ENERGIEWENDEBAUEN
Wissenschaftliche Begleitforschung

Schriftenreihe

Querauswertung

Konzept zur netzreaktiven Gestaltung von Einzelgebäuden

Querauswertung

Konzept zur netzreaktiven Gestaltung von Einzelgebäuden

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung und Relevanz 3

2 Begriffsdefinitionen 5

3 Forschungsaktivitäten 9

4 Bewertungsmethoden 11
- 4.1 Bilanzgrenzen der Bewertung 11
- 4.2 Bewertungsgrößen 13
- 4.3 Diskussion 15
- 4.4 Kurzusammenfassung 16

5 Netzdienliche Potentiale von Gebäudeenergiesystemen 17

6 Fazit und Ausblick 21

Literatur 23

1 Einführung und Relevanz

Das Energiekonzept der Bundesregierung hat eine Transformation des Energiesystems zur Folge. Als übergeordnetes Klimaschutzziel wurde in Paris (COP21) eine vollständige Reduktion der Treibhausgasemissionen festgelegt. Um diese Ziele zu erreichen, wird bis 2050 eine vollständig erneuerbare Energieversorgung angestrebt, in der die Erzeugung mittels fossiler Energieträger durch eine Erzeugung mittels alternativer Energieträger ersetzt wird. Gleichzeitig entwickelt sich das bisher zentrale umfassende Versorgungssystem hin zu einer Vielzahl von dezentralen Versorgungssystemen. Im Zuge dieser umfassenden und tiefgreifenden Umstellung der Energieversorgung wird es, wie im Folgenden beschrieben, zukünftig notwendig sein die Interaktion eines urbanen oder Gebäudeenergiesystems mit dem übergeordneten Energiesystem näher zu betrachten, zu bewerten und zu optimieren.

Der geplante Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) führt zu einer sowohl zeitlich als auch räumlich, steigenden Variabilität der Energieerzeugung. Dies zeigt sich insbesondere im Bereich der elektrischen Energieerzeugung und kann bereits heute an verschiedenen Stromsignalen wie beispielsweise dem EEX-Day-Ahead-Preis, der Residuallast oder dem Anteil Erneuerbarer Energien im Strommix nachverfolgt werden. Doch nicht nur auf nationaler Ebene, sondern auch lokal in Gebäuden, ist eine Disparität zwischen erneuerbarer Erzeugung und Last beobachtbar.

Ursprünglich wurden Stromnetze entworfen und betrieben, um die von zentralen Großkraftwerken erzeugte Energie an die Haushalts-, Gewerbe- und Industriekunden zu übertragen und zu verteilen [1]. Durch die Nutzung von Windkraft, Photovoltaik, Biomasse, Blockheizkraftwerken sowie durch den Kernenergie-Ausstieg ändert sich die Einspeisestruktur grundlegend. Bereits jetzt ist der Großteil der EE in der Verteilnetzebene installiert [2]. Mit dem weiteren Ausbau der EE-Erzeugung wird sich der beschriebene Strukturwandel voraussichtlich weiter verstärken. So werden die Herausforderungen im Bereich des Lastmanagements sowie die Anstrengungen zur Vermeidung von Netzengpässe und -überlastungen auf allen Netzebenen steigen.

In der aktuellen Bewertung von Gebäuden werden dynamische Randbedingungen, sowie systemische Einflüsse eines Gebäudes auf das übergeordnete Energiesystem nicht berücksichtigt. Stand der Technik ist eine einzelobjektorientierte Betrachtung, in welcher statisch-bilanzielle Berechnungsmethoden im Vordergrund stehen.

Zur Entwicklung eines Konzeptes zur netzreaktiven Gestaltungen von Einzelgebäuden ist es notwendig, das gesamte Energiesystem sowie den Gebäudebetrieb adäquat, dynamisch zu beschreiben. Zur Vergleichbarkeit von Ergebnissen der Bewertung, welche sowohl für Einzelkomponenten als auch für große Energiesysteme durchgeführt werden kann, bedarf es einer einheitlichen Methodik [3].

In den folgenden Kapiteln werden zunächst der Begriff der Netzreaktivität und verwandte, in diesem Zusammenhang oft genutzte, Begriffe definiert und erläutert. Es erfolgt eine Kurzvorstellung der Forschungsaktivitäten, welche innerhalb der Forschungsinitiative ENERGIEWENDEBAUEN in diesem Bereich durchgeführt werden. Im weiteren Verlauf werden in den Forschungsvorhaben entwickelte Bewertungsmethoden für die Netzreaktivität von Gebäuden analysiert. Die recherchierten Anforderungen zur netzreaktiven Gestaltung werden dargestellt. Zuletzt werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf das geplante Vorgehen der Wissenschaftlichen Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN in diesem Arbeitspaket gegeben.

2 Begriffsdefinitionen

Im Rahmen des Kapitels erfolgt eine Darstellung existierender Beschreibungen/Definitionen zu „Netzreaktiven Gebäuden“ und dem damit in Verbindung stehenden Begriff der „Netzdienlichkeit“.

Netzreaktive Gebäude

Auf Grund der fluktuierenden Energiebereitstellungscharakteristik von EE-Anlagen (insbesondere Wind- und PV-Anlagen) und des für die Zukunft angestrebten Anteils von EE am Deutschen Strom-Mix wird die Verfügbarkeit elektrischer Energie aus den genannten Anlagen großen zeitlichen Schwankungen unterliegen. Weil elektrische Energie nur begrenzt und zu vergleichsweise hohen Kosten gespeichert werden kann, liegt ein weiterer **Ansatz zur Nutzung und Glättung von Verfügbarkeitsschwankungen im netzreaktiven Betrieb elektrischer Verbrauch bzw. Erzeuger**. Ziel ist es den elektrischen Bezug aus dem Versorgungsnetz bzw. Einspeisung an die zu einem Zeitpunkt verfügbare Elektrizität im Energiesystem anzupassen [4].

Nach [5] bezeichnet **„Netzreaktivität“** den Ansatz, ein **stromnetzbasiertes Signal in die Regelung der Anlagen** zur Wärme- und Kälteerzeugung **einzubeziehen**.

In [6] wird Netzreaktivität als Maß der Betriebsanpassung auf eine gewählte Vergleichsgröße definiert. Hierbei kann sich ein System entweder netzadvers, netzneutral oder netzdienlich verhalten.
Zur Bewertung und Vergleich der Netzreaktivität verschiedener Gebäude (einschl. Gebäudeausstattung) wurden zwei Kennzahlen zur Charakterisierung entwickelt, einen absoluten und einen relativen Grid-Support-Coefficent (GSC_{abs} und GSC_{rel}) [7]. Beide Kennzahlen werden im Abschnitt 4 (Bewertungsgrößen und -methoden) detaillierter vorgestellt und beschrieben.

Es existieren wenige Beschreibungen die konkret die Begriffe „Netzreaktivität“ bzw. „Netzreaktive Gebäude“ näher erläutern. Zumeist erfolgt eine Beschreibung durch welche Maßnahmen die Netzreaktivität von Gebäuden erreicht bzw. verbessert werden kann.

Im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung werden „Netzreaktive Gebäude“ wie folgt beschrieben/verstanden. Netzreaktive Gebäude sind gekennzeichnet durch technische Einrichtungen (Energieerzeuger, -verbraucher, -speicher und -wandlungseinrichtungen) mit denen eine netzdienliche elektrische Gebäudeversorgung ermöglicht wird. Hierfür erfolgt eine Einflussnahme auf die Fahrweise der lokalen Anlagentechnik im Gebäude über ein stromnetzbasiertes Signal, woraufhin das Verhalten des Gebäudes am Netzanschlusspunkt beeinflusst wird (hinsichtlich Bezugs- bzw. -einspeiseverhalten). Zur Sicherstellung der Energieversorgung und zum Aufrechterhalten des Gebäudebetriebs wird Flexibilität bei der Bereitstellung und/oder Verbrauch notwendiger Energieformen benötigt. Einerseits kann die erforderliche Flexibilität durch eine zeitliche Entkopplung der Energiebereitstellung und des Energieverbrauchs mittels

Energiespeicher erreicht werden. Ein Beispiel hierfür wäre ein stromnetzgeführter statt wärmebedarfsgeführter Wärmepumpenbetrieb in Verbindung mit einem entsprechenden thermischen Speicher. Andererseits kann die Flexibilität durch redundante Anlagentechnik, die mit unterschiedlicher Antriebsenergie betrieben werden, realisiert werden. Für die Wärmeversorgung eines Gebäudes bedeutet dies beispielsweise, dass zur Wärmebereitstellung eine elektrische Wärmepumpe und ein erdgasbetriebenes Brennwertgerät oder BHKW-Anlage parallel installiert wird. In Abhängigkeit der Situation im elektrischen Versorgungsnetz erfolgt die Wärmebereitstellung über die Wärmepumpe, wenn ein Überangebot elektrischer Energie in Versorgungsnetz vorherrscht. Bei einem Stromunterangebot erfolgt die Wärmeversorgung des Gebäudes über das Brennwertgerät bzw. Blockheizkraftwerk (BHKW). Durch die parallele Auskopplung elektrischer Energie eines BHKWs bei der Wärmebereitstellung wird der Netzsituation in diesem Fall zusätzlich positiv entgegengewirkt.

Netzdienlichkeit

Nach [7] wird ein ganzes **Gebäude als netzdienlich bezeichnet**, wenn es sich **konform zu den Zielen des Lastmanagements** verhält. Entsprechend besitzt ein solches Gebäude die technologischen Voraussetzungen zur Verschiebung elektrischer Lasten. Hierbei werden zur Erreichung bzw. zur Steigerung der Netzdienlichkeit von Gebäuden drei Ansätze verfolgt.

1. Umschalten zwischen unterschiedlich angetriebenen Wärme- und Kälteerzeugern (z. B. elektrische Wärmepumpe und Erdgasbrennwertgerät, Kompressionskälteanlage und Absorptionskälteanlage)
2. Nutzung technischer Speicher, wie bspw. eine elektrische Batterie oder einen thermischen Speicher
3. Nutzung thermische Masse des Gebäudes als Wärme- oder Kältespeicher (thermische Aktivierung massiver Bauteile)

Laut [8] verhalten sich **Anlagen netzdienlich, wenn diese Netzengpässe, durch Verschiebung des elektrischen Energiebedarfs** in Schwachlastzeiten **entgegenwirken**.

In [9] erfolgt eine Unterscheidung zwischen Netzverträglichkeit, netzdienlich, Systemverträglichkeit und systemdienlich. Eine Technologie gestaltet sich als netzverträglich, sobald sie den Anforderungen der Netzbetreiber an Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit in ihren Netzen entspricht. Die Netzdienlichkeit bezeichnet ein über die Netzverträglichkeit hinausgehendes Verhalten am elektrischen Versorgungsnetz. **Netzdienliche Einrichtung** (technische Komponenten bzw. Anlagen) **tragen aktiv zur Stabilisierung des Netzes bei**. Hingegen ist eine Einrichtung systemdienlich, wenn das Betriebsverhalten dem übergeordneten Ziel der Flexibilisierung des Energiesystems dient. Hierzu gehört das Minimieren der Schwankungen der Residuallast. Systemverträglichkeit beschreibt, vergleichbar mit dem Unterschied zwischen der Netzverträglichkeit und Netzdienlichkeit, eine der Systemdienlichkeit untergeordnete Erfüllung der Mindestanforderungen.

Nach [3] stellt eine Möglichkeit **Netzdienlichkeit** bzw. netzdienliches Verhalten zu beschreiben **entsprechend des ökonomischen Ansatzes** dar. Demnach verhält sich ein **Verbraucher netzdienlich, wenn** das **Energieverbrauchsverhalten** dazu **beiträgt**, die **Stromnachfrage zu volkswirtschaftlich minimalen Kosten zu jedem Zeitpunkt zu decken**. Zur Erreichung dieses übergeordneten Ziels können die Gebäudeenergiesysteme auf verschiedenen Wegen beitragen.

1. Maximierung der Deckung zwischen lokaler Erzeugung und lokaler Last
2. Maximierung der (Markt-)Effizienz der Stromversorgung
3. Minimierung von Netzengpässen
4. Bereitstellung von Regelenergie oder -leistung

Nachfolgend werden die zuvor dargestellten Beschreibungen/Definitionen zum Begriff „Netzdienlichkeit“ zusammengefasst, um im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung ein einheitliches Verständnis zu generieren.

Der Begriff Netzdienlichkeit findet im Kontext der Energiewende Einsatz und wird als Option aufgeführt, die Integrationsfähigkeit von Erneuerbaren Energien Anlagen in das elektrische Energieversorgungssystem und insbesondere in das Versorgungsnetz zu verbessern und zu erhöhen. Netzdienliche Einrichtungen und Anlagen können zum einen als Flexibilitätsoption zum Ausgleich zwischen der fluktuierenden Bereitstellung elektrischer Energie aus Erneuerbaren Quellen und dem Verbrauch elektrischer Energie dienen. Zum anderen kann eine Anlage bzw. technische Einrichtung als netzdienlich bezeichnet werden, sobald diese einen positiven Einfluss auf das elektrische Versorgungsnetz (Versorgungssicherheit/ -qualität) nehmen und zur Steigerung der Netzstabilität beitragen kann.

3 Forschungsaktivitäten

In insgesamt 16 Vorhaben der Initiative ENERGIEWENDEBAUEN werden Forschungen mit einem „netzreaktivem Forschungsfokus“ durchgeführt. Zur Identifikation dieser Projekte wurden sowohl die digitale Projektlandkarte EWB als auch die Fragebogenrückläufe nach den Begriffen „netzreaktiv“, „netzdienlich“ und „netzneutral“ gescreent. Die Namen der Forschungsvorhaben[1] sowie deren Laufzeiten gehen aus Abbildung 1 hervor.

Abbildung 1: Laufzeiten der Projekte mit Forschungsfokus „Netzreaktivität“

Die ersten Projekte zum Thema Netzreaktivität, welche im Untersuchungszeitraum der Wissenschaftlichen Begleitforschung ENEGIEWENDEBAUEN liegen[2], starteten Mitte 2012 sowie Anfang 2013. In den Jahren 2013 und 2014 wurden zunächst keine weiteren Vorhaben zu diesem Thema bewilligt. Seit Anfang 2015 ist jedoch ein vermehrter Start von Forschungsvorhaben mit netzreaktivem Forschungsfokus festzustellen.

In den Projekten werden sowohl netzreaktive Einzelgebäude, netzreaktive Quartiere als auch netzreaktiv betriebene Einzelkomponenten analysiert.

[1] Ggf. werden mehrere Teilvorhaben als Verbundvorhaben zusammengefasst dargestellt.
[2] Alle Projekte, welche am 01.01.2016 bereits begonnen hatten und danach begonnen haben.

Abbildung 2 spiegelt die Einordnung der Vorhaben hinsichtlich dieser Kategorien quantitativ wider.

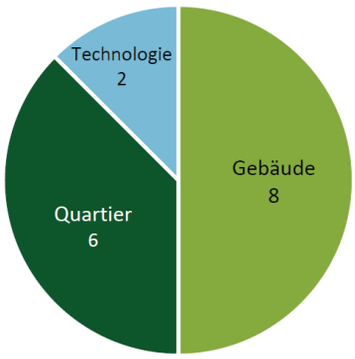

Abbildung 2: Kategorisierung der Projekte mit Forschungsfokus „Netzreaktivität“

In der Mehrzahl der Projekte steht der netzdienliche oder netzneutrale Gebäudebetrieb im Vordergrund. Auf Quartiersebene werden in sechs Projekten sowohl Wärmenetze als auch Gebäudeverbünde netzdienlich gestaltet. In zwei Projekten werden Technologien zur solaren Stromerzeugung und -speicherung in einem netzreaktiven Kontext betrachtet.

Eine Analyse der Projektziele zeigt, dass im Großteil aller Projekte die Entwicklung von netzdienlichen Betriebsstrategien und -modi bzw. eine netzdienliche Betriebsoptimierung im Vordergrund steht. In einem Gebäudeprojekt wird die Netzdienlichkeit bewertet, jedoch nicht hinsichtlich dieser optimiert. Die von diesen Forschungsvorhaben gewählte Definition und Methodik bei der Optimierung und Bewertung von Netzdienlichkeit geht aus der aktuell vorhandenen Datengrundlage nicht hervor. Diese Informationen wären für die weiteren Arbeiten der Wissenschaftlichen Begleitforschung von Interesse, um projektübergreifende Auswertungen zu netzdienlichen Maßnahmen durchführen zu können.

Als ein Forschungsvorhaben mit weiterreichendem Ziel innerhalb dieser Thematik ist das Projekt „LowEx – Netzreaktive Gebäude“ zu nennen, in dem eine Bewertungsmethodik für die Netzdienlichkeit von Gebäudeenergiesystemen entwickelt wurde. Die Ergebnisse dieses, bereits abgeschlossenen, Projektes stellen grundlegende Arbeiten für ein Konzept für netzreaktive Gebäude dar und werden in den nächsten Kapiteln aufgegriffen und analysiert.

4 Bewertungsmethoden

Gegenstand des Projektes „LowEx - Netzreaktive Gebäude - Ganzheitliche Bewertung von Bauphysik und Gebäudeenergiesystemen einschließlich ihrer Rolle in der Energiewirtschaft: Energie, Exergie, Leistungsbezug und -abgabe“ war es, Kenngrößen und Methoden zur Charakterisierung, Beschreibung und Bewertung der Netzreaktivität zu entwickeln. Hierbei wurden von den drei beteiligten Forschungsinstituten, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IWES und dem E.ON Energieforschungszentrum, unterschiedliche Ansätze verfolgt, welche im Folgenden zusammenfassend beschrieben und verglichen werden.

4.1 Bilanzgrenzen der Bewertung

Eine erste Gegenüberstellung der Bewertungsgrößen kann hinsichtlich der gewählten Bilanzgrenze durchgeführt werden. Durch die Wahl der Bilanzgrenze wird zum einen das analysierte Energiesystem begrenzt, zum anderen ändern sich die Ziele und die Aussage der Bewertung. Abbildung 3 zeigt fünf Bilanzgrenzen von Energiesystemen innerhalb denen die Netzreaktivität theoretisch analysiert werden kann. Parallel kann ein Abgrenzung der Bilanzräume auf Basis der Spannungsebene erfolgen, an den das betrachtete Energiesysteme angeschlossen ist bzw. versorgt wird. In der Regel lassen sich die Bilanzräume einer Spannungsebene zuordnen.

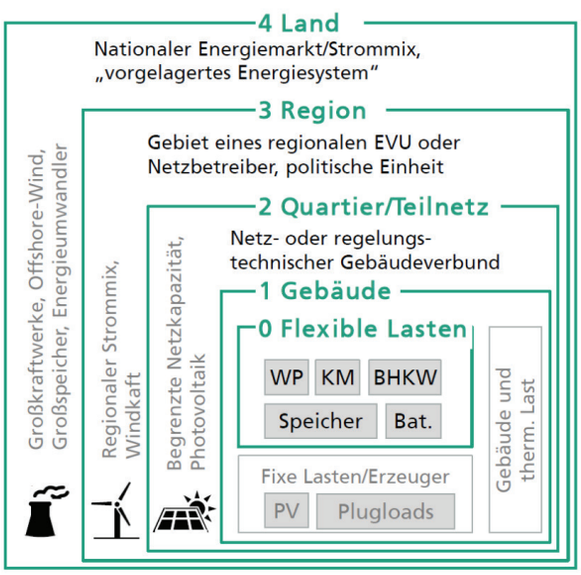

Abbildung 3: Bilanzgrenzen von Energiesystemen [3]

Bilanzgrenze 0 – Flexible Lasten beinhaltet alle Wärme- und Kälteerzeuger, wie Wärmepumpen (WP), Kältemaschinen (KM) und Blockheizkraftwerke (BHKW), die flexibel, und im Optimalfall netzdienlich, betrieben werden können. Unter der Randbedingung, dass der Wärme- bzw. Kältebedarf[3] gedeckt werden muss und der Tatsache, dass netzdienliche Wärmeerzeugungszeitpunkte nicht mit Zeitpunkten des Wärmebedarfes zusammenfallen, sind Flexibilitäten notwendig. So können bspw. durch Energiespeicher Erzeugung und Bedarf zeitlich entkoppelt und damit Flexibilität geschaffen werden.

Unter **Bilanzgrenze 1 – Gebäude** werden alle flexiblen Lasten, fixe Lasten und Erzeuger (thermisch und elektrisch) zusammengefasst. Als fixe Lasten bzw. Erzeuger werden Anlagen, deren Einsatz durch äußere Einflüsse wie das Wetter oder den Nutzer vorbestimmt ist, definiert. Der Anschluss einzelner Gebäude (normaler Größe) erfolgt in der Regel über den Hausanschluss an das Niederspannungsnetz.

Unter **Bilanzgrenze 2 – Quartier/Teilnetz** ist ein netz- oder regelungstechnischer Gebäudeverbund zu sehen. Je nach Anschlussleistung des Quartieres findet die lokale Stromversorgung zumeist auf Mittelspannungsebene mit 10 bzw. 20 kV statt. Durch lokale Transformatoren erfolgt die Versorgung der einzelnen Haushalte und kleiner Verbraucher eines Quartiers auf Niederspannungsebene (0,4 kV). Neben Quartieren, welche Strom aufgrund ihrer Anschlussleistung über die Mittelspannungsebene beziehen bzw. einspeisen, kann auf dieser Ebene ebenfalls die Einspeisung elektrischer Energie aus Freiflächenphotovoltaik erfolgen. Die ursprüngliche Auslegung des Verteilnetzes erfolgte mit dem Zweck der Verteilung von zentral, aus Großkraftwerken bereitgestellter elektrischer Energie. Aufgrund der sich ändernden Rahmenbedingungen wie der zunehmenden dezentralen Erzeugung aus erneuerbaren Quellen, die Steigerung der Abnahme durch elektrische Wärmeerzeugung oder zur Versorgung neuer, zusätzlicher Verbraucher wie Elektromobilität bei gleichzeitig begrenzten Netzkapazitäten, kann es mittlerweile auch auf dieser Spannungsebene zu Engpässen und Ausfällen kommen.

Als **Bilanzgrenze 3 – Region** ist das Gebiet eines regionalen Energieversorgers (EVU) oder Netzbetreibers oder eine politische Einheit definiert. Es ist zu beachten, dass die technische Abgrenzung dieses Raumes nicht zwingenderweise mit der politischen Abgrenzung übereinstimmt. Die höchste betriebene Netzebene der Bilanzgrenze 3 ist üblicherweise die Hochspannungsebene mit 110 kV, welche zur großräumigen Verteilung von Strom dient. Auf dieser Netzebene werden typischerweise Onshore Windparks eingebunden. Darüber hinaus kann für diese Bilanzgrenze ein regionaler Strommix identifiziert werden.

Bilanzgrenze 4 – Land beschreibt das „vorgelagerte Energiesystem“. Auf Landesebene wird der nationale Strommix betrachtet. Des Weiteren existiert ein nationaler Strommarkt, welcher gesetzlichen Regelungen unterliegt und auf dessen Börsen, wie beispielsweise der European Energy Exchange (EEX), Stromhandel betrieben wird. Die

[3] Aus Gründen der Lesbarkeit wird im Folgenden die Kälteversorgung nicht immer explizit erwähnt. Statt „Wärme und Kälteerzeugung/-bedarf/etc.“ wird nur die Wärmeseite aufgeführt. Sofern nicht anders beschrieben gelten die gleichen Aussagen für die Kälteseite.

großräumige Übertragung von elektrischer Energie erfolgt über das Übertragungsnetz auf Höchstspannungsebene mit 380/220 kV. An diese Spannungsebenen werden Großkraftwerke, Offshore-Windparks und Großspeicher angeschlossen.

Bei den im Forschungsvorhaben „Netzreaktive Gebäude“ angestellten Untersuchungen der Netzreaktivität

- legt das Fraunhofer ISE den Fokus auf Einzelgebäude (Bilanzraum 1) und bewertet das netzreaktive Verhalten im Kontext des nationalen Strommixes bzw. Energiemarktes (Bilanzraum 4) [3],

- betrachtet das Fraunhofer IWES die netzdienlichen Potentiale von Wärmepumpen in einem Wohnquartier (Bilanzraum 2) [3] und

- analysiert das E.ON Energieforschungszentrum das Zusammenspiel von Gebäudeenergiesystemen (Bilanzraum 1) in einem netztechnischen Gebäudeverbund (Bilanzraum 2) unter Einbezug des vorgelagerten, nationalen Energiesystems (Bilanzraum 4) [10].

4.2 Bewertungsgrößen

Wie eingangs beschrieben, wird durch die Volatilität der Stromerzeugung durch Erneuerbare Energieträger eine zeitvariante Beschreibung des Strombezugsverhaltens immer wichtiger. Diese Notwendigkeit zur dynamischen Betrachtung wurde in allen Kenngrößen und Bewertungsmethoden aufgegriffen.

Grid Support Coefficients [3], [6]

Die vom Fraunhofer ISE entwickelten Grid Support Coefficients quantifizieren die Übereinstimmung der elektrischen Last mit der relativen Verfügbarkeit von Strom im nationalen Energiesystem. Die Verfügbarkeit kann dabei eine marktwirtschaftliche Verfügbarkeit oder aber eine technische Verfügbarkeit darstellen und wird durch ein Netzsignal widergespiegelt. Vier im Forschungsprojekt verwendete Netzsignale sind der EEX-Day-Ahead-Preis (EEX), die Residuallast (RES), der (nicht-erneuerbare) kumulierte Energieverbrauch (KEV) und der Anteil von Wind und PV im nationalen Strommix (WPV).
Der absolute Grid Support Coefficient GSC_{abs} “gibt an ob Strom – im gewichteten Mittel – bei einer über- oder unterdurchschnittlich hohen Stromnachfrage […] bezogen wird“ [3]. Er wird berechnet aus dem zeitvarianten Strombezug $W_{el}(t)$, dem zeitvarianten Netzsignal $G(t)$ sowie dem kumulierten Strombezug $W_{el,ges}$ über den Betrachtungszeitraum T und das arithmetische Mittel des Netzsignals $\bar{G}$. Dabei ist nicht nur das Ergebnis, sondern auch die Interpretation von GSC_{abs} abhängig vom gewählten Signal.

$$GSC_{\mathrm{abs}}(G) = \frac{\sum_{t=0}^{T} W_{\mathrm{el}}(t) \cdot G(t)}{W_{\mathrm{el,ges}} \cdot \bar{G}} \tag{4.1}$$

Die Kennzahl GSC_{abs} eignet sich beispielsweise zum Vergleich verschiedener Betriebsverhalten von Verbrauchern. Da der mögliche Wertebereich jedoch abhängig von Betriebskennwerten sowie von der Varianz des Netzsignales ist, ist eine Bewertung der Netzreaktivität auf Basis eines erzielten Wertes für GSC_{abs} problematisch.
Aus diesem Grund wurde der relative Grid Support Coefficient GSC_{rel} entwickelt, durch welchen GSC_{abs} in Bezug zu seinen potentiellen Extremwerten dargestellt wird. Die Extremwerte werden dafür tageweise durch Umlegung des Betriebs auf die hinsichtlich des Netzsignals günstigsten (obere Schranke) beziehungsweise ungünstigsten (untere Schranke) Zeitpunkte des Tages bezogen. Dabei werden ausschließlich Vollaststunden angenommen. Mit Hilfe des erzielten GSC_{abs} und der potentiellen Extrema für GSC_{abs} wird GSC_{rel} wie folgt bestimmt.

$$GSC_{\mathrm{rel}} = 200 \cdot \frac{GSC_{\mathrm{abs}}\,(\mathrm{min}) - GSC_{\mathrm{abs}}(\mathrm{ist})}{GSC_{\mathrm{abs}}(\mathrm{min}) - GSC_{\mathrm{abs}}(\mathrm{max})} - 100 \tag{4.2}$$

Der Wertebereich für GSC_{rel} liegt somit zwischen -100 für einen maximal netzadversen und +100 für einen maximal netzdienlichen Betrieb. Folglich liefert der Wert für GSC_{rel} eine direkte Einordnungsmöglichkeit bezüglich der Netzreaktivität.

Primärenergie-Nutzungszahl [3]

Das Fraunhofer IWES bewertet die Netzdienlichkeit des Betriebes einer Wärmepumpe hingegen auf Basis einer so definierten Primärenergie-Nutzungszahl. Die Kennzahl ist dimensionslos und gibt Aufschluss über die primärenergetische Effizienz der betrachteten Anlage.
Die Primärenergie-Nutzungszahl PNZ wird als Quotient aus der in einem Betrachtungszeitraum T erzeugten Wärmemenge und der Summe des Produktes aus zeitvariantem Strombezug $W_{el}(t)$ und zeitvariantem Primärenergiefaktor $f_{PE}(t)$ bestimmt.

$$PNZ = \frac{Q_{WP}}{\sum_{t=0}^{T} W_{\mathrm{el}}(t) \cdot f_{\mathrm{PE}}(t)} \tag{4.3}$$

Der im vorherigen Unterkapitel beschriebene Bezug auf das umliegende Quartier wird über die Berechnung des Primärenergiefaktors hergestellt. So geht der zeitliche Verlauf des PE-Faktors aus dem zeitlichen Verlauf der Residuallast im Quartier hervor. Zu Zeitpunkten lokaler Stromüberschüsse, sprich negativer lokaler Residuallast, wird $f_{PE}(t)$ zu Null gesetzt. Zu Zeitpunkten positiver lokaler RES wird $f_{PE}(t)$ auf den konstanten Wert des Primärenergiefaktors für Graustrom von 2,6 nach EnEV 2009 gesetzt.

Netzbezogener Primärenergiebedarf [10], [11]

Das E.ON Energieforschungszentrum stellt eine weitere Methodik zur Bewertung der Netzreaktivität eines Gebäudeenergiesystems mittels der aufgewendeten Primärenergie bereit. Durch die Methodik werden netzdienliche Einflüsse direkt im Primärenergie-

bedarf abgebildet. Es werden drei Möglichkeiten zur Berechnung des Primärenergiefaktors gezeigt, welche sich durch die Bilanzgrenze bzw. durch die gewünschte Aussage des Ergebnisses unterscheiden.
So wird der zeitvariante Primärenergiefaktor des gesamten nationalen Strommixes $f_{\mathrm{PE,mix}}(t)$ über die primärenergetisch gewichteten Leistungen P_i der Kraftwerke (KW) i zum Zeitpunkt t bestimmt. η_{Netz} gibt den Wirkungsgrad des elektrischen Netzes wider.

$$f_{\mathrm{PE,mix}}(t) = \frac{\sum_i P_i(t) \cdot f_{\mathrm{PE,KW},i}}{\sum_i P_i(t)} \cdot \frac{1}{\eta_{\mathrm{Netz}}} \tag{4.4}$$

Zur Bewertung eines zusätzlichen Verbrauchers im Energiesystem, beispielsweise einer Wärmepumpe, kann alternativ der PEF des Ergänzungsstrommix $f_{\mathrm{PE,Erg}}(t)$ betrachtet werden. Dieser beschreibt den PEF des Stromes, der zur Deckung der zusätzlichen Last erzeugt wird. So ist $f_{\mathrm{PE,Erg}}(t)$ im Falle einer negativen Residuallast gleich des PEF des erneuerbaren Anteils $f_{\mathrm{PE,EE}}$ und nimmt für eine positive Residuallast den Wert eines konventionellen Kraftwerkes ein.
Um Einflüsse des lokalen Verteilnetzes mit abzubilden, wurde darüber hinaus ein hier als netzbezogener PEF betitelter Primärenergiefaktor $f_{\mathrm{PE,Netz}}(t)$ entwickelt. So kann es in Folge eines Ungleichgewichts zwischen lokaler Erzeugung und Bedarf zu Engpässen in lokalen Netzen oder bei der Übergabe an das höher gelegene Netz kommen. In solchen Situationen werden Einspeisemanagementmaßnahmen ergriffen und EE-Anlagen abgeregelt. Eine Alternative zur Netzentlastung stellt das Aufschalten zusätzlicher Lasten dar. Wird benötigte Leistungsänderung zur Vermeidung des Engpasses $P_{\mathrm{Engp}}(t)$ für jeden Zeitpunkt t berechnet, ergibt sich daraus der Verlauf für $f_{\mathrm{PE,Netz}}(t)$.

$$f_{\mathrm{PE,Netz}}(t) = \begin{cases} f_{\mathrm{PE,mix/Erg}}(t) & \text{if } P_{\mathrm{Engp}}(t) = 0 \\ f_{\mathrm{PE,EE}} & \text{if } P_{\mathrm{Engp}}(t) > 0 \end{cases} \tag{4.5}$$

So wird $f_{\mathrm{PE,Netz}}(t)$ wahlweise gleich dem nationalen Strommix $f_{\mathrm{PE,mix}}(t)$ oder Ergänzungsstrommix $f_{\mathrm{PE,Erg}}(t)$ gesetzt, für den Fall, dass kein Engpass vorliegt. Im Falle eines Engpasses nimmt der netzbezogene PEF den Wert des erneuerbaren Anteils $f_{\mathrm{PE,EE}}$ an.

4.3 Diskussion

Die vorgestellten Bewertungsgrößen und -methoden wurden alle im Sinne der Beschreibung der Netzreaktivität entwickelt. Wie im Laufe dieser Studie dargelegt, gibt es momentan keine einheitliche Definition des Begriffes. So unterscheiden sich die Ziele, welche mit einer Optimierung der unterschiedlichen Bewertungsgrößen in einem Energiesystem verfolgt werden in Anhängigkeit der Definition von Netzreaktivität sowie der gewählten Bilanzgrenze.
Mittels einer Bewertung durch Grid Support Coefficients (Formeln 4.1 und 4.2) wird das Ziel der Maximierung der (Markt-) Effizienz der Stromversorgung auf nationaler Ebene verfolgt. Durch eine Optimierung der Primärenergie-Nutzungszahl (Formel 4.3) wird hingegen eine maximale Deckung zwischen lokaler Last und lokaler Erzeugung auf in-

nerhalb des betrachteten Quartiers oder Gebietes erzielt [3]. Durch eine Kalkulation mit dem PEF des nationalen Strommixes (Formel (4.4)) wird die eingesetzte Primärenergie der Stromversorgung minimiert. Durch Verwendung des netzbezogenen PEF (Formel 4.5) wird darüber hinaus eine technische Dienlichkeit für das Netz erzielt, indem Netzengpässe minimiert werden [10].

4.4 Kurzusammenfassung

Zusammenfassend werden die Bewertungsgrößen hinsichtlich der Bilanzgrenzen, der Ziele und der externen Netzsignale, welche über den zeitvarianten Strombezug des betrachteten Energiesystems hinaus benötigt werden, in Tabelle 1 charakterisiert.

Tabelle 1: Kurzcharakteristik der Bewertungsgrößen

Bewertungsgröße	Bezeichnung	Bilanzgrenze	Ziele	Netzsignal
Absoluter Grid Support Coefficient	GSC_{abs}	1, 4	Maximierung der (Markt-) Effizienz der Stromversorgung	Zeitvariantes nationales Signal, zum Beispiel - EEX-Day-Ahead-Preis - Residuallast - kumulierter Energieverbrauch - Anteil EE im Strommix
Relativer Grid Support Coefficient	GSC_{rel}	1, 4	Maximierung der (Markt-) Effizienz der Stromversorgung	Zeitvariantes nationales Signal, zum Beispiel - EEX-Day-Ahead-Preis - Residuallast - kumulierter Energieverbrauch - Anteil EE im Strommix
Primärenergie-Nutzungszahl	PNZ	2	Maximierung der Deckung zwischen lokaler Erzeugung und Last	Statischer nationaler PEF Graustrom, zeitvarianter Verlauf der lokalen Residuallast
Primärenergiebedarf	PE_{mix}	1, 4	Minimierung des Primärenergieeinsatzes der Stromversorgung	Zeitvarianter nationaler Primärenergiefaktor
Netzbezogener Primärenergiebedarf	PE_{Netz}	1, 2, 4	Minimierung von Netzengpässen, Minimierung des Primärenergieeinsatzes der Stromversorgung	Zeitabhängige Engpassleistung des lokalen Netzes, zeitvarianter nationaler Primärenergiefaktor

5 Netzdienliche Potentiale von Gebäudeenergiesystemen

Damit sich ein Gebäude netzreaktiv verhalten kann, muss der Betrieb zum einen hinsichtlich eines nationalen und/oder lokalen Netzsignals optimiert werden. Zum anderen sind Flexibilitäten notwendig, um die Zeitpunkte der Energieerzeugung von den Zeitunkten des Energiebedarfes zu entkoppeln.

Die netzdienlichen Potentiale und charakteristischen Eigenschaften von Gebäuden, welche unterschiedlichen Flexibilitätsoptionen innehaben, wurden im Projekt „LowEx – Netzreaktive Gebäude“ simulativ untersucht und analysiert. Die Ergebnisse der drei beteiligten Forschungsinstitute Fraunhofer ISE, Fraunhofer IWES und dem E.ON Energieforschungszentrum werden in diesem Kapitel zusammenfassend dargestellt.

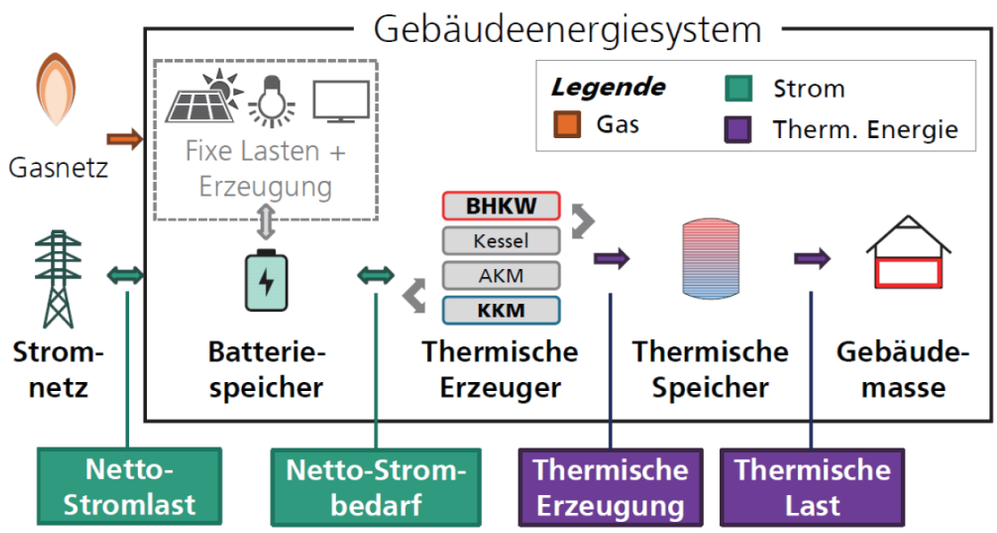

Abbildung 4: Energieflüsse, Flexibilitäts- und Speicheroptionen in Gebäudeenergiesystemen [3]

Abbildung 4 zeigt ein Gebäudeenergiesystem inklusive der wesentlichen Flexibilitäts- und Speicheroptionen. Letztere sind zu erkennen als:

- Batteriespeicher, welche zwischen dem Stromnetz, fixen Lasten und Erzeugern sowie thermischen Erzeugern dargestellt sind und im Rahmen des Projektes vom Fraunhofer ISE näher untersucht wurden,

- Fuel-Switch, bedeutet eine Umstellung des bei der Wärme- oder Kälteerzeugung eingesetzten Endenergieträgers. Als Fuel-Switch-Möglichkeiten sind in der Grafik die Umstellungsmöglichkeiten zwischen BHKW und Kessel sowie zwischen Absorptions- und Kompressionskältemaschine angedeutet. Entsprechende Flexibilitätspotentiale wurden vom Fraunhofer ISE analysiert.

- Thermische Speicher entkoppeln die thermische Erzeugung von der thermischen Last. Innerhalb des Projektes betrachteten das Fraunhofer ISE, das Fraunhofer IWES

und das E.ON Energieforschungszentrum netzdienliche Einflüsse von thermischen Speichern.

- Darüber hinaus wurde die Gebäudemasse als thermischer Speicher vom Fraunhofer ISE untersucht. Das Fraunhofer IWES simulierte Thermoaktive-Bauteilsysteme (TABS) im Zusammenspiel mit einem thermischen Speicher.

Batterien [3]

Die Ergebnisse der Simulationen des Fraunhofer ISE zeigen, dass durch Batterien die Netzdienlichkeit von Gebäudeenergiesystemen verbessert werden kann. Anhand des absoluten Grid Support Coefficients GSC_{abs} gemessen, zeigt sich eine Erhöhung der Netzdienlichkeit fast linear zur Speicherkapazität. Da sich die Speicherverluste ebenfalls mit der Speicherkapazität erhöhen, steigt der absolute Strombedarf innerhalb einer Bilanzgrenze ebenfalls mit der Kapazität der Batterie. In Kombination mit einer Wärmepumpe performt die Batterie besser als mit einer KWK-Anlage.

Fuel-Switch [3]

Auch Fuel-Switch bietet eine Möglichkeit zur Steigerung der Netzreaktivität. Die Analysen zeigen, dass sich Fuel-Switch insbesondere in Kombination mit BHKW-Systemen eignet, in Wärmepumpen jedoch aufgrund eines zu hohen Anstieges des Endenergieverbrauchs nicht zielführend ist. Als besonders netzdienliche Eigenschaft von Fuel-Switch in KWK-Systemen, stellte sich die Möglichkeit zur Vermeidung der BHKW-Stromerzeugung in langen Zeiträumen von erneuerbar verfügbarem Strom heraus.

Thermische (Wasser-)Speicher [3], [10]

Die Netzreaktivität eines Gebäudes nimmt durch thermische Speicher degressiv mit der Speicherkapazität zu. Der sinkende Nutzen einer Speichervergrößerung ist dabei über die Verschlechterung der Energieeffizienz zu erklären. Auch bei einer gleichzeitigen Überdimensionierung von Erzeugern und Speicher ist eine höhere absolute Netzdienlichkeit GSC_{abs} zu beobachten, als für normal ausgelegte Systeme. Für die Kombination mit KWK-Anlagen stellt der Wasserspeicher aufgrund seiner hohen Mehrverbräuche die unattraktivste, der in diesem Kapitel vorgestellten Flexibilitätsoptionen, dar.

Dass schon bei der kleinsten Speichergröße der Wechsel vom wärmegeführten zum netzdienlichen Betrieb mit Primärenergieeinsparungen verbunden ist, analysierte das E.ON Energieforschungszentrum. Hier wurden ebenfalls die mit der Speichergröße degressiv steigenden Verbesserungen im Primärenergieverbrauch beobachtet. Der gleiche Verlauf wurde für unterschiedliche Verteilernetztypen nachgewiesen. Der durchschnittlich erzielbare Primärenergiefaktor stellte sich allerdings als von der Netzstruktur abhängig heraus.

Gebäudemasse [3]

Die Untersuchungen der thermischen Gebäudemasse als Speicher des Fraunhofer ISE zeigen, dass das Gebäude bei nur sehr geringen Effizienzeinbußen hinsichtlich des Netzsignals optimiert betrieben werden kann. Dabei sind im Heizbetrieb keine Komfortverschlechterungen zu beobachten, im Kühlbetrieb müssen Komforttoleranzen angehoben werden.

Für den kombinierten Betrieb verschiedener TABS mit einem Pufferspeicher, simulierte das Fraunhofer IWES, ein hohes Lastverschiebepotential bei höheren energetischen Verlusten und Effizienzverlusten als im Referenzsystem.

6 Fazit und Ausblick

In dieser Studie wurden bestehende Definitionen, Bewertungsansätze und Auswertungen vergleichend dargestellt. Es wurde gezeigt, dass momentan keine allgemeingültige Definition von „Netzreaktivität“ und damit verbundenen Begriffen wie „netzdienlich“, „netzneutral“ und „netzadvers“ vorhanden ist. Darüber hinaus existiert keine einheitliche Bewertungsmethodik für (Gebäude-)Energiesysteme. Die unterschiedlichen Ziele, welche in aktuellen Forschungsvorhaben durch eine Verbesserung der Netzdienlichkeit erreicht werden sollen, reichen von Maximierung des Eigenverbrauchs von Erneuerbaren Energien, über eine Entlastung des Stromnetzes zur Vermeidung von Engpässen bis hin zur Optimierung hinsichtlich marktwirtschaftlicher Zielfunktionen. Bisher untersuchte Flexibilitäts- und Speicheroptionen sowie deren potentielle Beiträge zur Netzdienlichkeit eines Gebäudeenergiesystems wurden in dieser Studie qualitativ gezeigt. Dabei wurden Aspekte der Wirtschaftlichkeit und Nutzerakzeptanz netzreaktiver Systeme außen vor gelassen.

Die hier dargestellten Arbeiten dienen als Grundlage für das von der Wissenschaftlichen Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN zu entwickelnden Konzeptes zur netzreaktiven Gestaltung von Einzelgebäuden. Um im Rahmen dieses Konzeptes Anforderungen an Gebäude definieren zu können, bedarf es zunächst eines einheitlichen Verständnisses der Netzreaktivität. Der zu betrachtende Bilanzraum sowie das durch einen netzdienlichen Betrieb zu verfolgende Ziel sind festzulegen. Darauf aufbauend können adäquate Bewertungsgrößen ausgewählt und gegebenenfalls weiterentwickelt werden. Flexibilitäts- und Speicheroptionen sollten hinsichtlich dieser Kennwerte untersucht werden, da nur so quantitative Empfehlungen ausgesprochen werden können. Dabei ist zu prüfen, ob das systemische Umfeld des Gebäudes ausreichend in einem Einzelgebäudeansatz abgebildet werden kann, oder eine netzreaktive Gestaltung und Bewertung immer nur durch Betrachtung eines größeren Bilanzraumes möglich ist.

Literatur

[1] K. Heuk und K.-D. Dettmann, Elektrische Energieversorgung – Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, Wiesbaden: 7. Auflage. Vieweg Verlag GmbH, 2007.

[2] Bundesnetzagentur; Bundeskartellamt, „Monitoringbericht 2016," Berlin, 2017.

[3] Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, ISE; Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, IWES, „Netzreaktive Gebäude - Ganzheitliche Bewertung von Bauphysik und Gebäudeenergiesystemen einschließlich ihrer Rolle in der Energiewirtschaft: Energie, Exergie, Leistungsbezug und -abgabe (FKZ 03ET1111B) - Abschlussbericht," Freiburg, Kassel, 2017.

[4] A. Wahl, V. Krieger, S. Gschwander, D. Kalz und K. Klein, „Latentwärmespeicher in netzreaktiven Gebäuden (LaNeGe) - Abschlussbericht," Stuttgart, Böblingen, Freiburg, 2015.

[5] P. Elsässer, „Vom +energiegebäude zum netzreaktiven Quartier," Drees & Sommer, 2017. [Online]. Available: https://m.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur/bvs/bv_karlsruhe_dateien/Vom_Plusenergiegebaeude_zum_netzreaktiven_Quartier_170404.pdf. [Zugriff am 21. Januar 2018].

[6] K. Klein, R. Langner, D. Kalz, S. Herkel und H.-M. Henning, „Grid support coefficients for electricity-based heating and cooling and field data analysis of present-day installations in Germany," Applied Energie, 162 Jg., pp. 853-867, 2016.

[7] D. Kalz, „Netzdienliche Gebäude unterstützen die Integration erneuerbarer Energien," [Online]. Available: https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2016/netzdienliche-gebaeude-unterstuetzen-die-integration-erneuerbarer-energien.html. [Zugriff am 21. Januar 2018].

[8] F. Bauer, „Anlagensteuerung mit dem intelligenten Messsystem," [Online]. Available: https://www.vde.com/resource/blob/824766/930ef1befdf423408ebc5fcbbb0541b9/vde-fnn-netzbetriebliche-anwendungsfaelle-infoblatt-data.pdf. [Zugriff am 21. Januar 2018].

[9] M. Sterner, F. Eckert, M. Thema und F. Bauer, „Der positive Beitrag dezentraler Batteriespeicher für eine stabile Stromversorgung," Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg, 2015.

[10] E.ON Energieforschugszentrum; RWTH Aachen, „Netzreaktive Gebäude - Ganzheitliche Bewertung von Bauphysik und Gebäudeenergiesystemen einschließlich ihrer Rolle in der Energiewirtschaft: Energie, Exergie, Leistungsbezug und -abgabe (FKZ 03ET1111B) - Abschlussbericht," Aachen, 2017.

[11] S. Stinner, T. Schlösser, K. Huchtemann, D. Müller und A. Monti, „Primary energy evaluation of heat pumps considering dynamic boundary conditions in the energy system," Energy, 138 Jg., pp. 60-78, 2017.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Herausgeber: Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN
RWTH Aachen University
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
Mathieustraße 10
52074 Aachen

E-Mail: begleitforschung@eonerc.rwth-aachen.de
Internet: www.energiewendebauen.de

Autoren: Sarah Henn[1], Tanja Osterhage[1], Dirk Müller[1], Samir Kharboutli[2] und Sebastian Flemming[2] unter Mitwirkung weiterer Mitglieder der Wissenschaftlichen Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN

Bildquelle sofern nicht explizit anders angegeben Wissenschaftliche Begleitforschung.

Für den Inhalt und das Bildmaterial der einzelnen Beiträge tragen alleine die Autoren die Verantwortung.
Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

ISBN: 978-3-942789-91-2

[1] Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen
[2] Fraunhofer IOSB-AST