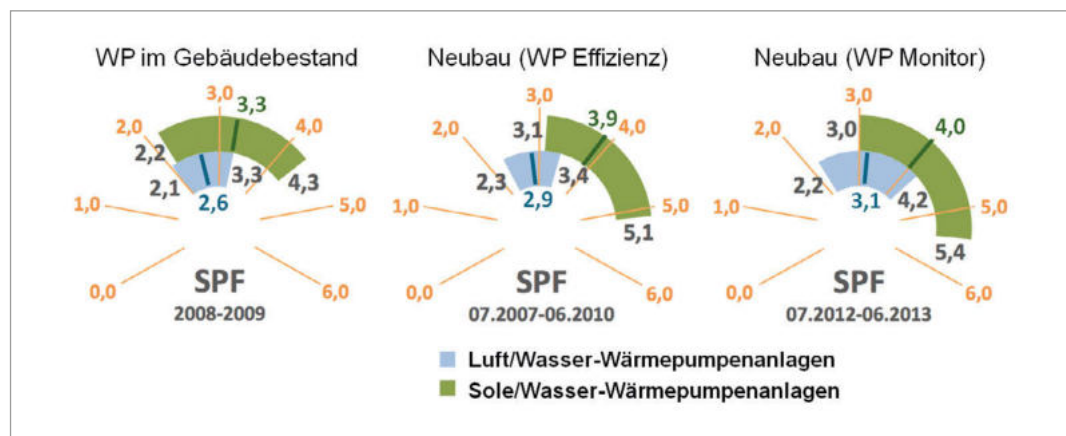
Mittelwerte und Bandbreiten der Arbeitszahlen

Abbildung 2 zeigt die Mittelwerte sowie die Bandbreiten der für alle drei Projekte berechneten Arbeitszahlen mit der Angabe der ausgewerteten Zeitperiode.

Die Unterschiede bei den Mittelwerten sind mit der Art und Temperaturniveau der Wärmequelle, dem Alter der Häuser sowie dem jeweiligen Stand der Technik zur Projektlaufzeit zu erklären.

- Die Wärmepumpenanlagen aus dem letzten Projekt haben die besten Ergebnisse erzielt – dies

Abbildung 2
Monitoringprojekte:
Mittelwerte und
Bandbreiten der
Effizienzergebnissen



weist auf eine positive technologische Weiterentwicklung der Wärmepumpen hin.

- Die Sole/Wasser-Wärmepumpen erreichen im Schnitt bessere Effizienzwerte als die Luft/Wasser-Wärmepumpen.
- Für Wärmepumpen in älteren Gebäuden mit höheren Heizkreistemperaturen wurden geringere Arbeitszahlen ermittelt, als für jene in Neubauten mit Fußbodenheizung und den damit verbundenen vorteilhaften, da geringeren, Heizkreistemperaturen.
- Die Ergebnisse aus allen Projekten zeigen eine kleinere Bandbreite der Effizienzwerte bei den Luft/Wasser- gegenüber den Sole/Wasser-Wärmepumpen. Das große Spektrum bei den Erdreich-Wärmepumpen beweist einerseits das große Potenzial dieser Technologie, andererseits zeigt es, dass die Auswahl der vorteilhafteren, aber teureren Wärmequelle nicht automatisch zu höheren Effizienzwerten führen muss.
- Bei „WP Monitor“ konnte zudem festgestellt werden, dass die Arbeitszahlen der effizientesten Außenluft-Wärmepumpen die mittlere Arbeitszahl der Erdreich-Wärmepumpen übersteigen. Die geringen Effizienzwerte sind auf unnötige Fehler in allen drei Verantwortungsbereichen zurückzuführen: der Planung, der Installation sowie dem Betrieb.

Die mehrjährige Untersuchung von Wärmepumpen im Feld erlaubt folgende zentrale Schlussfolgerung: Gute Voraussetzungen für hohe Effizienzwerte haben vor allem einfache und damit robuste Anlagen, die gut geplant und sorgfältig installiert wurden. Ebenso ist es während der Betriebsphase wichtig, eine Überprüfung der Betriebsparameter und gegebenenfalls eine Anpassung der Regeleinstellungen vorzunehmen. Sind störende Einflüsse erst einmal ausgeschlossen, können die Anlagen, entsprechend ihres Teststand-COPs, optimale Arbeitszahlen im Feld erreichen.

Sorptionswärmepumpen

Noch ganz am Anfang einer Marktdurchdringung stehen Sorptionswärmepumpen. Im Gegensatz zu elektrisch betriebenen Kompressionswärmepumpen nutzen Sorptionswärmepumpen Wärme auf hohem Temperaturniveau als Antriebsmedium für den Wärmetransformationsprozess. Typischerweise wird für den thermischen Antrieb ein Gas-Brennwertmodul verwendet (Gaswärmepumpe). Wie bei einer Kompressionswärmepumpe wird Umweltwärme aus einer Niedertemperaturquelle mittels Erdreichkoppelung oder Außenluftnutzung eingesetzt, allerdings ist bei Sorptionswärmepumpen dieser Anteil der

Umweltwärme an der Nutzwärme geringer als bei Kompressionswärmepumpen. Damit sind mit bisherigen Geräten Leistungszahlen (Nutzwärmeleistung/Antriebswärmeleistung) bis zu 1,6 erreichbar; auf Jahresebene kann damit ein Gasausnutzungsgrad von bis zu 140% (brennwertbezogen) erwartet werden. Die Ausnutzung des fossilen Brennstoffs Gas wird damit im Vergleich zu Brennwertkesseln signifikant erhöht. Gleichzeitig benötigen Gaswärmepumpen eine Niedertemperaturquelle von deutlich kleinerer Leistung als Elektrowärmepumpen gleicher Wärmeleistung. Dies ist ein Vorteil in der Bestandsbausanierung mit begrenzten Möglichkeiten in der Erschließung der Niedertemperaturquellen.

Wie bei den thermisch angetriebenen Kälteanlagen kommen auch bei den Sorptionswärmepumpen zwei unterschiedliche Technologien zum Einsatz:

• Adsorptionstechnik:

sorptiv beschichtete Wärmeübertrager; das Adsorbens nimmt den Kältemitteldampf aus dem Verdampfer auf und muss zyklisch regeneriert werden. Kennzeichen ist daher ein periodischer Betrieb des Wärmeübertragers im Wechsel zwischen Adsorption und Regeneration (letztere geschieht durch Wärmeeintrag aus der Antriebsquelle). Typischerweise wird Wasser als Kältemittel eingesetzt; dies begrenzt allerdings den Verdampferbetrieb auf Temperaturen $> 0\text{ °C}$. Die Technik wird daher auch im Zusammenhang mit Solarkollektoren angeboten, um den Einsatzbereich des Sorptionsmoduls bei niedrigen Quellentemperaturen zu erweitern. Anbieter von Gasadsorptionswärmepumpen sind z. B. Vaillant und Viessmann.

• Absorptionstechnik:

kontinuierlicher Kreislauf des flüssigen Arbeitsmittelpaares, das im Absorber Kältemitteldampf aus dem Verdampfer aufnimmt und dieses im Generator (Wärmeeintrag aus Antriebsquelle) wieder abgibt. Mehrere Anbieter dieser Technik nutzen das Stoffpaar Ammoniak (Kältemittel) und Wasser (Sorptionsmittel). Der Vorteil dieser Technik ist der Betrieb des Verdampfers bei Temperaturen unter 0 °C , etwa in Luft/Wasser-Wärmepumpen. Gasabsorptionswärmepumpen werden beispielsweise von Robur, Bosch, Buderus oder Junkers angeboten.

Der optimale Einsatz von Sorptionswärmepumpen liegt derzeit noch in der Wärmeversorgung mit Vorlauftemperaturen unter 50 °C , also typischerweise für Anwendungen im Zusammenhang mit Flächenheizsystemen. Für höhere Temperaturen und für die Warmwasserbereitung kann direkt der Gasbrenner genutzt werden, dessen häufiger alleiniger Einsatz

senkt allerdings die Jahresarbeitszahl. Die Erreichung höherer Vorlauftemperaturen mit dem Sorptionsmodul ist noch Gegenstand von F&E-Aktivitäten.

Herausforderungen für die Zukunft

Wärmepumpen werden in der Zukunft für die Bereitstellung von Wärme (und Kälte) sowohl in Wohn- als auch in Nichtwohngebäuden eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Gleichzeitig sind sie eine Chance für die zielführende Vereinigung des Strom- und Wärmesektors.

Die Potenziale der Wärmepumpentechnologie stehen außer Frage. Um diese tatsächlich zu nutzen, sind noch einige Herausforderungen zu meistern:

- Die technologische Reife der Wärmepumpe und die damit verbundene hohe Effizienz, die theoretisch erreicht werden kann, werden teilweise durch eine fehlerhafte Umsetzung vermindert. Die fehlerfreie Planung, die sorgfältige Installation und ein korrekter Betrieb sind Voraussetzungen für eine großflächige, ökonomisch und ökologisch zweckmäßige Anwendung der Wärmepumpentechnologie.
- Ein konkretes Problem bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen ist die korrekte Anbindung der Wärmequelle. Dieser Punkt betrifft sowohl die korrekte technische Umsetzung der Wärmequellenanschlüsse als auch eine optimale, kostenbewusste Planung. Die Mehrkosten, die die Wärmequelle Erdschicht gegenüber der Wärmequelle Luft mit sich bringt, sind nur dann gerechtfertigt, wenn das volle Effizienzpotenzial dieser Technologie ausgeschöpft wird und nicht durch unnötige Fehler vermindert wird.
- Für die weitere Verbreitung der Außenluft-Wärmepumpen wird entscheidend sein, in welchem Ausmaß sich Industrie und Forschung dem Thema Lärm widmen. In den letzten Jahren wurde das Thema erkannt und angegangen, es besteht jedoch noch großer Optimierungsbedarf sowohl hinsichtlich der Verringerung von Schallemissionen als auch bezüglich des zweckmäßigen Aufstellortes der Wärmepumpe bzw. deren Außen-einheit.
- Ein zukünftiges Problem für das gesamte Energiesystem kann die sogenannte Thermosensibilität werden. Bei der strombasierten Heizung steigt die Stromnachfrage mit geringeren Außenlufttemperaturen bzw. höherer Heizlast an. Die Thermosensibilität gibt dann an, wie viel elektrische Leistung pro Kelvin sinkender Außentemperatur zusätzlich benötigt wird. Diesbezüglich besteht

weiterer Forschungsbedarf, um für die Transformation des Stromsystems ein passendes „Überschussmanagement“ zu entwickeln [6].

- Die Flexibilisierung der Wärmepumpenlaufzeit, kann eine Verschlechterung der Effizienz der Wärmepumpen und/oder zusätzliche Investitionen zur Folge haben. Um damit verbundene Mehrkosten zu kompensieren, müssen entsprechende Geschäftsmodelle entwickelt werden.
- In Deutschland gibt es noch keine flexiblen Stromtarife, die den Wärmepumpenbetrieb bei Wind und Sonne erhöhen könnten. Es ist jedoch bereits jetzt möglich, die Nutzung des eigen erzeugten PV-Stroms zu steigern. Eine besonders gute Übereinstimmung des zur Verfügung stehenden Eigenstroms und des Wärmebedarfs lässt sich im Fall der Warmwasser-Wärmepumpe erreichen.

Literatur

- [1] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., BWP-Branchenstudie 2013, Szenarien und politische Handlungsempfehlungen, Berlin, 2013
- [2] Henning, H-M.; Palzer, A., Energiesystem Deutschland 2050, Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien, Fraunhofer ISE, 2013
- [3] Wirth, H., Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fraunhofer ISE, Fassung vom 25.12.2015
- [4] Miara, M.; Günther, D.; Leitner, Z.L.; Wapler, J., Simulation of an air-to-water heat pump system to evaluate the impact of demand-side-management measures on efficiency and load-shifting potential, Energy technology 2 (2014), No.1, pp. 90–99
- [5] Miara, M.; Günther, D.; Langner, R.; Helmling, S., Efficiency of Heat Pumps in Real Operating Conditions – Comparison of three Monitoring Campaigns in Germany, Rehva Journal 51 (2014), pp. 7–12
- [6] Hauser, E.; Guss, H.; Hoffmann, P.; Weber, A.; Schmidt, D.; Schumacher, P.; Gerhardt, N., Eignung von KWK und Wärmepumpen zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung (FEE): eine energie-wirtschaftliche Betrachtung, FVEE Themen 2012, pp. 80–83