

# Modellierung des Wärmesektors und dessen Flexibilität für Simulationen gekoppelter Energiesysteme

Natalia Luna-Jaspe<sup>1\*</sup>, Kevin-Martin Aigner<sup>2</sup>, Sebastian Kolb<sup>1</sup>, Jürgen Karl<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Fürther Str. 244f, 90429 Nürnberg, +49 (0)911 5302 99383, <https://www.evt.tf.fau.de>, \*natalia.luna-jaspe@fau.de

<sup>2</sup>Department Data Science, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstraße 11, 91058 Erlangen

**Kurzfassung:** Die Defossilisierung des Wärmesektors ist eine der größten Herausforderungen der europäischen Energiewende. Ohne drastische Transformation werden stark öl- und gasabhängige Länder wie Deutschland ihre Klimaziele nicht erreichen. Mögliche Entwicklungsszenarien der Literatur sehen die Elektrifizierung des Wärmesektors durch Wärmepumpen als eine der am besten geeigneten Lösungen. Doch nicht nur der Wärmesektor wird in Zukunft hohe Stromnachfragen generieren, auch andere Sektoren wie der Verkehrssektor werden stark elektrifiziert werden. In diesem Kontext spielt die Möglichkeit zur Flexibilisierung dieser Stromnachfragen eine wichtige Rolle, insbesondere mit Blick auf den Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien. Diese Arbeit analysiert das Flexibilitätspotential des Wohngebäudesektors durch die Nutzung der thermischen Gebäudemasse. Außerdem wird untersucht, wie die zur Verfügung stehende Flexibilität optimal eingesetzt werden kann. Wohngebäude können durch die Nutzung der thermischen Gebäudemasse einen Beitrag zur Flexibilisierung des Energiesystems leisten. Das Flexibilitätspotential in der Zukunft ist von der Sanierungstiefe abhängig. Die Effekte von Flexibilitätsmaßnahmen auf die Kosten und die Netzbelastung sind zusätzlich von den gewählten Optimierungsbedingungen abhängig.

**Keywords:** Simulationsmodell, Wärmesektor, thermische Gebäudemasse, Flexibilisierung, Optimierung

## 1 Einleitung

Der Wärmesektor ist einer der größten Energieverbraucher Deutschlands und noch stark von fossilen Energieträgern abhängig [1]. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit sowie großes Potential zur Emissionsreduktion durch Elektrifizierung. Diese Transformation in Richtung starke Elektrifizierung sowie der Ausbau der erneuerbaren Energien stellen eine große Herausforderung für das Stromnetz dar, insbesondere auf der Mittel- und Niederspannungsebene. Aus diesem Grund stellt sich aus der Systemperspektive die Frage, wie das Energiesystem, welches in Zukunft deutlich vernetzter sein wird, flexibler betrieben werden kann, um sowohl technisch, wirtschaftlich und ökologisch am effizientesten zu sein. Potential zur Flexibilisierung liegt im Wärmesektor beispielsweise im Einsatz von Wärmespeichern oder der energetischen Sanierung von Gebäuden durch die Nutzung der thermischen Gebäudemasse als Energiespeicher. Sie ermöglichen die Reaktion auf Netzengpässe, Erzeugungsfluktuationen oder preisliche Schwankungen. Simulationsmodelle stellen ein Werkzeug dar, um diese Potentiale zu analysieren und zu bewerten, unter welchen Bedingungen diese genutzt werden können,

durch welche Parameter diese beeinflusst werden und wie ein möglicher Betrieb des Einsatzes solcher Flexibilitäten optimal realisiert werden könnte.

Diese Fragen sollen im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Projekt ESM-Regio [2] für eine konkrete Region beantwortet werden. In diesem Projekt wird das Energiesystem der Stadt Bayreuth, bestehend aus den Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Gas modelliert. Simulationen für unterschiedliche Szenarien sollen für die Analyse des optimalen Betriebs durchgeführt werden.

## **2 Flexibilisierung und Optimierung von Wärmenachfragen**

Die Flexibilisierung des Wärmesektors wird als ein Teil von Demand Side Management (DSM) bzw. Demand Side Response (DSR) Strategien verstanden. DSM und DSR beschreiben die Änderung von Energienachfragen, insbesondere Stromnachfragen, als Reaktion auf ein Signal oder als Eingriff des Energieversorgers. Die Ziele von DSM und DSR können sich je nach betrachtetem Szenario unterscheiden. Beispielsweise kann das Ziel bei der Betrachtung von DSR einzelner Wohngebäude die Minimierung der Wärmeversorgungskosten sein, sodass der Verbrauch möglichst zu Zeiten mit niedrigen Preisen stattfinden soll [3]–[11]. Aus Sicht eines Netzbetreibers können neben wirtschaftlichen Aspekten auch die Einhaltung netztechnischer Bedingungen das Ziel eines DSM-Ereignisses sein [6], [12]–[15].

DSM kann durch verschiedene Mechanismen realisiert werden. Lastabwurf beschreibt die Maßnahme, bei der eine Nachfrage, typischerweise in Spitzenzeiten, nicht versorgt wird [16]. Lastausgleich versucht das Gegenteil von Lastabwurf zu realisieren, sodass zu einem bestimmten Zeitpunkt eine durch zusätzliche Lasten erhöhte Nachfrage versorgt wird, beispielsweise zum Aufladen von Speichern, um die Nutzung der erneuerbaren Energien in Zeiten niedriger Nachfragen, z.B. in der Nacht, zu maximieren [16], [17]. Das Ziel von Lastverschiebung ist es, Verbräuche von einem Zeitpunkt zu einem anderen Zeitpunkt zu verschieben [16], [17], [18]. Dabei wird das Nachfrageprofil geändert. Soll eine Lastverschiebung erreicht werden, ohne dass der Zeitpunkt des Verbrauchs beeinflusst werden kann, ist immer eine Speichermöglichkeit notwendig. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Modellierung, Simulation und Optimierung von Lastverschiebung durch den Einsatz der thermischen Gebäudemasse unter Berücksichtigung von Strompreisen.

### **2.1 Modellierung der Flexibilität von Wärmenachfragen durch die thermische Gebäudemasse**

Die Flexibilisierung durch den Einsatz der thermischen Gebäudemasse wird einerseits von den Gebäudeparametern und andererseits von den Behaglichkeitsparametern beeinflusst. Die Gebäudehülle und die Baumaterialien eines Hauses beeinflussen die Wärmeverluste nach außen aufgrund des Temperaturgradienten zwischen dem Inneren des Hauses und der Umgebung. Die Wärmeverluste werden durch den Wärmedurchgangskoeffizienten beschrieben. Dieser ist typischerweise niedrig für neuere und energieeffiziente Häuser, während alte, wenig oder nicht wärmeisolierte Häuser einen hohen Wärmedurchgangskoeffizienten aufweisen. Der zweite Parameter, der die Wärmeflexibilität eines Hauses beschreibt, ist die Wärmekapazität des Hauses. Diese ist ebenfalls material- und bauweiseabhängig und beschreibt, wie viel

Wärme das Gebäude speichern kann [19]. Gebäude mit leichter Bauweise können durch Wärmekapazitäten kleiner als  $50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$  beschrieben werden, während Gebäude schwerer Bauart Werte größer als  $130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$  aufweisen [20]. Ein weiterer Parameter, der das Potential zur Flexibilisierung von Wärmenachfragen beeinflusst bzw. einschränkt, sind Behaglichkeitsparameter, insbesondere die gewünschte Raumtemperatur. Durch Flexibilisierungsergebnisse sollen bestimmte Temperaturgrenzen nicht über- bzw. unterschritten werden [7], [15], [21].

## 2.2 Optimierung von Wärmeverbräuchen

Die Bestimmung einer kostenoptimalen Lastverschiebung von Wärmeverbräuchen im Zeitverlauf ist kein triviales Entscheidungsproblem, da eine sorgfältige Abwägung verschiedener Faktoren erforderlich ist. Die Komplexität dieses Problems resultiert aus der Vielzahl von Variablen, die berücksichtigt werden müssen, zusätzlich zu den Schwankungen der Energiekosten, technische Einschränkungen und Behaglichkeitsanforderungen.

Die mathematische Optimierung bietet einen geeigneten Ansatz für die systematische Herangehensweise an diese Problemstellung. Durch die Formulierung eines Optimierungsmodells und dessen Lösung durch geeignete Software können Zeitpunkte der Flexibilisierungsergebnisse für den Betrieb von Wärmeerzeugung so errechnet werden, dass die Gesamtenergieerzeugungskosten minimiert werden. In der Literatur sind bereits einige Modellierungsansätze hierfür zu finden; insbesondere zur optimalen Steuerung von Wärmepumpen [22]–[24]. Hierbei werden hauptsächlich die technischen Restriktionen der Energiesysteme in die mathematischen Optimierungsprobleme miteinbezogen. Im Gegensatz dazu liegt der Fokus dieser Arbeit zusätzlich auch auf Behaglichkeitsparameter.

## 2.3 Bewertung von Flexibilitäten

In der Literatur werden verschiedene Bewertungskriterien für die Flexibilisierung im Kontext von Wärmenachfragen vorgeschlagen. Eine Übersicht darüber gibt [25]. Diese Kriterien können in leistungsbezogene (maximale Leistungsflexibilisierung), energiebezogene (maximal verschobene Energie in einem bestimmten Zeitintervall) und sonstige (Kostenreduktion, Emissionsreduktion, Anteil erneuerbarer Energien) unterteilt werden. Die für die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen relevanten Kriterien werden in Tabelle 1 näher erläutert.

*Tabelle 1: Übersicht für diese Arbeit ausgewählte Bewertungskriterien*

<b>Bewertungskriterium</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Quellen</b>
Maximale Leistungsflexibilität	Die maximale Laststeigerung oder -senkung, die das System zu einem bestimmten Zeitpunkt zulässt	[25]–[27]
mittlere Leistungsflexibilität	Die durchschnittliche Leistungsänderung, die das System innerhalb seiner Grenzen ermöglicht	[25], [27]

Verschiebungspotential	Die Verschiebung des Verbrauchs von einem Zeitintervall zu einem anderen	[5], [8], [11] [19], [28]–[30]
Kosteneinsparungen	Die Auswirkung der Flexibilität auf die Kosten	[7], [8], [10], [13], [29]–[31]

### 3 Modellierungsansatz

Für die Simulation des Wärmesektors der Stadt Bayreuth im Rahmen des Forschungsprojekts ESM-Regio wurde am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ein agentenbasiertes Simulationsmodell aufgebaut. Für die Analysen zur Optimierung der Flexibilität des Wärmesektors wurde in Zusammenarbeit mit dem Department Data Science der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ein lineares Optimierungsmodell entwickelt. Für diese Arbeit wurden zwei Szenarien betrachtet. Das Referenzszenario des Status-Quo des Jahres 2019 sowie der Szenario NEP23 für das Jahr 2045, orientiert an den Angaben des Netzentwicklungsplanes der deutschen Übertragungsnetzbetreiber [32].

#### 3.1 Wärmeverbraucher

Im Simulationsmodell werden verschiedene Wärmeverbraucher definiert, um eine realitätsnahe Abbildung des Gebäudebestands in Bayreuth darzustellen. Dieser wird durch die Kombination unterschiedlicher Datensätze und Annahmen in 24 Kategorien unterteilt. Die Klassifizierung basiert einerseits auf den erweiterten Gebäudezensusdaten und andererseits auf Annahmen, die sich am Gebäudereport der deutschen Energie-Agentur (dena) [33] sowie den Kategorien des TABULA Web Tools [34] orientieren. Die Kategorien wurden durch die Kombination von Gebäudetyp (Ein-/Zweifamilienhaus bzw. Mehrfamilienhaus), Baujahrperiode sowie Größe des Hauses definiert. Für die Kategorisierung wurden sechs Baujahrperioden festgelegt. Diese Annahme beschreibt die verschiedenen Baustandards, die durch verschiedene energetische Effizienzen bzw. mittlere Wärmenachfragen gekennzeichnet sind. Insgesamt sind vier Größenkategorien definiert, die die Anzahl der Wohnungen eines Gebäudes beschreiben. Da das Potential zur Flexibilisierung des Wärmesektors in einer zeitlich hochaufgelösten Simulation analysiert werden soll, werden mithilfe von Referenzprofilen der Norm DIN 4655 [35] Wärme- und Stromnachfragen in einer Auflösung von 15 Minuten erstellt.

#### 3.2 Wärmepumpen

Wärmepumpen spielen im Referenzjahr eine untergeordnete Rolle. Von den rund 21.000 Wohngebäuden der Region werden nur 1.000 mit einer Wärmepumpe versorgt. Im Vergleich dazu sind über 14.000 Gebäude mit Gas versorgt. Die restlichen rund 6.000 haben eine von Öl dominierte nicht netzgebundene Wärmeversorgung. Dennoch wird ihnen in den meisten Szenarien [36]–[39] eine bedeutende Rolle zugeschrieben. Für die Analyse des Flexibilitäts-

potentials im Wärmesektor durch den Gebäudebestand sind daher Wärmepumpen von besonderem Interesse. Diese werden unter Verwendung von Umgebungsluft als Wärmequelle modelliert. Die Stromnachfrage der Wärmepumpen  $P_{WP}$  wird gemäß Gleichung 1 berechnet.

$$P_{WP}(t) = \frac{Q(t)}{COP(t)} \quad (1)$$

$Q(t)$  stellt die Wärmenachfrage dar. Die Leistungszahl (COP, Coefficient of Performance) wird in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur bestimmt. Die Modellierung der Wärmepumpen berücksichtigt somit, dass der COP im Winter, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke größer ist, niedriger ist als im Sommer.

### 3.3 Flexibilisierungsmöglichkeiten des Wohngebäudesektors durch Nutzung der thermischen Gebäudemasse

Die Modellierung der thermischen Gebäudemasse basiert auf der vereinfachten Energiebilanz eines Hauses. Abbildung 1 stellt die betrachteten Energieflüsse schematisch dar.



Abbildung 1: schematische Darstellung der Energiebilanz eines Gebäudes. Icons aus [www.flaticon.com](http://www.flaticon.com)

Dafür wird die Bilanz gemäß Gleichung 2 für diskrete Zeitschritte  $t = 1, \dots, t_{max}$  aufgestellt:

$$Q_G(t) = Q_{versorgt}(t) - Q_{verlust}(t) \quad (2)$$

$$(T_i(t) - T_i(t-1)) \cdot C_b \cdot A = Q_{versorgt}(t) - u \cdot A(T_i(t-1) - T_u(t)) \cdot \Delta t$$

Gleichung 2 stellt dar, dass die Änderung der Temperatur des Hauses  $T_i(t)$  (Gebäudemasse) gleich der vom Heizungssystem hinzugefügten Wärme  $Q_{versorgt}(t)$  abzüglich der Transmissionswärmeverluste  $Q_{verlust}(t)$  aufgrund des Temperaturgefälles zwischen dem Inneren des Hauses und der Umgebungstemperatur  $T_u(t)$  ist.  $A$  steht für die Fläche des Hauses,  $C_b$  ist die flächenspezifische Wärmekapazität, und  $u$  repräsentiert den Wärmedurchgangskoeffizienten.  $C_b$  und  $u$  sind gebäudespezifische Parameter und werden für die verschiedenen Verbraucher in Abhängigkeit von der Bauweise bzw. den typischen Baumaterialien und dem Baujahr definiert.

Die mögliche Flexibilisierung wird als die Verschiebung der Wärmenachfrage im Zeitverlauf im Vergleich zum Referenzprofil definiert, sodass die Temperatur des Hauses eine untere Grenze von 17°C nicht unterschreitet und eine obere Grenze von 23°C nicht überschreitet.

### 3.4 Aggregation von Flexibilitätspotentiale

Im Kontext des ESM-Regio Projekts werden Stromnachfragen und verfügbare Flexibilitäten aggregiert betrachtet, um Rechenaufwand für die Optimierung zu begrenzen. Das Modell besteht aus einer detaillierten Simulationsebene und einer abstrahierten, aggregierten Ebene. Auf der Simulationsebene werden die unterschiedlichen Verbraucher und Wärmeerzeugungstechnologien detailliert modelliert und kombiniert. Auf der abstrahierten Ebene findet die Optimierung des Betriebs des Energiesystems statt. Dazu werden die Verbraucher basierend auf ihrer räumlichen Distanz den nächstgelegenen Transformatoren des realen Stromnetzes (Knoten) zugeordnet. Zur Bestimmung der Flexibilitäten der Knoten wurden die Gebäudeparameter anteilig gemittelt.

### 3.5 Modellierung zur optimalen Lastverschiebungsberechnung

Die Flexibilisierungsmöglichkeiten im Wohngebäudesektor durch Nutzung der thermischen Gebäudemasse erlauben Preisschwankungen in der Energiebereitstellung auszugleichen. Hierbei bezeichnet  $c(t)$  den Preis dieser Energie für die Zeitschritte  $t = 1, \dots, t_{ende}$ . Ziel der Optimierungsaufgabe ist somit die Berechnung einer Leistungszeitreihe  $P(t)$ , welche die resultierenden Kosten gemäß Kostenfunktion 3

$$\sum_{t=1}^{t_{ende}} c(t)P_{WP}(t)\Delta t \quad (3)$$

minimiert. Für den resultierenden Verlauf der Temperatur  $T(t)$  für eine gegebene Leistungszeitreihe ergibt sich aus der Kombination von Gleichung 1 und 2 folgende Nebenbedingung

$$T(t) = T(t-1) + \frac{COP(t)}{C_b A} P_{WP}(t)\Delta t - \frac{u}{C_b} (T(t-1) - T_u(t))\Delta t \quad (4)$$

Die technischen Einschränkungen zum Zeitpunkt  $t$  an die Leistungsbereitstellung kann durch die Ungleichungen 5

$$P_{WP_{min}}(t) \leq P_{WP}(t) \leq P_{WP_{max}}(t) \quad (5)$$

ausgedrückt werden, welche gegebene obere und untere Schranken an die Leistung stellen. Aus Behaglichkeitsgründen werden noch die folgenden Voraussetzungen an einen zulässigen resultierenden Temperaturverlauf gestellt:

$$17^\circ\text{C} \leq T(t) \leq 23^\circ\text{C}, \quad (6)$$

$$|T(t) - T(t-1)| \leq \Delta T_{max} \quad (7)$$

Die Ungleichungen 6 und 7 fordern von einer Lösung, dass die Temperatur sich stets zwischen 17°C und 23 °C bewegt und auch gleichzeitig der Unterschied in der Gebäudetemperatur zwischen aufeinanderfolgenden Zeitschritten (Ungleichung 7) begrenzt wird.

Damit auch über eine Heizperiode (z.B. ein Tag) summiert der gesamte Wärmebedarf gedeckt wird, werden folgende Gleichungen für jede einzelne Heizperiode an eine optimale Lösung der Lastverschiebung gestellt:

$$\sum_{t=t_{start}}^{t_{start}+\Delta t_{periode}} (P_{WP}(t)\Delta t - Q_{Bedarf}(t)) = 0 \quad (8)$$

Insgesamt bilden die vorgestellten Gleichungen und Ungleichungen 4-8 zusammen mit der Kostenfunktion 3 ein lineares Optimierungsproblem in den Entscheidungsvariablen  $P(t), T(t)$  für alle Zeitschritte  $t = 1, \dots, t_{ende}$ . Diese Klasse von mathematischen Optimierungsaufgaben kann mithilfe geeigneter Lösungsalgorithmen und Software (z.B. Gurobi [40]) effizient gelöst werden.

## 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Flexibilitätspotentials durch den Einsatz der thermischen Gebäudemasse werden für einzelne Gebäude sowie für aggregierte Gebäudestrukturen untersucht. Die Ergebnisse der Optimierung der Wärmeversorgung unter Einsatz des Flexibilitätspotentials mit verschiedenen Nebenbedingungen werden analysiert.

### 4.1 Exemplarische Ergebnisse der Flexibilitäten des Gebäudebestands

#### 4.1.1 Flexibilitätspotential der thermischen Gebäudemasse ausgewählter Verbraucher

Es wird untersucht, wie sich die unterschiedlichen Verbraucher verhalten würden, wenn ausschließlich die thermische Gebäudemasse für die Flexibilisierung der Nachfrage zum Einsatz kommen würde. Es wird analysiert, wie sich die verfügbare Flexibilitätszeit bei den verschiedenen Gebäudetypen unterscheidet, um deren Flexibilität zu charakterisieren. Diese ist als die Zeit definiert, die es dauert bis ein Gebäude auf die untere Temperaturgrenze von 17 °C ausgekühlt ist. Dabei ist anzumerken, dass nur die Wärmenachfrage für Raumwärme berücksichtigt wird, da die Nachfrage nach Warmwasser nicht von der thermischen Gebäudemasse beeinflusst wird. Da das Verhalten der verschiedenen Gebäude nicht nur vom Gebäudetyp und Baujahr beeinflusst wird, sondern auch von der Außentemperatur, wird die Analyse mehrmals durchgeführt, und zwar für unterschiedliche Temperaturen. Dafür wird eine Referenzwoche des Jahres 2019 gewählt, und die Messzeitreihe dieser Woche wird um 5 K bzw. 10 K verschoben, um den Einfluss niedrigerer und höherer Temperaturen zu analysieren. Ebenfalls wird analysiert, welchen Einfluss die energetische Sanierung von Gebäuden auf deren Flexibilität haben kann.

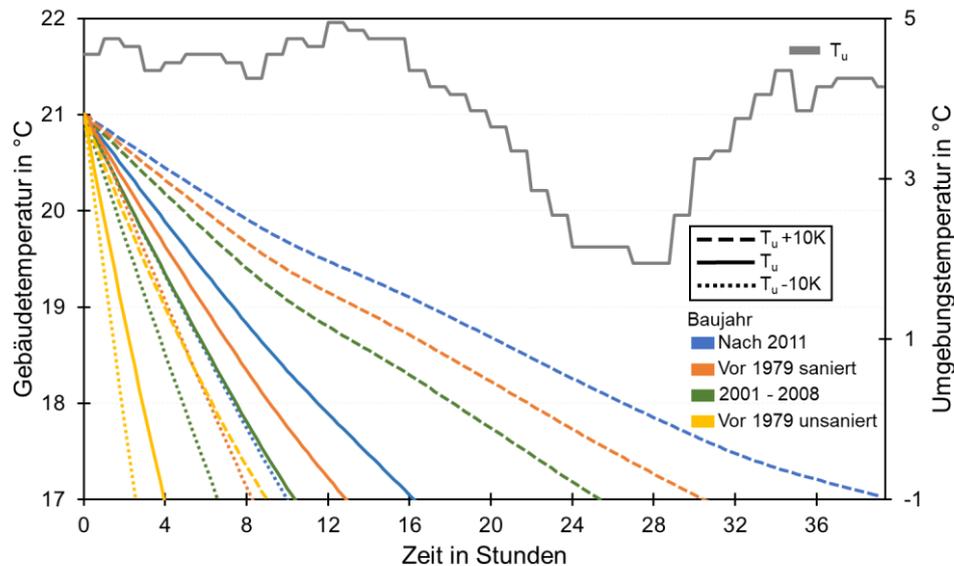


Abbildung 2: Temperaturverlauf des Auskühlens verschiedener Gebäudetypen

Abbildung 2 vergleicht exemplarisch das Flexibilitätspotential vier verschiedener Gebäudetypen (Baujahre 2011, zwischen 2001 und 2008 und vor 1979 saniert und unsaniert). Dargestellt sind die Verläufe des Auskühlens der Gebäude bei verschiedenen Umgebungstemperaturen. Es ist zu erkennen, dass die Zeit, während der die Flexibilität genutzt werden kann, antiproportional zur Außentemperatur ist. Beim modernsten Gebäude wird unter den getroffenen Annahmen die untere Temperaturgrenze von 17 °C nach 11 bis 39 Stunden erreicht, wenn die Heizung komplett ausgeschaltet bleibt. Damit könnten 38 % bzw. 160 % der für den Tag benötigten Energie zu einem späteren Zeitpunkt verschoben werden. Das sanierte Gebäude erreicht die Grenztemperatur nach 13,25 Stunden, während das unsanierte Gebäude bereits nach 4 Stunden die untere Temperaturgrenze erreicht. Durch die thermische Gebäudesanierung kann die Zeit für die Nutzung von Flexibilität um 230 % erhöht werden. Das entspricht einer Zunahme der Energienachfrage, die verschoben werden kann, von 11 % auf 50 %, bezogen auf die für den Tag benötigte Energie.

Im Hinblick auf die Nutzung der thermischen Gebäudemasse für die Entlastung des Energiesystems stellt die energetische Sanierung von Gebäuden ein großes Potential dar. Neuere und sanierte Gebäude können länger zur Flexibilisierung beitragen, was zum einen wirtschaftliche Vorteile bringen kann, durch die Möglichkeit der Verschiebung des Verbrauchs in Zeiten niedriger Preise, aber auch für längere Zeit eine Entlastung des Netzes bedeuten kann. Außerdem kann dadurch ebenfalls die Nutzung von erneuerbaren Energien maximiert werden.

Im nächsten Schritt wird das Flexibilitätspotential der Aggregationsknoten untersucht. Von Interesse ist der Einfluss der Gebäudestruktur der Knoten (Anzahl und Typ) sowie die Veränderung des Flexibilitätspotentials in der Zukunft durch den Zubau an Wärmepumpen. Verglichen wird das Referenzjahr, bei dem in der betrachteten Region rund 1.000 Wärmepumpen installiert waren, mit dem definierten Szenario NEP23, das für das Jahr 2045 in der Region rund 14.000 Wärmepumpen vorsieht. Grundsätzlich unterscheiden sich die Szenarien dadurch, dass im Referenzzustand die Mehrheit der Aggregationsknoten nicht mehr als 10 Gebäude bzw. Wärmepumpen aggregiert. Im Gegensatz dazu ist die Verteilung der Anzahl an Wärmepumpen in den Knoten des Zukunftsszenarios homogener verteilt, sodass insgesamt die Mehrheit der Knoten deutlich mehr als 10 Wärmepumpen aggregiert.

Die Analyse des Flexibilitätspotentials ausgewählter Knoten zeigt, dass diese in Abhängigkeit der Gebäudestruktur unterschiedliche Flexibilitätspotentiale aufweisen. Verglichen werden vier Knoten. Deren Auswahl wird anhand folgender Kriterien durchgeführt: Maximale Anzahl an Gebäuden bzw. Wärmepumpen, maximale Anzahl an effizienten Gebäuden sowie maximale Anzahl an ineffizienten Gebäuden. Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Temperatur unter der Annahme, dass keine Energie zugeführt wird. Knoten 1 stellt sowohl den Knoten mit den meisten Gebäuden als auch mit den meisten effizienten Gebäuden dar. Knoten 2 ist der Knoten mit den meisten ineffizienten Gebäuden im Referenzjahr, Knoten 3 und Knoten 4 zeigen unterschiedliche Gebäudestrukturen bei gleicher Anzahl an Wärmepumpen (ebenfalls wie Knoten 1) im Zukunftsszenario auf.

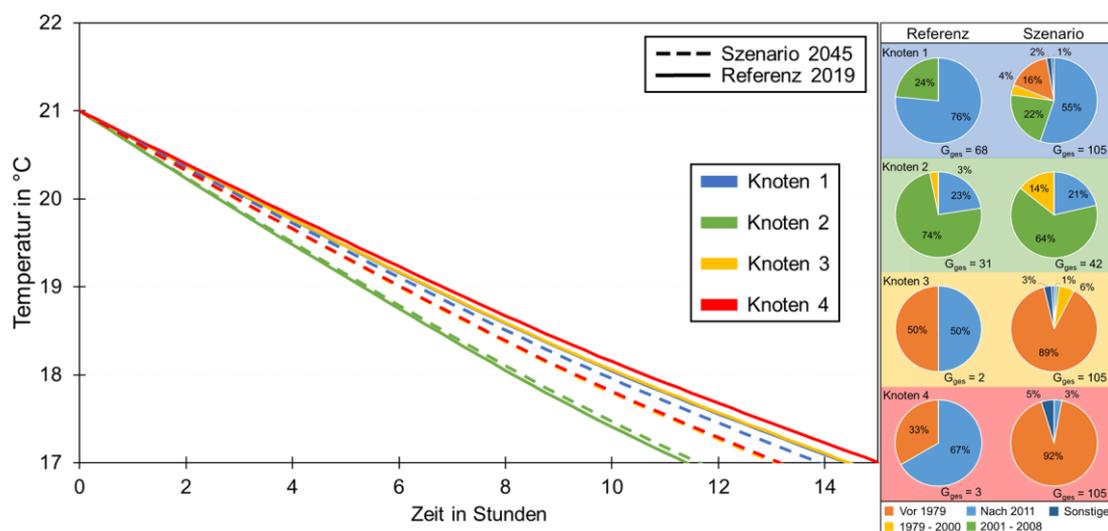


Abbildung 3: Temperaturverlauf des Auskühlens der Knoten (links) und Zusammensetzung der Gebäudestruktur der Knoten nach Baujahren (rechts)

Es wird deutlich, dass für die maximal verfügbare Flexibilitätszeit nicht die Anzahl an Gebäuden entscheidend ist, sondern die Gebäudestruktur. Die Auskühlung des Gebäudebestands erfolgt im Szenario des Jahres 2045 langsamer als im Referenzfall für das Jahr 2019, da sich der Anteil sehr alter Gebäude in den einzelnen Knoten bis 2045 stark verringert. Dieser Effekt ist bei der zu verschiebenden Leistung bzw. Energie nicht zu beobachten, da die Energie, die verschoben werden kann, proportional zu der Anzahl an Gebäuden ist. Im Vergleich zwischen Referenzjahr und Szenario ergibt sich beispielsweise bei Knoten 1 fast kein Unterschied, da die Gebäudestruktur im Szenario zwar prozentuell weniger neuere Gebäude enthält (55 % vgl. zu 76 %), gleichzeitig aber weniger ineffiziente (unsanierte) Gebäude durch die Zunahme an sanierten Häusern, die vor 1979 gebaut wurden und in Zukunft eine Wärmepumpe haben werden. Durch die Zunahme der Wärmepumpeninstallationen ist zu erwarten, dass die maximal verfügbare Flexibilitätszeit in der aggregierten Betrachtung sich reduziert, aufgrund der vielen sanierten Gebäude, die in Zukunft eine Wärmepumpe haben werden, aber dennoch weniger energieeffizient sind als Neubauten. Dies ist der Fall in den Knoten 3 und 4. Dennoch ist die Reduktion des verfügbaren Zeitfensters für die Optimierung der Wärmenachfrage in den betrachteten Knoten geringer als eine Stunde.

### 4.1.2 Ergebnisse Wärmeoptimierer

Die Optimierung der Wärmeversorgung für eine Winterwoche in beiden Szenarien wird unter verschiedenen Nebenbedingungen analysiert. Die Flexibilisierung der Wärmenachfragen wird nach den in Kapitel 2.3 genannten Kriterien analysiert. Die Optimierung wird mit der in Kapitel 3.5 definierten maximalen Temperaturdifferenz aufeinanderfolgender Zeitschritte  $\Delta T_{max}$  von 1 K in sechs bzw. drei Stunden als Nebenbedingung durchgeführt. Als weitere Nebenbedingung gilt, dass die versorgte Energie innerhalb eines Tages genau die benötigte Energie gemäß dem Referenzprofil entsprechen muss. Diese Nebenbedingung bedeutet ebenfalls, dass die versorgte Energie der Woche gleich der des Profils sein muss.

Abbildung 5 zeigt den Vergleich der optimierten Temperaturverläufe für die Knoten 1 und 2. Die Temperatur verläuft unabhängig vom Knoten und der vorhandenen Gebäudestruktur mit dem gleichen Trend. Wenn ausschließlich die Stromkosten entscheidend sind, ergibt sich ein optimaler Gebäudetemperaturverlauf für die Gesamtregion. Ebenfalls zu erkennen ist, dass dieser Trend unabhängig vom erlaubten  $\Delta T_{max}$  gleich ist, wobei die Spitzen der Zeitreihe mit größerem  $\Delta T_{max}$  ausgeprägter sind.

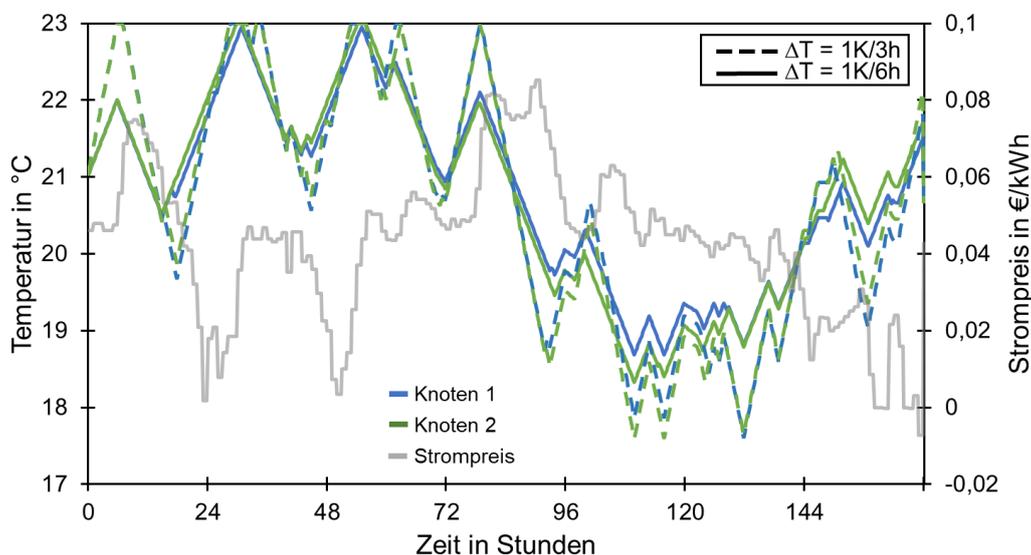


Abbildung 4: Temperaturverlauf gemäß der optimierten Wärmenachfrage

Die Flexibilitätsparameter werden exemplarisch für einen  $\Delta T_{max}$  von 1 K in 6 Stunden und für beide Szenarien verglichen. Der Vergleich der Szenarien ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Exemplarische Ergebnisse der Optimierung des Wärmeverbrauchs für die Szenarien Referenz und NEP23

Bewertungskriterium	Referenzszenario Knoten 1 bis 4				Zukunftsszenario NEP 23 Knoten 1 bis 4			
	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Maximale Leistungsflexibilität in kW	94,5	47,5	2,6	4,2	150,6	63,7	154,4	151,8
Mittlere Leistungsflexibilität in kW	44,6	19,8	1,3	2,0	70,8	26,7	70,4	70,2

Verschobene Energie in MWh (Woche)	7,5	3,3	0,2	0,3	11,9	4,5	11,8	11,8
Anteil verschobene Energie in %	44,8	32,3	48,2	50,1	43,9	33,0	44,1	45,1
Kostensparnisse in %	9,4	6,8	10,1	10,5	9,0	6,9	9,0	9,2

Für alle betrachteten Knoten ergibt sich im Zukunftsszenario eine deutlich höhere maximale Leistungsflexibilität. Die größten Differenzen ergeben sich bei den Knoten 3 und 4, da diese im Referenzszenario nur 2 bzw. 3 Gebäude enthalten. Die höchste maximale Leistungsflexibilität ergibt sich für Knoten 3 mit einer Leistung von 154,4 kW. Sowohl die maximale als auch die mittlere Leistungsflexibilität im Zukunftsszenario liegen für die Knoten 1, 3 und 4 in einer Größenordnung von 150 kW bzw. 70 kW. Daran ist zu erkennen, dass die Gebäudestruktur der Knoten einen geringen Einfluss auf die maximale und mittlere Leistungsflexibilität hat. Vielmehr sind diese von der Anzahl der Gebäude abhängig. Die verschobene Energie wurde für den Zeitraum von einer Woche betrachtet. In allen Knoten ist im Zukunftsszenario die durch die Optimierung zu einem anderen Zeitpunkt verschobene Energie gestiegen, was hauptsächlich auf die Anzahl der Gebäude mit Wärmepumpeninstallation zurückzuführen ist. Der Anteil dieser verschobenen Energie an der für die Woche gemäß dem Referenzprofil benötigten Energie steigt nur für Knoten 2. Obwohl sich nur ein Unterschied zum Referenzszenario von 0,7 % ergibt, zeigt dies, dass dieser Knoten flexibler wird, was ebenfalls in Abbildung 4 gezeigt wird. Die Reduktion bei den Knoten 1, 3 und 4 ergibt sich aus der Zunahme an sanierten aber verglichen mit Neubau weniger effizienten Gebäuden. Trotzdem liegt der Anteil an verschobener Energie mit 43 % bis 45 % höher als bei Knoten 2, weil der Anteil an unsanierten Gebäuden in Knoten 2 größer ist (Abbildung 4, rechts). Die Kostensparnisse verhalten sich analog zum Anteil an verschobener Energie. Im Vergleich zum Referenzszenario kann im Zukunftsszenario nur in Knoten 2 eine höhere Kostenreduktion gegenüber dem jeweiligen Standardprofil (Versorgung ohne Nutzung von Flexibilität) erzielt werden. Dieser Effekt ist auf die Gebäudestruktur der Knoten zurückzuführen, da wie in Abbildung 4 gezeigt, nur Knoten 2 auf die Zeit bezogen flexibler wird. Trotzdem werden in Knoten 1, 3 und 4 geringere Kosten erzielt verglichen mit dem Standardprofil. Mit dem gewählten  $\Delta T_{max}$  von maximal 1 K in 6 Stunden können die Kosten im Zukunftsszenario für den betrachteten Knoten zwischen 6,9 % und 9,2 % reduziert werden. Eine Lockerung der Nebenbedingung der maximalen Temperaturdifferenz aufeinanderfolgender Zeitschritte kann beispielsweise bei maximal 2,4 K in 6 Stunden zu Kostensparnisse gegenüber dem Standardprofil von 29 % führen.

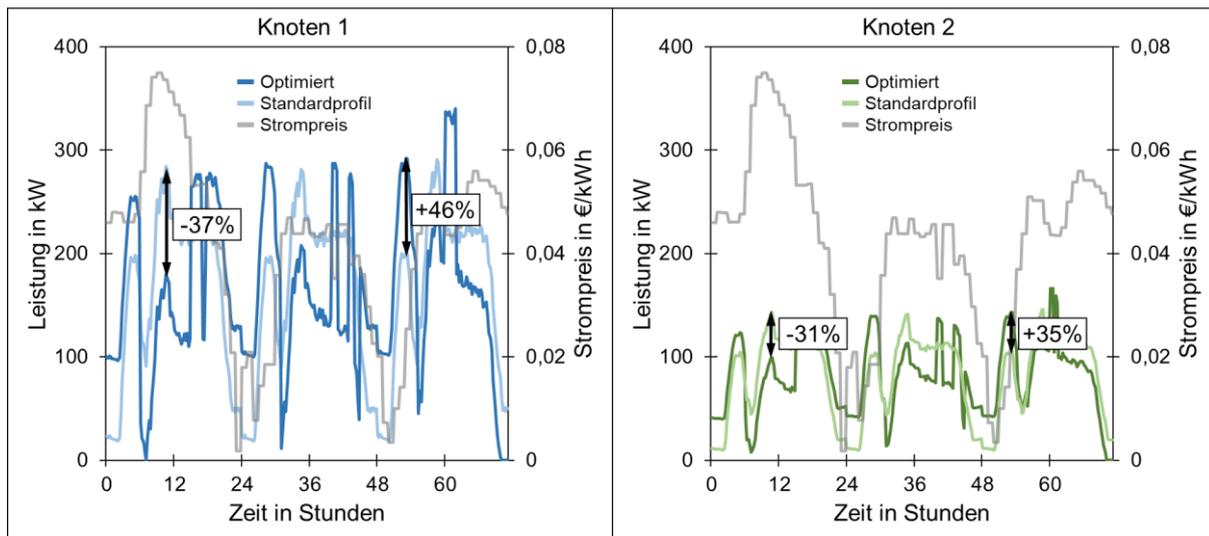


Abbildung 5: Leistungsverläufe der Knoten 1 und 2 im Zukunftsszenario im Jahr 2045

Die Gegenüberstellung der optimierten Leistungsverläufe mit den Standardprofilen der Knoten 1 und 2 ist in Abbildung 6 dargestellt. Mit den gewählten Nebenbedingungen von einem maximalen  $\Delta T_{max}$  von 1 K in sechs Stunden und, dass die Summe der gelieferten Energie pro Tag dem Standardprofil entsprechen muss, verlaufen die optimierten Profile mit einer ähnlichen Periodizität wie die Referenzprofile. Dennoch ist zu erkennen, dass die optimierten Profile die niedrigsten Preise des Tages ausnutzen. Dass Knoten 1, wie in Abbildung 4 gezeigt, flexibler als Knoten 2 ist, ist ebenfalls an den Leistungsverläufen zu erkennen. In Abbildung 6 sind zwei Beispiele exemplarisch dargestellt. Die Abweichung zum Standardprofil ist sowohl bei optimierten Leistungen, die niedriger als das Profil sind, als auch bei Leistungen, die über dem Profil liegen, bei Knoten 1 immer prozentual größer als bei Knoten 2. Die abgebildeten Beispiele zeigen eine Peakreduktion beispielsweise in Stunde 10, die die Stromkosten in Knoten 1 um 37 % und in Knoten 2 um 31 % verringert. Wie in Tabelle 2 dargestellt, resultieren für die ganze Woche durch die Optimierung für Knoten 1 9 % geringere Stromkosten als ohne Optimierung. Für Knoten 2 ergeben sich reduzieren sich die Stromkosten um 6,9 %.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In Abhängigkeit der gewählten Rahmenbedingungen kann die thermische Gebäudemasse zur Flexibilisierung des Energiesystems und zur Kostenreduktion der Wärmeversorgung einen Beitrag leisten. Die energetische Gebäudesanierung beeinflusst das Potential der Flexibilität stark, sodass Wirtschaftlichkeitsanalysen durchgeführt werden sollten. Grundsätzlich steigt die verfügbare Flexibilitätszeit einzelner Gebäuden aufgrund von Sanierungsmaßnahmen. Durch den Einsatz von Wärmepumpen in sanierten Gebäuden kann sich jedoch in Zukunft die verfügbare Flexibilitätszeit aggregierter Verbrauchergruppen reduzieren. Dies ist von der Tiefe der energetischen Sanierung abhängig. Unter der Annahme, dass die Sanierungstiefe nicht den heutigen Neubaustandards entspricht ist eine Reduktion der verfügbaren Flexibilitätszeit zu erwarten. Die Leistungsflexibilität steigt dennoch aufgrund der an der Flexibilität teilnehmenden Gebäuden.

## 6 Literatur

- [1] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.v., "Statusreport: Wärme," 2023.
- [2] ESM-Regio, "Modellprojekt ESM-Regio: Optimierung des Energiesystems über Sektorkopplung," 2023. <https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/esm-regio> (accessed May 11, 2023).
- [3] Z. You, M. Zade, B. K. Nalini, and P. Tzscheuschler, "Flexibility Estimation of Residential Heat Pumps under Head Demand Uncertainty," *Energies*, vol. 14, 2021, doi: 10.3390/en14185709.
- [4] D. Patteeuw, K. Bruninx, A. Arteconi, E. Delarue, W. D'haeseleer, and L. Helsen, "Integrated modeling of active demand response with electric heating systems coupled to thermal energy storage systems," *Appl. Energy*, vol. 151, pp. 306–319, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.014.
- [5] T. H. Pedersen, R. E. Hedegaard, and S. Petersen, "Space heating demand response potential of retrofitted residential apartment blocks," *Energy Build.*, vol. 141, pp. 158–166, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.02.035.
- [6] E. Biyik and A. Kahraman, "A predictive control strategy for optimal management of peak load, thermal comfort, energy storage and renewables in multi-zone buildings," *J. Build. Eng.*, vol. 25, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jobbe.2019.100826.
- [7] Z. Marijanovic, P. Theile, and H. Czock, "Value of short-term heating system flexibility e A case study for residential heat pumps on the German intraday market," 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123664.
- [8] J. Clauß, S. Stinner, I. Sartori, and L. Georges, "Predictive rule-based control to activate the energy flexibility of Norwegian residential buildings: Case of an air-source heat pump and direct electric heating," *Appl. Energy*, vol. 237, pp. 500–518, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.074.
- [9] R. El Geneidy and B. Howard, "Contracted energy flexibility characteristics of communities: Analysis of a control strategy for demand response," *Appl. Energy*, vol. 263, no. October 2019, p. 114600, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114600.
- [10] F. D'Ettore, M. De Rosa, P. Conti, D. Testi, and D. Finn, "Mapping the energy flexibility potential of single buildings equipped with optimally-controlled heat pump , gas boilers and thermal storage," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 50, no. June, p. 101689, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101689.
- [11] C. Finck, R. Li, R. Kramer, and W. Zeiler, "Quantifying demand flexibility of power-to-heat and thermal energy storage in the control of building heating systems," *Appl. Energy*, vol. 209, no. July 2017, pp. 409–425, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.036.
- [12] M. B. Anwar, H. W. Qazi, D. J. Burke, and M. J. O'Malley, "Harnessing the Flexibility of Demand-Side Resources," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 4151–4163, 2020.
- [13] F. Pallonetto, M. De Rosa, F. Milano, and D. P. Finn, "Demand response algorithms for smart-grid ready residential buildings using machine learning models," *Appl. Energy*, vol. 239, pp. 1265–1282, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.02.020.
- [14] K. Hedegaard, B. V. Mathiesen, H. Lund, and P. Heiselberg, "Wind power integration using individual heat pumps - Analysis of different heat storage options," *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 284–293, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.09.030.
- [15] M. Pau, J. L. Cremer, F. Ponci, and A. Monti, "Impact of Customers Flexibility in Heat Pumps Scheduling for Demand Side Management," 2017, doi:

- 10.1109/EEEIC.2017.7977681.
- [16] A. Arteconi and F. Polonara, "Assessing the Demand Side Management Potential and the Energy Flexibility of Heat Pumps in Buildings," *Energies*, pp. 1–19, 2018, doi: 10.3390/en11071846.
- [17] P. D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, and J. Salpakari, "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 785–807, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.057.
- [18] F. Pallonetto, M. De Rosa, F. D'Ettoire, and D. P. Finn, "On the assessment and control optimisation of demand response programs in residential buildings," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 127, no. April 2019, p. 109861, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109861.
- [19] H. Johra, P. Heiselberg, and J. Le Dréau, "Influence of envelope, structural thermal mass and indoor content on the building heating energy flexibility," *Energy Build.*, vol. 183, pp. 325–339, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.11.012.
- [20] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz." 2013.
- [21] D. Romanchenko, E. Nyholm, M. Odenberger, and F. Johnsson, "Flexibility Potential of Space Heating Demand Response in Buildings for District Heating Systems," *Energies*, 2019, doi: 10.3390/en12152874.
- [22] Q. Cui, X. Bai, and W. Dong, "Collaborative planning of a distributed wind power generation and distribution network with large-scale heat pumps," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 5, no. 3, pp. 335–347, 2019, doi: 10.17775/cseejpes.2019.00140.
- [23] F. Baccino, F. Silvestro, and S. Grillo, "Management strategy for unbalanced LV distribution network with electric vehicles, heat pumps and domestic photovoltaic penetration."
- [24] S. Steinle, M. Zimmerlin, F. Mueller, L. Held, M. R. Suriyah, and T. Leibfried, "Time-Dependent Flexibility Potential of Heat Pump Systems for Smart Energy System Operation," doi: 10.3390/en13040903.
- [25] S. Stinner, K. Huchtemann, and D. Müller, "Quantifying the operational flexibility of building energy systems with thermal energy storages," *Appl. Energy*, vol. 181, pp. 140–154, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.055.
- [26] L. Zhang, N. Good, and P. Mancarella, "Building-to-grid flexibility: Modelling and assessment metrics for residential demand response from heat pump aggregations," *Appl. Energy*, vol. 233–234, pp. 709–723, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.058.
- [27] D. Fischer, T. Wolf, J. Wapler, R. Hollinger, and H. Madani, "Model-based flexibility assessment of a residential heat pump pool," *Energy*, vol. 118, pp. 853–864, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.10.111.
- [28] P. Heiselberg and J. Le Dréau, "Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass," vol. 111, pp. 991–1002, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.05.076.
- [29] F. Pallonetto, M. De Rosa, and D. P. Finn, "Impact of intelligent control algorithms on demand response flexibility and thermal comfort in a smart grid ready residential building," *Smart Energy*, vol. 2, May 2021, doi: 10.1016/j.segy.2021.100017.
- [30] L. Kurevska, "Heat Pump Optimization Strategies for Participation in Price-Controlled Demand Response in the Latvian Electricity Market," *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 58, no. 3, pp. 98–107, Jun. 2021, doi: 10.2478/lpts-2021-0019.
- [31] F. Pallonetto, S. Oxizidis, F. Milano, and D. Finn, "The effect of time-of-use tariffs on the

- demand response flexibility of an all-electric smart-grid-ready dwelling,” *Energy Build.*, vol. 128, pp. 56–67, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.041.
- [32] V. Gustedt, B. Greve, C. Brehm, and C. Halici, “Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023,” 2023. [Online]. Available: [www.amprion.net](http://www.amprion.net).
- [33] Deutsche Energie-Agentur, “dena-Gebäudereport 2016: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand,” 2016.
- [34] IWU - Institut für Wohnen und Umwelt, “TABULA WebTool.” <https://webtool.building-typology.eu/>.
- [35] Verein Deutscher Ingenieure e.V., “DIN 4655,” in *DIN4655*, 2021.
- [36] G. Luderer *et al.*, “Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 Szenarien und Pfade im Modellvergleich,” p. 359, 2021, [Online]. Available: [https://publications.pik-potsdam.de/rest/items/item\\_26056\\_3/component/file\\_26098/content](https://publications.pik-potsdam.de/rest/items/item_26056_3/component/file_26098/content).
- [37] N. Diefenbach, T. Loga, and B. Stein, “Szenarienanalysen und Monitoringkonzepte im Hinblick auf die langfristigen Klimaschutzziele im deutschen Wohngebäudebestand,” 2015. Accessed: Sep. 14, 2021. [Online]. Available: [www.episcope.eu](http://www.episcope.eu).
- [38] Boston Consulting Group, “Klimapfade 2.0,” 2021.
- [39] Fraunhofer IWES/IBP, “Wärmewende 2030 Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel-und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor,” 2017. Accessed: Sep. 23, 2021. [Online]. Available: [www.agora-energiewende.de](http://www.agora-energiewende.de).
- [40] Gurobi Optimization LLC, “Gurobi Optimizer Reference Manual.” 2021, [Online]. Available: <https://www.gurobi.com>.