

Netzdienliche Gebäudekonzepte in den Forschungsprojekten der Förderinitiative Energiewendebauen

Analyse der Definitionen von Netzdienlichkeit im Gebäudebereich
und aufbauende Querauswertung der netzdienlichen
Gebäudekonzepte aus der Förderinitiative Energiewendebauen

April 2024

verfasst von Yizhuo Zhang¹, Nico Fuchs¹, Laura Maier¹, Dirk Müller¹

Inhalt

1. Einleitung.....	3
2. Grundlagen Netzdienlichkeit im Gebäudebereich	4
2.1 Definitionsmatrix Netzdienlichkeit.....	4
2.2 Technische Bausteine von netzdienlichen Gebäudekonzepten.....	6
3. Netzdienliche Gebäudekonzepte in der Forschung	7
4. Zusammenfassung und Ausblick	10
Literatur.....	11

1. Einleitung

Ein Ziel des deutschen Klimaschutzes bis 2030 ist die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien (EE) am Stromverbrauch auf mindestens 80 % [1]. Witterungsbedingte Schwankungen in der Stromerzeugung aus EE stellen Herausforderungen an die Versorgungssicherheit und Netzstabilität. Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit und Netzstabilität stellt die Umwandlung der Energiesysteme von der traditionellen Angebotsregelung zum Lastmanagement mit ergänzenden Energiespeichern eine potenzielle Lösung dar. Ein Gebäude, das sein Verbrauchs- und Einspeiseverhalten nach den Bedürfnissen des Netzes ausrichtet, gilt als netzdienlich [2]. Mit einem Anteil von ca. 30 % am Endenergieverbrauch [3] und einem steigenden Anteil des Stroms darin [4], kann der Gebäudesektor in Deutschland durch einen flexiblen Betrieb einen wesentlichen Beitrag zu mehr Flexibilität im Netz leisten.

Das Modul 2 der wissenschaftlichen Begleitforschung der Forschungsinitiative Energiewendebauen (EWB) zielt darauf ab, die Integration einzelner Gebäude in das Gesamtsystem zu untersuchen, indem es netzdienliche Gebäudekonzepte erforscht. In Bezug auf diese Thematik hat das Modul 2 in dieser Arbeit verschiedene Definitionen und Bewertungsperspektiven von Netzdienlichkeit im Gebäudebereich analysiert, um mögliche Ziele, Mehrwerte und Eigenschaften eines netzdienlichen Gebäudes zu identifizieren. Die identifizierten Charakteristiken werden in einer Matrix zusammengefasst und bewertet (vgl. Kapitel 2.1). In Kapitel 2.2 werden technische Optionen zur Gestaltung netzdienlicher Gebäudeenergiesysteme analysiert. Basierend auf diesen Erkenntnissen bewertet das Modul 2 netzdienliche Gebäudekonzepte im Rahmen der Forschungsinitiative EWB und die Querauswertungsergebnisse werden in Kapitel 3 vorgestellt.

2. Grundlagen Netzdienlichkeit im Gebäudebereich

2.1 Definitionsmatrix Netzdienlichkeit

Im Rahmen der vorbereitenden Arbeit für dieses Forschungsfeld hat das Modul 2 eine umfangreiche Literaturrecherche zu Definitionen und Bewertungsperspektiven von netzdienlichen Gebäuden und Bewertungsmethoden von Netzdienlichkeit durchgeführt. Diese Untersuchung zielt darauf ab, ein fundiertes Verständnis der Bewertungskriterien von Gebäudeenergiesystemen (GES) im Kontext ihrer Dienlichkeit für das Stromnetz zu entwickeln.

Bei der Analyse der Definitionen und Bewertungsperspektiven wird festgelegt, dass die entscheidenden Eigenschaften eines GES im Sinne von Netzdienlichkeit grundsätzlich in zwei Kategorien eingeteilt werden können: die Betriebsweisen des GES und deren Auswirkungen auf das Stromnetz.

Eine häufig in der Forschung untersuchte Betriebsweise ist der netzsignalgeführte Gebäudebetrieb [5–7]. Entsprechend der netzdienlichen Ziele können diverse Netzsignale als Führungsgröße des Gebäudebetriebs eingeführt werden. Mögliche Netzsignale zur Verschiebung der Lasten in die lastschwachen Zeiträume können EPEX-Day-Ahead-Preise und Residuallasten² sein. Für ein emissionsarmes Stromverbrauchsverhalten können der Anteil von Wind- und PV³-Energie im Strommix oder der CO₂-Faktor des Strommixes als Netzsignal dienen [5]. Die Auswahl der Netzsignale hängt vom jeweiligen Bilanzkreis im Stromnetz ab, wodurch die Netzbedürfnisse auf verschiedenen Netzebenen repräsentiert werden können. Einige Quellen nehmen eine lokale Stromerzeugung auf Gebäudeebene an und diskutieren eine hohe Deckung der Last durch lokale Erzeugung. Dieses Verhältnis wird über spezifische Indikatoren, wie bspw. dem Load Match Index, bewertet [5, 9]. Darüber hinaus werden die Spitzenlasten im Stromnetz als ein wichtiges Signal für die Wahrscheinlichkeit der Netzengpässe und dem Netzausbaubedarf angesehen. Somit wird die Begrenzung bzw. Reduktion der Spitzenlasten von Gebäuden in einigen Studien als einer der netzdienlichen Aspekte in Betracht gezogen und Indikatoren zur Bewertung entwickelt [9, 10].

Die möglichen Auswirkungen netzdienlicher Gebäude auf das Stromnetz sind aufgrund unterschiedlicher Perspektiven und Interpretationsschwierigkeiten heterogen. In grundlegenden Kategorien lassen sich diese Auswirkungen in Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Versorgungssicherheit unterteilen. Im Bereich der wirtschaftlichen Stromerzeugung und -versorgung werden abstrakte Auswirkungen wie die Deckung der Nachfrage mit minimalen volkswirtschaftlichen Kosten, hohe Erlöse beim Stromverkauf und die Steigerung der Markteffizienz als Ziele netzdienlicher Gebäude vorgeschlagen. Für das Ziel, den Anteil erneuerbarer Energien bei der Bedarfsdeckung zu erhöhen, werden konkretere Maßnahmen wie der Betrieb von Gebäuden nach dem EE-Anteil im Strommix identifiziert [5]. Im Hinblick auf die Versorgungssicherheit bei zunehmendem Ausbau erneuerbarer Energien erfordern die angestrebten Auswirkungen eine detaillierte Betrachtung und Interpretation auf der Gebäudeebene [5, 11].

² Bei dem Begriff Residuallast handelt es sich um die Last, die nach Abzug dargebotsabhängig einspeisender EE verbleibt und durch steuerbare gesicherte Leistung erbracht werden muss [8].

³ Photovoltaik

Die aus der Literaturrecherche identifizierten Ziele, Mehrwerte und Eigenschaften eines netzdienlichen Gebäudes sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Erkenntnisse aus der Definitionsmatrix bildeten die Grundlage für einen Workshop beim 11. Projektleitungstreffen der wissenschaftlichen Begleitforschung EWB [12]. Im Rahmen des Workshops wurden die gesammelten Ziele, Mehrwerte und Eigenschaften eines netzdienlichen Gebäudes bewertet. Die dabei identifizierten wichtigsten Eigenschaften sind in Tabelle 1 in fett markiert.

Tabelle 1: Definitionsmatrix von Netzdienlichkeit im Gebäudebereich.

Ziele, Mehrwerte und Eigenschaften eines netzdienlichen Gebäudes		
Betriebsweise des Gebäudeenergiesystems	Auswirkungen auf das Stromnetz (aufgeteilt in drei Perspektiven)	
Hohe Übereinstimmung der lokalen Erzeugung und Last	<i>Wirtschaftlichkeit</i>	Abdeckung der Nachfrage mit volkswirtschaftlich minimalen Kosten
		Hohe Erlöse beim Stromverkauf
		Erhöhung der (Markt-)Effizienz der Stromversorgung
Anpassung des Strombezuges an die Stromsignale	<i>Umweltverträglichkeit</i>	Reduzierung der Emissionen beim Stromverbrauch
Spitzenlastbegrenzung/-reduktion	<i>Versorgungssicherheit</i>	Verringerung von Netzengpässen
		Reduzierung des Netzausbaubedarfs
		Entlastung der Verteilnetze

Besonders hervorgehoben wurde in der Diskussion die Anpassung des GES an Strommarktsignale, insbesondere die Reaktion auf Börsenstrompreise, als entscheidende Eigenschaft netzdienlicher Gebäude. Ein identifiziertes Problem besteht in der begrenzten Verfügbarkeit variabler Strompreise für Kleinstromverbraucher. Ebenfalls wurde darauf hingewiesen, dass einfache Lastverschiebungen durch einheitliche Signale zu Gleichzeitigkeitseffekten bei niedrigen Strompreisen führen können. Daher könnten alternative Signale für netzdienliche Stromnutzung erforderlich sein, wie beispielsweise Signale aus lokalen Strommärkten. Die reine Maximierung der Eigenstromnutzung sollte nicht zwangsläufig netzdienliche Auswirkungen haben, vielmehr sollten die Bedingungen im Stromnetz als vorrangige Referenz für den Gebäudebetrieb betrachtet werden.

Als wichtigste Soll-Auswirkungen netzdienlicher Gebäude wurden die Ziele in der Kategorie Versorgungssicherheit bewertet. Darauf folgt die kostengünstige Deckung der Stromnachfrage. Positive Effekte netzdienlicher Gebäude sollten den Ausgleich von Stromversorgungsschwankungen, den Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien und die Senkung der Gesamtemissionen durch flexiblen Strombezug umfassen.

2.2 Technische Bausteine von netzdienlichen Gebäudekonzepten

Zur Umsetzung eines Gebäudekonzeptes mit den identifizierten netzdienlichen Eigenschaften sind technische Einheiten mit Flexibilitätpotenzialen von großer Bedeutung. Im Rahmen des Fragebogens der wissenschaftlichen Begleitforschung EWB im Jahr 2021 wurden die Meinungen der Forschungsprojekte der Förderinitiative EWB zur Wichtigkeit verschiedener technischer Optionen zur Gestaltung netzdienlicher Gebäudekonzepte abgefragt. Diese Frage wurde von 89 Projekten beantwortet. Die Ergebnisse werden in Abbildung 1 dargestellt.

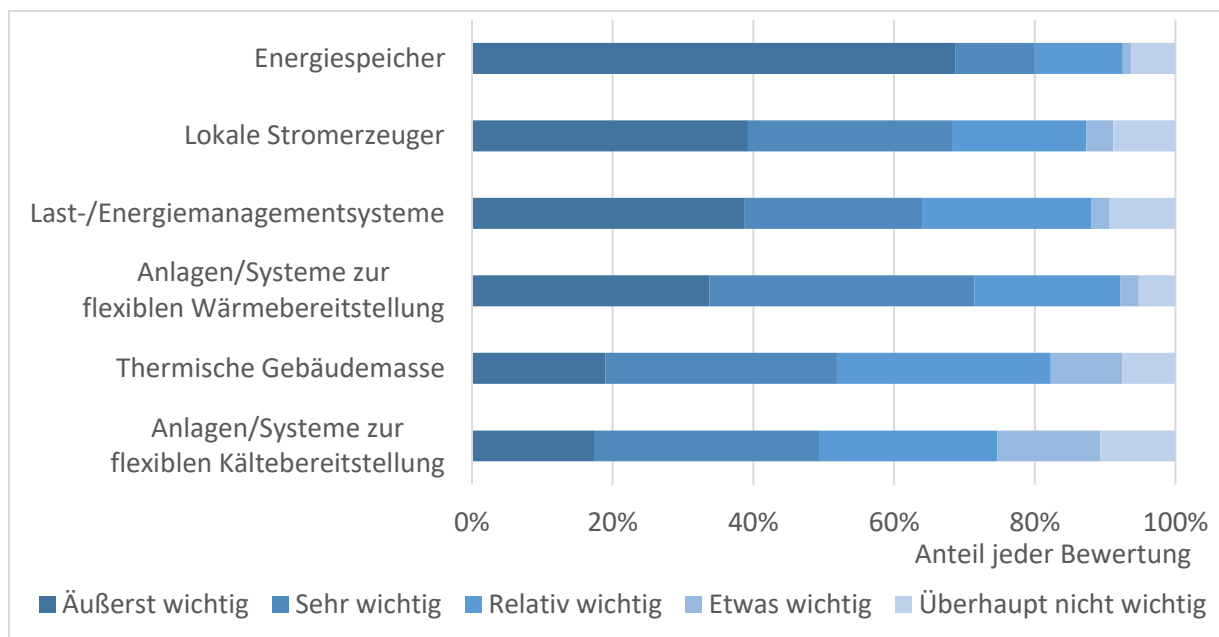


Abbildung 1: Meinung der befragten Projekte zur Wichtigkeit diverser technischer Optionen für die Gestaltung netzdienlicher Gebäudekonzepte.

Fast 70 % der Befragten bewerteten Energiespeicher wie Batterien und thermische Wärmespeicher als äußerst wichtig, was Energiespeicher zu einer unerlässlichen Komponente in einem netzdienlichen Gebäude macht. Lokale Stromerzeuger wie PV-Anlagen, Blockheizkraftwerke (BHKWs), Windkraftanlagen (WKAs) und Brennstoffzellen folgten als nächstwichtigste Optionen, da sie dazu beitragen können, den Strombezug zu reduzieren. Last- und Energiemanagementsysteme, die die Steuerungs- und Betriebsstrategien ausführen und die dynamischen Netzanforderungen berücksichtigen, spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle. Ebenso wichtig sind Anlagen oder Systeme zur flexiblen Wärmebereitstellung, die beispielsweise durch Power-to-X-Anlagen wie Wärmepumpen und Elektrolyseure in Kombination mit Wasserstoffspeichern und Brennstoffzellen realisiert werden können. Im Gegensatz dazu steht die flexible Kälteerzeugung nicht im Fokus, was auf den geringeren Kältebedarf im Vergleich zum Wärmebedarf zurückzuführen sein könnte. Die thermische Gebäudemasse kann ebenfalls durch Technologien wie Bauteilaktivierung oder Überhitzung der Raumtemperatur aktiviert und zur flexiblen Raumheizung genutzt werden.

Eine ähnliche Tendenz zeigt die Analyse der netzdienlichen Gebäudekonzepte in den Forschungsprojekten im Gebäudebereich. Diese Analyse wird im Folgenden vorgestellt.

3. Netzdienliche Gebäudekonzepte in der Forschung

Als Datengrundlage zur Identifizierung von Projekten, die netzdienliche Konzepte untersuchen und das gesamte GES als Betrachtungsbilanzgrenze haben, dienen hauptsächlich die Kurzbeschreibungen der Teilprojekte aus dem Internetportal EnArgus, der Fragebogen aus dem Jahr 2021 (vgl. Kapitel 2.2) sowie die Homepages der ausführenden Stellen und Abschlussberichte von abgeschlossenen Projekten. Im Fragebogen wurde abgefragt, ob und was für netzdienliche Konzepte zur Integration des Einzelgebäudes ins übergeordnete Energiesystem in den Projekten entwickelt werden. Insgesamt konnten 16 Verbundvorhaben identifiziert werden, die systemische, netzdienliche Ansätze im Gebäudebereich untersuchen.

Die Querauswertung in dieser Arbeit umfasst eine umfangreiche Analyse der Anwendungsbereiche der eingesetzten Flexibilitäts- und Speicheroptionen sowie der Gebäudebetriebsstrategien. Darüber hinaus werden die erzielten netzdienlichen Auswirkungen der Projekte mit den untersuchten Ansätzen überprüft (mögliche Auswirkungen netzdienlicher Gebäude vgl. Kapitel 2.1).

Die untersuchten Flexibilitätsoptionen im Gebäudebereich in den analysierten Projekten sind (entsprechend der Piktogramme in Tabelle 2):































- PV- und Windkraftanlagen, BHKWs und Brennstoffzellen als lokale Stromerzeuger und
- Wärmepumpen und Elektrolyseure als Power-to-X-Optionen.

Untersuchte Speicheroptionen sind (entsprechend der Piktogramme in Tabelle 2): Warmwasserspeicher, Erdwärmespeicher, Beton-Wärmespeicher (Hochtemperaturspeicher und Bauteilaktivierung), Batterie- und Wasserstoffspeicher. Zahlreiche Projekte befassen sich mit prognosebasierten und/oder netzsignalgeführten Betriebsoptimierungskonzepten. Die Bewertung der Gebäudebetriebsstrategien wird zudem detailliert in drei Teilaspekte aufgeschlüsselt:

- Es wird untersucht, ob und welche Eingangsgrößen der Betriebsoptimierung prognostiziert wurden, die für den Gebäudebetrieb relevant sind. Mögliche Größen umfassen (entsprechend den Piktogrammen in Tabelle 2):
 - thermische und elektrische Bedarfe
 - elektrische Leistung lokaler Stromerzeuger aus EE
 - Energiepreise
- Es wird berücksichtigt, welche Zielgrößen bei der Betriebsoptimierung verwendet werden. Betrachtete Zielgrößen sind (entsprechen den Piktogrammen in Tabelle 2):
 - Energiekosten
 - CO₂-Emissionen
 - Nutzerkomfort
 - Eigenstromnutzung
- Es werden die angewendeten Netzsignale für die Betriebsführung betrachtet.

Für diese umfangreiche Querauswertung liegen ausreichende Informationen für insgesamt elf der 16 Verbundvorhaben vor. Die Querauswertungsergebnisse werden zusammenfassend in Tabelle 2 präsentiert.

Tabelle 2: Querauswertung von netzdienlichen Gebäudekonzepten in der Forschung.

Förderkenn- zeichen	Anwendungs- bereiche	Flexibilitätsoptionen					Speicheroptionen					Gebäudebetriebsstrategie							Auswirkungen aufs Stromnetz																	
		Lokaler Strom- erzeuger		Power- to- Heat/H ₂			Energie- (/Stoff-)speicher					Prognose zu			Bei der Betriebs- optimierung berücksichtigte Aspekte					Netzsignale für die Betriebsführung																
																																				
03EGB0025	EFH ⁴ , Bestands- gebäude	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																					Börsenstrompreise	Vollständige Netzentlastung , weitere mögliche Netzdienste
03EGB0004	Gewerbe	X												X	X		X	X	X																-	Begrenzung der Strombezugsleistung
03EN1007	MFH ⁵ , Bestands- gebäude		X		X		X	X	X		X					X	X	X																	Börsenstrompreise	Netzentlastung durch einen hohen Eigenstromnutzungs- anteil
03ET1612/ 03EN6013 ⁶	WG ⁷ , Bestand und Neubau	X			X		X		X ⁸		X	X	X	X	X	X	X	X																	Aus dem Modell vom regionalen Stromnetz ergebende Leitungs- auslastungen und Netzknoten- spannung	Stromnetzmodell- basierte Analyse der Auswirkungen aufs Stromnetz
03ET1299	Bestands- gebäude mit Misch- nutzung	X	X		X		X		X		X	X																							-	Netzneutraler elektrischer Betrieb mit maximalen Eigendeckungs- und Eigennutzungsgraden
03ET1343	MFH, Bestands- gebäude	X			X		X	X	X							X	X																		Vordefinierte tageszeitabhängige Batterieregelung	Netzentlastung durch Maximierung des Eigenstromnutzungs- anteil
03ETS001	MFH/ Quartier, Bestands- gebäude	X	X		X		X		X		X	X				X	X																		Dynamische CO ₂ -Faktoren/ Energiepreise	-
03SBE0002	MFH, Bestands- gebäude	X	X								X	X				X	X																		-	Netzentlastung durch Maximierung des Eigenstromnutzungs- anteil
03SBE0005	WHH ⁹ , Bestands- gebäude	X	X ¹⁰								X					X	X																		-	Netzentlastung durch Maximierung des Eigenstromnutzungs- anteil und Reduktion der Lastspitzen
03SBE0007	MFH, Bestands- gebäude		X		X						X	X				X	X																		Börsenstrompreise	Netzentlastung durch einen hohen Eigenstromnutzungs- anteil

⁴ Einfamilienhaus

⁵ Mehrfamilienhaus

⁶ Das Vorhaben 03EN6013 ist das Folgeprojekt des Vorhabens 03ET1612. Dabei wird der Ansatz aus dem Vorhaben 03ET1612 weiterentwickelt und demonstriert. Bei der Querauswertung in dieser Arbeit werden beide Forschungsvorhaben als ein Projekt betrachtet.

⁷ Wohngebäude

⁸ Hierbei geht es um einen Beton-Hochtemperaturspeicher.

⁹ Wohnhochhaus

¹⁰ Hierbei geht es um ein Biogas-BHKW.

Die Querauswertung zeigt, dass der Hauptanwendungsbereich netzdienlicher Ansätze in der Forschung auf bestehende Mehrfamilienhäuser abzielt. In Bezug auf das GES setzen alle Projekte lokale Stromerzeuger ein, wobei sich die meisten auf PV-Anlagen beziehen. Die untersuchten Anlagentechnologien umfassen konventionelle PV-Module, PVT¹¹-Systeme (wie z.B. das Projekt 03ET1343) und BIPV¹²-Systeme (wie z.B. das Projekt 03SBE0005). Zusätzlich zu Solar- oder Windenergie werden in sechs von elf Vorhaben BHKWs als zweiter Stromerzeuger eingesetzt. PV-Anlagen und BHKWs werden dazu häufig in Kombination mit Wärmepumpen untersucht. Ein Power-to-H₂-System, bestehend aus Elektrolyseur und Wasserstoffspeicher, wird in einem Projekt erforscht.

Im Bereich der Speicheroptionen stehen verschiedene thermische Energiespeicher im Fokus der entwickelten netzdienlichen GES, darunter typische Warmwasserspeicher, Erdspeicher und die Gebäudemasse. Während alle Projekte Anlagen zur lokalen Stromerzeugung nutzen, stehen in sechs von elf Vorhaben Batteriespeicher für die kurzfristige Speicherung elektrischer Energie zur Verfügung.

Die meisten Projekte konzentrieren sich bei den Gebäudebetriebsstrategien auf eine prognosebasierte optimierte Regelung der Anlagentechnik. Dabei werden hauptsächlich Lastprädiktionen und Prognosen der Stromerzeugung aus EE basierend auf Wettervorhersagen durchgeführt. Die Modellierung von Strommärkten und die Energiepreisprognose werden in zwei Projekten untersucht. Die optimierte Regelung zielt in den meisten Projekten auf eine multikriterielle Betriebsoptimierung ab, die vor allem aus Sicht der Gebäudebesitzer und -nutzer gestaltet ist, um minimale Energiekosten bei gleichbleibendem Nutzerkomfort zu erreichen. Einige Projekte verwenden variable Strompreise, wie Börsenstrompreise, als Netzsignale für die Betriebsführung. In diesem Fall hängt der erreichbare netzdienliche Effekt davon ab, wie gut die variablen Strompreise die dynamischen Stromnetzanforderungen repräsentieren können.

Ein weiteres wichtiges Ziel in neun von elf Projekten ist die Maximierung der Eigenstromnutzung. Dies spiegelt sich auch in der Analyse der gezielten Auswirkungen auf das Stromnetz durch netzdienliche Gebäudekonzepte wider, wobei die Maximierung des Eigenstromnutzungsanteils das vorherrschende netzdienliche Ziel ist. Bei der Bewertung der Netzdienlichkeit sollten jedoch neben der Eigenstromnutzung auch andere Aspekte berücksichtigt werden, wie Lastspitzen, Flexibilität und die resultierenden Netzsituationen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen angeschlossener Stromverbraucher (vgl. Kapitel 2.1). Eine Untersuchung der durch den Gebäudebetrieb verursachten Netzsituationen wird jedoch nur in einem Projekt durchgeführt.

¹¹ Kombinierte Einheit aus PV und thermischem Solarkollektor

¹² Gebäudeintegrierte PV

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Integration von EE mit ihren fluktuierenden Eigenschaften stellt eine Herausforderung für zukünftige Energiesysteme dar. Netzdienliche Gebäudekonzepte könnten eine Lösung bieten, indem sie flexible Betriebsweisen und Energiespeicher nutzen, um den Stromaustausch mit dem Netz zu managen und netzentlastende Auswirkungen zu erzielen.

Die Analyse und Bewertung vorhandener Definitionen und Bewertungsperspektiven von Netzdienlichkeit zeigen, dass ein wesentliches Merkmal netzdienlicher Gebäude das Management des Stromaustauschs mit dem Netz basierend auf einem, das Stromnetz repräsentierenden, Signal ist. Entscheidend für die Beurteilung der Netzdienlichkeit eines Gebäudes ist jedoch die Überprüfung der resultierenden netzentlastenden Auswirkungen. Technische Anlagen wie Batteriespeicher und lokale Stromerzeuger sind dabei für die Gestaltung eines netzdienlichen Gebäudekonzepts von großer Bedeutung.

Der Dialog mit Forschungsprojekten und die Querauswertung netzdienlicher Gebäudekonzepte weisen auf zukünftigen Forschungsbedarf im Bereich Netzdienlichkeit hin. Es besteht die Notwendigkeit, Gebäudekonzepte zu entwickeln, die lokale und dynamische Stromnetzanforderungen berücksichtigen und deren Auswirkungen auf das Stromnetz kontinuierlich überprüfen. Bei der Bewertung der netzdienlichen Auswirkungen sollen verschiedene Aspekte wie Lastspitzen, Flexibilität und EE-Anteil bei der Bedarfsdeckung berücksichtigt werden, um die Integration von EE zu fördern und die Netzstabilität zu verbessern. Derzeit konzentrieren sich die meisten Projekte auf bestehende Gebäude und verwenden prognosebasierte Optimierungen, um die Eigenstromnutzung zu maximieren. Jedoch führt die reine Maximierung der Eigenstromnutzung nicht unbedingt zu netzdienlichen Auswirkungen, wie aus Diskussionen mit Experten hervorgeht. Um diese Diskrepanz zu überbrücken, sollten Ansätze zur Quantifizierung zeitlicher Stromnetzanforderungen entwickelt werden. Dafür sind Anreize erforderlich, um sicherzustellen, dass bei dem resultierenden Gebäudebetrieb die Stromnetzanforderungen berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] Bundesminister der Justiz, *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023): § 1 Ziel des Gesetzes*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/_1.html (Zugriff am: 13. März 2024).
- [2] D. Kalz *et al.*, "Netzdienliche Gebäude und Quartiere: Gebäude entlasten Stromnetze", 2018.
- [3] Umweltbundesamt, *Indikator: Energieverbrauch für Gebäude*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-energieverbrauch-fuer-gebäude#wie-wird-der-indikator-berechnet> (Zugriff am: 25. Oktober 2023).
- [4] Deutsche Energie-Agentur GmbH, "Gutachten im Rahmen der dena-LEITSTUDIE AUFBRUCH KLIMANEUTRALITÄT: Klimaneutralität 2045 – Transformation des Gebäudesektors" Gebäudespezifische Modellierung und Begleitung des Studienprozesses, Okt. 2021.
- [5] K. Klein und D. Kalz, "Netzreaktive Gebäude - Ganzheitliche Bewertung von Bauphysik und Gebäudeenergiesystemen einschliesslich ihrer Rolle in der Energiewirtschaft: Energie, Exergie, Leistungsbezug und -abgabe. Abschlussbericht 2017", 2017.
- [6] EURELECTRIC, "Flexibility and Aggregation Requirements for their interaction in the market: A EURELECTRIC paper", Jan. 2014.
- [7] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität - Arbeitsgruppe 5 "Digitalisierung für den Mobilitätssektor", "Netzintegration von Elektromobilität – Basis für eine erfolgreiche Sektorkopplung. Eine Definition.", Juli 2020.
- [8] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., "Versorgungssicherheit Strom: Grundlagen und Methodik zur Bewertung der Versorgungssicherheit Strom und politische Handlungsempfehlungen", 30. Sep. 2021.
- [9] B. Verbruggen und J. Driesen, "Grid Impact Indicators for Active Building Simulations", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Jg. 6, Nr. 1, S. 43–50, 2015, doi: 10.1109/TSTE.2014.2357475.
- [10] Roel De Coninck, Ruben Baetens, Bart Verbruggen, Johan Driesen und Lieve Helsen, "Modelling and simulation of a grid connected photovoltaic heat pump system with thermal energy storage using Modelica" in *8th International Conference on System Simulation in Buildings (SSB2010)*, 2010, P177.
- [11] L. Einheilig, M. Herrmann, J. Kappl, O. Stumpp und K. Zech, "Smart Grid 2019 - Netzdienliche Leistungen über Smart Metering als neues und standardisiertes Instrument im Verteilernetz, 2019.", 2019.
- [12] Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, Hg., "Dokumentation des 11. Projektleitungstreffens: Betrieb als Chance zur dauerhaften Effizienzsteigerung", Sep. 2022.